



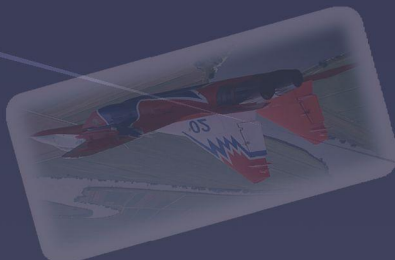
СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY



М.И. Ботов
В.А. Вяхирев
В.В. Девотчак

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Монография



М.И. Ботов
В.А. Вяхирев
В.В. Девотчак

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

М. И. Ботов, В. А. Вяхирев, В. В. Девогчак

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Монография

Под редакцией М. И. Ботова

Красноярск
СФУ
2012

УДК 621.396.967
ББК 68.52
Б861

Рецензенты:

кафедра радиоэлектронных систем ФГБОУ «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации» (протокол № 7 от 04.05.2012, зав. каф., канд. техн. наук, доц. *В. К. Кульчицкий*);

Д. Г. Митрофанов, ст. науч. сотр. НИЛ систем управления войсковой ПВО Военной академии войсковой ПВО Вооруженных сил Российской Федерации им. маршала Советского Союза А. М. Василевского, заслуженный изобретатель Российской Федерации, д-р техн. наук, проф.

Ботов, М. И.

Б861 Введение в теорию радиолокационных систем : монография / М. И. Ботов, В. А. Вяхирев, В. В. Девотчак ; ред. М. И. Ботов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. – 394 с.
ISBN 978-5-7638-2740-8

В первом разделе монографии рассматриваются вопросы теории и методологии радиолокационных систем, приводится краткая характеристика послереформенного состояния радиолокационной системы радиотехнических войск, обобщенной структуры и функций Единой системы организации воздушного движения на этапе ее преобразования в Аэронавигационную систему страны. Излагаются принципы совершенствования и развития Единой автоматизированной радиолокационной системы, обосновываются ее показатели качества, критерии эффективности, предлагаются информационная и статистическая модели.

Во втором разделе предпринимается попытка построения концептуальной модели радиолокационной науки, фундаментальной схемы теории радиолокации, основ статистической теории радиолокационной системотехники. Проводится синтез и анализ помехозащищенных высокоточных алгоритмов и устройств измерения угловых, времячастотных и поляризационных параметров радиолокационных сигналов.

Монография предназначена для научных работников, преподавателей, аспирантов и магистрантов, исследующих актуальные проблемы теории и методологии радиолокационных систем и радиолокационной системотехники. Может быть полезна студентам вузов, обучающимся по укрупненным группам направлений подготовки специальностей «Электронная техника, радиотехника и связь» и «Аэронавигация».

УДК 621.396.967
ББК 68.52

ISBN 978-5-7638-2740-8

© Ботов М.И., Вяхирев В.А., Девотчак В.В., 2012
© Сибирский федеральный университет, 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Технические научные теории, как и теории вообще, рождаются в сознании людей. Однако рождаются они не тогда, когда люди этого захотят, и не так, как это им вздумается, а тогда, когда для этого возникают объективные (исторические, логико-методологические, научно-организационные, технико-технологические, социально-культурные и другие) предпосылки и основания и в соответствии с определенными закономерностями объективного характера. И уж если отмеченные предпосылки и основания возникли, то никакие догматические представления и убеждения относительно необходимости теоретического описания того или иного явления не остановят самодвижение новой технической теории и ее проникновение в передовую инженерную практику. Теория радиолокационных систем как особый технико-технологический феномен в радиотехническом научно-дисциплинарном комплексе не является исключением.

Современные радиолокационные (сокращенно – РЛ) системы представляют собой сложные информационно-управляющие системы реального масштаба времени, включающие совокупность средств радиолокации (СРЛ), комплексов средств автоматизации (КСА), средств приема, обработки, отображения и передачи информации, а также средств и технологий управления компонентами этой системы, предназначенные для информационного обеспечения широкого круга военно-технических, научно-экспериментальных и социально-экономических задач.

Длительное время принципы построения, функционирования и развития таких систем разрабатывались в рамках методологии классической научной рациональности, ориентированной на *познание целого посредством познания его частей*. Не случайно содержание большинства современных теоретических разработок и учебных изданий, посвященных теории и методологии радиолокационных систем, ограничено, в основном, проблемами разработки элементов этих систем: радиолокационных станций и средств связи, высокопроизводительных комплексов автоматизации процессов сбора, обработки, отображения и передачи радиолокационной информации, других радиолокационных и информационно-вычислительных комплексов, включенных в контур управления информационными потоками. Это ограничение основывается на неявном допущении о детерминированном характере связей элементов (структуры) РЛ системы, второстепенности этих связей относительно вклада элементов системы в суммарный эффект ее функционирования в различных условиях внешней среды. С этой точки зрения

не стала исключением и соответствующая обзорная статья известных специалистов¹, в которой сущность и содержание РЛ систем мыслится в контексте принципов и специфики построения того или иного радиолокатора, пусть даже самого совершенного.

В то же время технико-технологическая сложность, финансово-ресурсо- и энергоемкость, существенная пространственно-временная гибкость и мобильность такой системы, а также государственный характер решаемых ею задач привели к необходимости анализа протекающих здесь процессов не только под углом зрения качества отдельных элементов, но с точки зрения качества ее структурной организации и уровня информационной неопределенности относительно текущего и ожидаемого состояния (поведения) системы. Даже радиолокационная подсистема Единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД), решающая сугубо мирные задачи текущей организации и управления воздушным движением гражданской авиации (ГА), с интеграцией ее в Единую автоматизированную радиолокационную систему (ЕАРЛС) Российской Федерации приобрела явно выраженные признаки системы двойного назначения. Соответственно и подход к исследованию таких систем уже не может базироваться только лишь на практико-ориентированном фактуальном базисе и методе проб и ошибок², не может быть сведен только лишь к эклектичному набору частных рецептов, отдельных рекомендаций или инженерных методик, а должен включать совокупность развитых теоретических представлений об исследуемом объекте и эффективные средства и принципы организации современной научно-технической деятельности, то есть представлять собой диалектическое единство передовой технической теории и современной научной методологии. Одно из важнейших направлений развития такой методологии представлено системным подходом.

Системный подход является вершиной развития междисциплинарной методологии неклассической научной рациональности и обеспечивает *познание частей на основании знания закономерностей целого и свойств целостности*. Он позволяет проводить глубокий и всесторонний анализ основных показателей качества функционирования сложных РЛ систем, стро-

¹ Особенности развития радиолокационных систем / Р.П. Быстров [и др.] // Радиотехника. 2010. №9. С. 71–90.

² О живучести такого подхода свидетельствует, например, современный опыт реформирования Вооруженных сил Российской Федерации. С этой точки зрения значительный интерес представляет статья С. Волкова с символическим названием «Путем проб и ошибок». Как пишет автор, «проводимая реформа Вооруженных сил России заставляет вновь и вновь возвращаться к вопросу научного обоснования рациональной структуры Вооруженных сил нашего Отечества. Эта проблема актуализируется еще и потому, что ни подходы к проведению реформы, ни авторы осуществляемых в армии и на флоте масштабных преобразований широкой военной общественности неизвестны». См.: ВКО. 2010. № 2. С. 40–53.

ить долгосрочный адекватный прогноз наиболее вероятных направлений развития, а также проводить комплексное всестороннее исследование одной из важнейших составляющих этих систем – средств радиолокации, включая сущность заложенных в них актуальных и перспективных технических решений. Значение системной методологии, как и полученных на ее основе результатов, тем более существенно, что речь идет о системах государственного масштаба, построение которых, с одной стороны, направлено на эффективное выполнение задач народно-хозяйственного и оборонного характера³, а с другой – связано с огромными финансовыми затратами, неоправданные масштабы которых могут поставить под сомнение целесообразность создания этой системы, экономически не менее разрушительной, чем, например, внешняя военная агрессия.

В то же время рассматриваемая системная методология, какой бы развитой она ни была и как бы грамотно она ни применялась, способна эффективно решать возложенные на нее научно-технические и технологические задачи применительно к сложным системам, находящимся в стационарном (относительно устойчивом, асимптотическом) или близком к нему состоянии. Однако по-настоящему сложные системы возникают и самоподдерживаются на тонкой границе хаоса и порядка: выше порогового значения система становится неустойчивой, и любое микроскопическое движение (флуктуация) может вызвать быстрый лавинообразный процесс нарастания изменений, вплоть до формирования новой макроструктуры или простого распада. Современные радиолокационные системы, включая РЛ системы Радиотехнических войск (РТВ) и ЕС ОрВД, относятся к классу именно таких систем. Они могут определенное время находиться в относительно устойчивом (равновесном) состоянии. Однако в значительно более продолжительные отрезки времени, особенно при функционировании в особый (угрожаемый) период или в период ведения боевых действий, такие системы проявляют явно выраженные нелинейные свойства, пребывая далеко от равновесного состояния. В этом нелинейном мире принцип классической суперпозиции утрачивает актуальность: целое больше не равно сумме своих частей, оно не больше и не меньше, а качественно иное. Понятно, что для адекватного теоретического описания та-

³ Необходимость применения системного подхода к решению актуальных проблем гражданской авиации нашла свое отражение в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 г., где, в частности, отмечается: «Уже в ближайшее время должна быть реализована Государственная программа обеспечения безопасности полетов воздушных судов гражданской авиации, которая в соответствии с рекомендациями Международной организации гражданской авиации по внедрению системного подхода к управлению безопасностью полетов определяет первоочередные цели и мероприятия с целью повышения безопасности полетов». – См.: Распоряжение Правительства РФ №1734-р от 22. 11. 2008 г. С. 148.

ких систем арсенала методологических средств традиционного системного подхода уже недостаточно.

Вместе с тем актуальные запросы практики в адекватных моделях теоретического описания того или иного фрагмента реальности или схемы проектно-инженерной деятельности недолго остаются без ответа. Общая теория и методология науки обычно достаточно скоро находят соответствующие концептуальные схемы и методы. Не стал исключением и класс сложных (нелинейных или диффузных) систем, весьма распространенный в повседневной действительности. Поэтому в рамках современной (постнеклассической) научной рациональности возникла и стала успешно развиваться новая отрасль междисциплинарного научного знания – синергетика. Если традиционный системный подход при изучении линейных моделей различной природы интересовали процессы поддержания системного гомеостаза (сохранение или реконструкция постоянного состояния) с помощью обратных связей, то в рамках синергетического подхода стали изучаться существенно неравновесные системы с точки зрения проблемы выбора дальнейшего направления развития в точках бифуркации (ветвления) и роли случайностей в этих процессах. Если традиционный системный подход базируется на линейных приближениях с медленно изменяющимися параметрами, то в рамках синергетического подхода сложные системы исследуются за пределами состояния равновесия. В них изучаются существенно нелинейные, в том числе быстро развивающиеся процессы, которые при определенных условиях флуктуации (внутренней или внешней) могут привести систему к качественным изменениям – простому распаду или формированию новых относительно устойчивых структур. При этом упомянутые гомеостатические процессы охватываются синергетикой как частный случай эволюционирования сложных структур. В этой связи перед идеологами и методологами РЛ систем различного назначения возникает не только онтологическая задача исследования этих систем с точки зрения теории нелинейных процессов, но и науковедческая задача синтеза некоторого эффективного междисциплинарного подхода к их изучению.

В то же время, хотя целенаправленное выявление способов упорядочения связей компонентов РЛ системы, обеспечивающих достижение системного (сверхсуммарного) эффекта, важно и самоценно, однако не менее важным и ценным является совершенствование и развитие уровня технической организации самих компонентов (элементов) системы. Речь идет о теории радиолокации, ее методологии и применении этих отраслей науки к решению масштабных задач синтеза перспективных радиолокационных станций (РЛС) с тем, чтобы наиболее адекватно отразить не только *системную форму* организации (структуру), но и *радиолокационно-*

информационную (технико-технологическую) сущность рассматриваемой системы.

Радиолокация на протяжении относительно непродолжительной истории своего становления и развития строилась преимущественно как эмпирическая научная дисциплина с преобладающим в ней методом индуктивного анализа и синтеза концептуальных положений и схемных решений на основе поэтапного перехода от детерминированного к квазидетерминированному или стохастическому сигналу. При этом преодоление возникающих фундаментальных проблем обработки сигналов на фоне внешних помех сопровождалось последовательным усложнением исходных теоретических конструктов и соответствующей идеальной модели объекта, которые, тем не менее, оставались эмпирическими. Не случайно методологическая проблема соотношения статистической теории радиолокации и статистической теории радиолокационных систем до сих пор остается одной из наиболее актуальных. Ограниченность такой модели, как и связанного с ней метода синтеза радиолокационных систем, проявилась уже при обработке сигналов в сложной помеховой обстановке, когда априорная неопределенность относительно мешающих параметров сигналов и внешних помех оказалась существенной, а информативные параметры сигнала (например, угловое направление на объект локации или доплеровский сдвиг по частоте) на фоне соответствующих видов помех стали носить энергетический характер. В наибольшей степени ограниченность отмеченной теоретической модели проявилась на этапе измерения параметров объектов локации после адаптации пространственных, поляризационных и времячастотных характеристик измерительного комплекса к соответствующим видам помех, сопровождающегося существенными систематическими и флуктуационными ошибками измерения как на уровне отдельного радиолокатора, так и в рамках самой РЛ системы.

Традиционно обработка сигналов и измерение их параметров на фоне помех с пространственной, временной или поляризационной корреляцией относились к комплексу проблем специальной радиолокации и решались преимущественно в интересах национальной обороны. В рамках этого комплекса проблем и осуществлялся анализ РЛ систем оборонного характера с точки зрения их функционального качества. Для авиационной радиолокации, связанной преимущественно с радиотехническим обеспечением полетов (РТОП) ГА, этот комплекс проблем носил второстепенный, общетеоретический или ориентационный характер. Однако с интеграцией подсистемы РТОП ГА в ЕАРЛС и, следовательно, с приобретением ею дополнительного функционального качества (качества системы двойного назначения) ситуация принципиально изменилась. Адаптация и измерение параметров сигналов на фоне пространственно коррелированных помех,

наряду с адаптацией к пассивным помехам, прочно вошли в комплекс проблем авиационной радиолокации в качестве наиболее приоритетных. Соответственно приоритетными оказались и задачи анализа подсистемы РТОП с точки зрения ее структуры и организации.

В этой связи материал монографии представлен двумя разделами. В первом рассматриваются основы теории и методологии РЛ систем, которые в силу их системной формы и радиолокационной сущности носят явно выраженный междисциплинарный характер. Эти теоретические и методологические основы посредством рассуждений частного характера с привлечением конкретных расчетов, простых эмпирических схем и математических формул развертываются далее в некоторые теоретические представления о содержании и структуре конкретных радиолокационных систем. Поскольку такой методологический прием отражает традиционный метод движения и развития радиолокационного знания от *чувственно-конкретного к абстрактному* (метод научной индукции), постольку полученные здесь знания, выводы и рекомендации не содержат фундаментальных обобщений, а носят вероятностно-достоверный, рекомендательный характер. Они нарастают, как снежный ком, и подлежат пересмотру или существенной коррекции, как только меняются начальные условия функционирования системы, то есть очень быстро устаревают. Понятно, что многие фундаментальные проблемы функционирования и развития радиолокационных систем выпадают из поля зрения такого методологического подхода, а для их удовлетворительного решения требуется разработка дополнительных частнометодических схем, последующее применение которых, тем не менее, полного успеха не гарантирует. Во втором разделе монографии предпринята попытка разработки концептуальной модели радиолокационной науки, обобщенной структурной схемы ее теории и применения полученных теоретических обобщений и методологических средств для дедуктивного синтеза ряда важнейших в инженерной практике систем адаптивного обнаружения и измерения параметров радиолокационных сигналов в условиях априорной неопределенности относительно условий функционирования РЛ системы и параметров внешней среды.

В центре этого методологического подхода находится идея об образе радиолокационной науки как сложной исторически развивающейся системы, которая представляет собой особый тип системной организации. Такая система хотя и сохраняет саморегуляцию в качестве одного из своих компонентов, однако историческое ее развитие сопровождается появлением новых уровней организации, которые воздействуют на ранее сложившиеся уровни, трансформируют их, видоизменяя предшествующую организацию. В этом развитии система научного радиолокационного знания всякий раз приобретает *новую целостность*, несмотря на увеличение ее разнообразия

относительно автономных подсистем. Поэтому выбор системно-синергетического подхода, в том числе и к проблеме концептуализации радиолокации, вполне очевиден. Наука, выработав на определенном этапе своего развития системную методологию, не может не осознавать себя в качестве сложной, саморазвивающейся системы, характеризующейся переходом от одного типа саморегуляции к другому и созданием уровневой иерархии входящих в нее элементов.

Подобный подход позволил представить радиолокационную науку в виде двух научных радиолокационных систем: а) системы, направленной на выявление и адекватное отражение специфики, сущности и основных закономерностей радиолокационного взаимодействия (*теоретическая радиолокация*); б) системы методологических нормативов, методических схем и приемов системотехнической деятельности, основанной на закономерностях радиолокационного взаимодействия (*радиолокационная системотехника*).

Рассмотренные компоненты радиолокационной науки, сохраняя свою относительную самостоятельность и подчиняясь внутренним законам функционирования и развития, оказываются охваченными сложной системой диалектических взаимопереходов, в которой научное теоретическое знание в виде логически упорядоченной совокупности теоретических фактов, обобщений, законов, следствий и утверждений, соответствующих *критериям истинности*, трансформируются в методологические принципы и нормы системотехнической деятельности, а эмпирическое знание, снятое в процессе разработки, экспериментальной проверки и доводки новых радиолокационных систем, технологий или методик, соответствующее *критериям эффективности*, трансформируется в эмпирическую основу научной радиолокационной теории. Этот сложный, исторически противоречивый процесс взаимодействия и диалектических взаимопереходов двух относительно самостоятельных форм существования радиолокационной науки отражает бесконечную спираль ее функционирования и развития. Очевидно, что новый уровень развития радиолокационной науки, и особенно ее «нижнего этажа» (радиолокационной системотехники), позволяет придать сложившимся эмпирическим методам синтеза и исследования РЛ систем любого назначения новое методологическое качество. При этом теория и методология таких систем постепенно складывается в некоторую междисциплинарную отрасль научно-технического знания, позволяющую в процессе их разработки и исследования оперировать всей информацией одновременно.

Содержание монографии могло быть раскрыто на основе дедуктивного подхода (*движение и развитие радиолокационного знания от абстрактного к мысленно конкретному*). При этом исходной для рассуждений

и выводов должна была стать фундаментальная (абстрактная) схема теории радиолокации, из которой те или иные эмпирические схемы и частные технические решения вытекали бы как закономерное следствие. Однако индуктивная логика развертывания материала, по мнению авторов, является и методологически, и методически обоснованной.

Во-первых, современная теоретическая радиолокация только лишь проходит стадию концептуализации, то есть стадию формирования своего общетеоретического ядра. Столь же проблематичным является формирование более или менее четких теоретических представлений о РЛ системах вообще. Поэтому дедуктивное изложение материала, без предварительного описания сущности междисциплинарной методологии и специфики фундаментальной схемы теоретической радиолокации, оказалось бы достаточно трудным для восприятия и понимания.

Во-вторых, такая логика построения монографии отражает историю становления и развития радиолокации как относительно самостоятельной научной дисциплины в радиотехническом научно-дисциплинарном комплексе. Без учета истории развития идей радиолокации невозможно глубоко разобраться и в современном состоянии теории радиолокационной науки, и в теоретических проблемах РЛ систем. С этой точки зрения упомянутая логика имеет самостоятельную теоретическую и методологическую ценность.

В-третьих, такая логика изложения материала представляет собой, с одной стороны, классический пример использования в решении сложных проблем теории РЛ систем научных методов восхождения от чувственно-конкретного к абстрактному и нисхождения от абстрактного к мысленно-конкретному в их диалектическом единстве, а с другой – такой же классический пример реализации принципа единства исторического и логического в познании этих систем. Без учета истории развития радиолокации в самом деле невозможно глубоко разобраться в современном состоянии радиолокационной теории. Однако если прежние теории сопоставляются только с теми историческими фактами, на основе которых они были созданы, а не анализируются с точки зрения современных теоретических представлений, как это предполагает принцип единства исторического и логического, то история становления и развития радиолокационной науки оказывается не только бесконечно и неоправданно разнообразной, но и сугубо индивидуализированной. Само же исследование будет представлять собой своеобразное накопление «сырого» материала, вехами в котором выступают не те или иные потребности развивающегося общества, не внутренняя логика функционирования и развития научно-технического знания, а деятельность различных исторических персонажей. Понятно, что такое индивидуализированное разнообразие, столь характерное для современной методологии

социально-гуманитарного комплекса научных дисциплин, может оказаться лишенным внутреннего единства, без установления которого не может быть и научного подхода к синтезу и анализу РЛ систем. И если отмеченный просчет методологии социально-гуманитарного комплекса, в силу известной ограниченности исторических рамок развития, можно отнести к издержкам ее становления, то такие просчеты применительно к технико-технологическому комплексу дисциплин методологически уже не оправданы, а с точки зрения инженерной практики – даже опасны.

В-четвертых, рассматриваемый подход является наглядным свидетельством того, каким образом частные методики, эмпирические факты, гипотезы и эмпирические закономерности, накапливаясь и систематизируясь, постепенно создают качественную и количественную основу для перехода радиолокации на теоретический уровень, поскольку любая теория не рождается на пустом месте, а выводится из соответствующего эмпирического знания.

Таким образом, объектом научного познания в монографии является радиолокационная система как сложная (неравновесная или диффузная) система с рефлексией. В качестве предмета научного исследования выступают элементы теории и методологии ЕАРЛС, специфика процессов ее становления и развития, а также основы статистической теории радиолокационной системотехники и ее практические приложения к задачам синтеза адаптивных обнаружителей-измерителей параметров радиолокационных сигналов.

В первой главе исследуются проблемы становления теории и методологии РЛ систем, обосновывается их междисциплинарная специфика, рассматриваются общие принципы исследования операций, принципы системного, синергетического и информационного подходов как важнейшие компоненты междисциплинарной методологии, раскрываются некоторые методические приемы их применения к решению задач анализа и синтеза РЛ системы как сложной неравновесной системы с рефлексией.

Во второй главе обосновываются предпосылки создания ЕАРЛС, приводится краткая характеристика послереформенного состояния РЛ системы радиотехнических войск, обобщенной структуры и функций ЕС ОрВД на этапе ее преобразования в Аэронавигационную систему России (АНС). Разрабатываются принципы совершенствования и развития ЕАРЛС как важнейшей составляющей глобального информационного пространства страны, обосновываются показатели качества, критерии эффективности, информационная и статистическая модели подобного класса систем.

В третьей главе исследуются науковедческие (общетеоретические и методологические) аспекты радиолокации как относительно

самостоятельной научной дисциплины, предпринимается попытка построения концептуальной модели радиолокационной науки, обобщенной структуры теории радиолокации и ее фундаментальной схемы, рассматриваются основные формы научного радиолокационного знания и их взаимосвязь.

В четвертой главе излагаются основы статистической теории радиолокационной системотехники; предпринимается попытка построения концептуальной модели (фундаментальной схемы) теории обработки радиолокационных сигналов на фоне коррелированных помех различной пространственно-временной структуры; проводится синтез и анализ алгоритмов непрерывной и дискретной оценки корреляционной матрицы помех и ей обратной, алгоритмов оценки весового вектора системы адаптивной пространственно-временной обработки сигналов в РЛС с фазированной антенной решеткой (ФАР); проводится синтез и анализ адаптивных измерителей угловых, времячастотных и поляризационных параметров сигналов в условиях внешних помех.

Авторы выражают признательность рецензентам Д.Г. Митрофанову, доктору технических наук профессору заслуженному изобретателю Российской Федерации (Военная академия войсковой ПВО имени маршала Советского Союза А.М. Василевского) и В.К. Кульчицкому, кандидату технических наук доценту (Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации) за замечания и рекомендации, способствующие улучшению содержания монографии.

Раздел 1
ЕДИНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ
РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА:
ОСНОВЫ ТЕОРИИ И МЕТОДОЛОГИИ

Глава 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

1.1. Теоретические основания радиолокационных систем

В науковедении *научная теория рассматривается как высшая системная форма организации научного знания*, достоверно и адекватно описывающего и объясняющего соответствующий фрагмент объективной или субъективной реальности средствами собственного понятийно-категориального аппарата (научного языка). В отличие от произвольного теоретического знания научная теория обладает некоторыми существенными признаками, к которым относят:

1. Предметность. Все термины, понятия, категории и утверждения научной теории должны относиться к одной объектной или предметной области.

2. Адекватность (полнота). Язык теории, ее основные понятия, категории, принципы, модели и т. д. должны описывать все возможные ситуации в отражаемой объектно-предметной области.

3. Интерпретируемость. Теория должна раскрыть смысл объекта в двух аспектах:

а) эмпирическом – установить связи между теоретическим языком и набором опытных показателей (например, сравнить числовые значения формул и данных статистического моделирования или эксперимента);

б) семантическом – установить отношения содержания понятий теории и признаков реальных объектов.

4. Проверимость. Следствия теории должны позволять проверить степень соответствия теории ее реальным объектам.

5. Истинность. Основные утверждения теории достоверно (правильно, точно, надежно) устанавливаются (в отличие, например, от гипотез, где достоверность вероятностна).

6. Системность. Научная теория объединяет известные знания об объекте (предмете) субординационными (между уровнями) и координационными (по одному уровню) связями в единую систему⁴.

Подобное представление о научной теории сложилось в рамках упоминавшейся выше классической научной рациональности на базе

⁴ Науковедение: Фундаментальные и прикладные аспекты / М.И. Ботов [и др.]; ред. В.П. Каширин. Красноярск, 1998. С. 36.

дисциплин естественнонаучного цикла, в первую очередь, – теоретической физики. Основным критерием научности таких теорий является истинность соответствующего научного знания. В то же время, научные теории как таковые малоинтересны обществу, если они не обусловлены практикой, не доведены до уровня практических инженерных рекомендаций. В отличие от естественнонаучной теории, имеющей самостоятельную научную ценность, техническая теория приобретает определенную социальную значимость и методологическую ценность только лишь в ее нацеленности на решение актуальных задач инженерной деятельности и ее методологии. Поэтому научно-техническая теория имеет многоуровневую и значительно более сложную структуру, чем любая естественнонаучная теория, а в качестве основного критерия научности здесь выступает эффективность научно обоснованной инженерной деятельности.

В более или менее строгом виде признаки дисциплинарной организации технического знания, обобщенная структура научно-технической дисциплины, формы научно-технического знания и их диалектика, а также структура научно-технической теории и ряд ее практических приложений рассмотрены в 3-й главе на примере радиолокационной науки. Полученные здесь теоретические положения, выводы и методологические принципы позволяют решить ряд актуальных задач обнаружения РЛ сигналов и измерения их параметров в условиях существенной априорной неопределенности относительно параметров внешних помех и неинформативных параметров сигналов, разработать ряд важных технических решений для адаптивных РЛС широкого функционального назначения. В то же время, сущностные характеристики РЛ систем не могут быть сведены только лишь к боевым возможностям конкретной радиолокационной станции. Являясь формой структурной организации множества РЛС, любая РЛ система уже в силу закона перехода количественных изменений в качественные приобретает специфические свойства целостности, не сводимые к свойствам отдельной РЛС или их неструктурированной совокупности. Поэтому проблема разработки теоретических и методологических оснований РЛ систем оказывается значительно шире методологических возможностей радиолокационной науки и не лишена противоречия, которое генетически связано со спецификой этой системы как объекта теоретического исследования, вытекает из нее.

Во-первых, РЛ системы представляют собой разновидность целенаправленных (социальных) систем, то есть их строение и функционирование подчиняется законам человеческой деятельности. В этом качестве РЛ системы являются объектом общей теории технологии, поскольку основным свойством человеческой деятельности является технологичность. *Во-вторых*, отдельная РЛС приобретает определенную функциональную (тактическую) ценность только как компонент некоторой целостности,

результат функционирования которой превышает суммарный результат функционирования независимых РЛС. С этой точки зрения РЛ системы представляют собой объект общей теории систем и системной (междисциплинарной) методологии. И, *в-третьих*, основным элементом любой РЛ системы является конкретная РЛС, представляющая собой результат материализации основных закономерностей и принципов радиолокационного взаимодействия посредством соответствующих устройств и технологий. С этой точки зрения такая система является объектом соответствующей научно-технической дисциплины – теоретической радиолокации и ее методологии. Это значит, что теория и методология РЛ систем имеют явно выраженный междисциплинарный характер, а процедуры их разработки оказываются значительно более сложными, чем подобные процедуры построения теории и методологии конкретной научно-технической дисциплины, включая радиолокацию.

Создание любой междисциплинарной теории или метатеории начинается с выявления некоторого концептуального ядра, которое позволило бы объединить в устойчивую целостность достаточно разрозненные, иногда противоречивые или взаимоисключающие отрасли частнодисциплинарного научного знания. На начальном этапе формирования теории таким ядром (структурно-функциональным каркасом) выступают научные картины мира, называемые иногда (в зависимости от степени общности) дисциплинарными (междисциплинарными) онтологиями. В случае относительно зрелой теории в качестве ее концептуального ядра выступает так называемая фундаментальная теоретическая схема. Очевидно, что и при обосновании теории РЛ систем возникает необходимость поиска или выбора концептуального ядра, способного придать всем перечисленным выше отраслям научного знания свойства системной целостности. С определенной степенью обоснованности можно предположить, что такое концептуальное ядро может быть позаимствовано из общей теории технологии.

1.1.1. Технологический компонент теории радиолокационных систем

Приоритет технологической специфики РЛ системы относительно ее системной формы и радиолокационной сущности объясняется многими факторами. *Во-первых*, будучи разновидностью целенаправленной (социальной) системы, ассимилирующей в собственных внутренних законах функционирования технологические способы оперирования субъектом деятельности средствами радиолокации, комплексами средств автоматизации и средствами связи в соответствии с некоторой целью, РЛ система одновременно с этим

сама является средством человеческой деятельности более высокого уровня организации. В частности, для РЛ системы оборонного характера (РЛ системы радиотехнических войск) более высоким уровнем организации (надсистемой) являются противовоздушная оборона (ПВО) и Военно-воздушные силы (ВВС) страны. Для РЛ системы ГА в качестве надсистемы выступает ЕС ОрВД, трансформируемая в настоящее время в АНС России. *Во-вторых*, основной ее функциональный элемент – радиолокационная станция – является ни чем иным, как технической формой материализации технологии радиолокационного взаимодействия, поскольку всякой технической системе предшествует соответствующая технология. Поэтому выбор структуры, физических и системных принципов построения РЛС изначально подчиняется законам технологии и только потом – законам строения и функционирования технических (в данном случае – радиолокационных) систем. *В-третьих*, технологическое движение представляет собой одну из социальных форм движения материи и относительно целенаправленных систем наделено свойством всеобщности.

Центральной категорией в технологической теории является категория «*взаимодействие*», поскольку возникновение, функционирование и развитие любого объекта связано с взаимным воздействием среды на объект, а объекта – на среду, то есть с их взаимодействием. Не случайно Ф. Энгельс в свое время заметил: «Мы не можем пойти дальше познания этого взаимодействия именно потому, что позади его нечего больше познавать»⁵. Поэтому радиолокационное взаимодействие, как всякое целенаправленное взаимодействие, помимо естественных (физических) законов, подчиняется законам **технологии** человеческой деятельности, которая, как неотъемлемый компонент социальных систем, представляет собой *целесообразное, опосредствованное и преобразовательное взаимодействие человека с окружающей действительностью* (рис. 1.1). Деятельность изначально протекает в соответствии с некоторой совокупностью принципов, требований, правил и методов, в которых коллективный или индивидуальный субъект раскрывается через социальные и индивидуальные потребности, мотивы, цели и способы (методы)⁶ деятельности, а собственно деятельность – через объект, процесс и конечный результат этой деятельности. Понятие процесса, в свою очередь, раскрывается через технологии и средства деятельности.

⁵ Маркс К., Энгельс Ф. Соч. 2-е изд. Т. 20. С. 570.

⁶ Напомним, что способы (методы) относятся к субъектной сфере деятельности; способов (и методов) в объективной природе не существует, они существуют только в сознании человека. Напомним также, что альтернативой технологии выступает искусство человеческой деятельности. В первом случае деятельность основывается на логическом познании и научной технологической теории, а во втором – на чувственном познании, на интуиции и частном опыте субъекта.

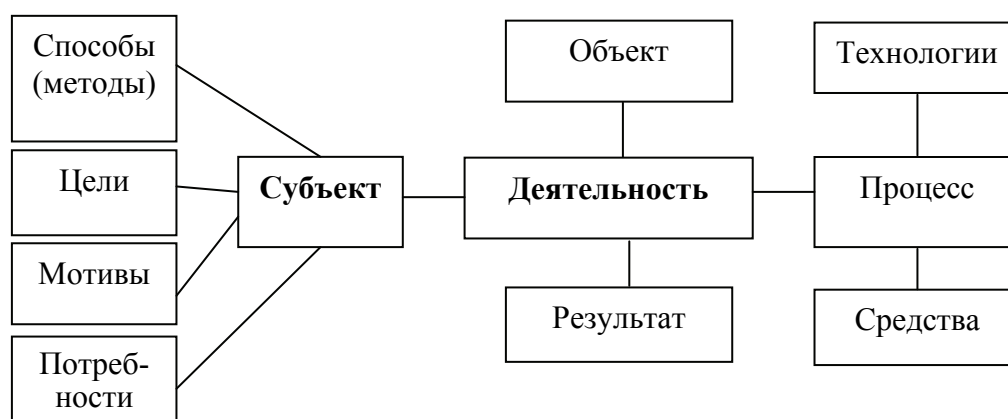


Рис. 1.1. Атрибутивная схема деятельности (по В.В. Беличу)

В рамках такой обобщенной структуры деятельности технологическая специфика радиолокационного взаимодействия проявляется: а) в *целенаправленности* процесса (цель взаимодействия планируется заранее и, безусловно, достигается); б) в *целесообразности* (все компоненты процесса радиолокационного взаимодействия, то есть объекты взаимодействия, радиолокационные методы и средства их реализации, посредством упомянутой ранее технологической функции технологического средства оптимальным образом объединяются вокруг цели взаимодействия, а текущий результат этого взаимодействия подлежит оценке, диагностированию и коррекции); в) в *операциональности* (процесс радиолокационного взаимодействия и лежащие в основе этого взаимодействия методы предполагают определенную логику социальных, тактических (функциональных) и технических действий и операций); г) в *опосредствованном* характере (субъект деятельности между собой и предметом технологического воздействия – радиолокационной целью, внешней средой, воздушным противником и т. д. – размещает: 1) либо модифицированный предмет природы (например, огневое средство поражения в виде боевой части ракеты); 2) либо преобразованный природный процесс в форме зондирующего сигнала РЛС; 3) либо саму РЛ систему как информационно-техническую подсистему системы ПВО или аэронавигационной системы России в случае взаимодействия последних с объектами локации); д) в *функционировании и развитии* процесса радиолокационного взаимодействия в соответствии с принципом *самоорганизации* или автоматизма (самодвижение, саморазвитие, самоконтроль, самонастройка (адаптация) и т. д.), согласно которому технологический процесс в логическом пределе должен протекать самостоятельно, без непосредственного участия в нем человека, но целенаправленно и под контролем человека. В этом случае сам человек (индивидуальный или коллективный субъект деятельности) занимает место за пультом управления.

Технологическая теория основывается на предметно-практической деятельности и опирается на некоторый эмпирический материал. Переход от эмпирической базы к теоретическим конструкциям осуществляется тогда, когда фиксируется элементарное технологическое взаимодействие объекта технологического изменения и технологического средства (взаимодействие той части технологического средства – природного процесса или орудия труда, – которая непосредственно воздействует на предмет технологического преобразования). Это основная фаза закладки технологической теории. Учитывая программу, совокупность определенных принципов, допущений, идеализаций и постулатов, исследователь строит идеальный объект технологической теории.

Выбранное и подвергнутое идеализации элементарное технологическое взаимодействие приобретет необходимое количество параметров, определяющих предмет технологического изменения (вещество, энергия, информация), природу технологического взаимодействия (физическая, химическая, биологическая и социальная), виды (этапы) технологического изменения (получение, преобразование или трансформация, передача и сохранение). Перечисленные категории («предмет технологических изменений», «природа технологических взаимодействий» и «этапы технологических изменений»), называемые теоретическими конструктами, будучи охваченными некоторой системой взаимосвязей, образуют матрицу всеобщей технологии, или технологическую матрицу (рис. 1.2)⁷, которая в теории технологии выполняет функцию фундаментальной теоретической схемы, а для РЛ системы – функцию концептуального ядра и структурно-функционального каркаса искомой междисциплинарной теории.

Здесь важно подчеркнуть, что компоненты каждой из параметрических осей технологической матрицы не функционируют сами по себе, а находятся в диалектической зависимости. Так, биологическая природа взаимодействий органически включает в себя физическую и химическую, а социальная – и физическую, и химическую, и биологическую. Энергия, как объект технологического изменения (преобразования), органически включает в себя вещество, а информация – и энергию, и вещество. Другими словами, технологическое движение информации в диалектически снятом виде включает в себя технологическое движение вещества и энергии. Применительно к РЛ системе это, например, означает, что при выборе ее показателей качества и критериев эффективности, помимо чисто информационных, необходимо вводить и вещественно-энергетические (стоимостные и ресурсные) показатели.

⁷ Каширин В.П. Философские вопросы технологии. Томск, 1988. С. 64–176; Техническое творчество: теория, методология, практика: Энциклопедический словарь-справочник / ред. : А.И. Половинкин, В.В. Попов. М.: НПО «Информ-система», 1995. С. 202–205.

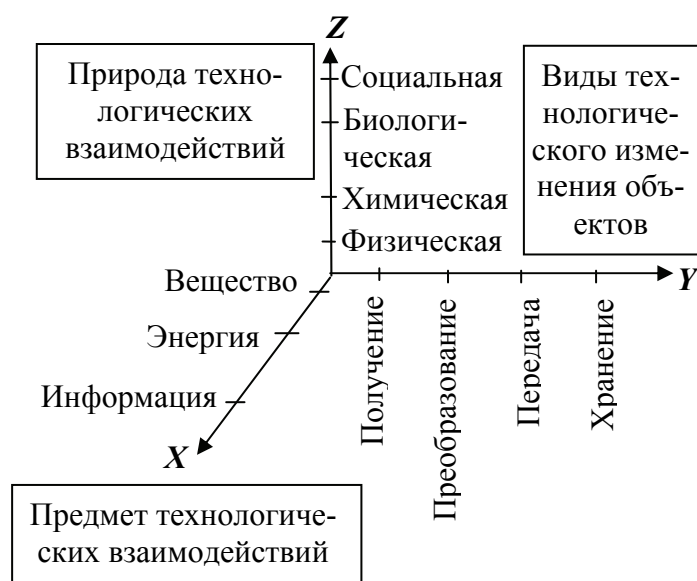


Рис. 1.2. Структура технологической матрицы

Рассматриваемый идеализированный объект (матрица всеобщей технологии), выраженный в развернутой системе понятий, становится конструктивной моделью, которая в дальнейшем подвергается анализу, трансформации или перестройке. Генерируемые гипотезы, частные теоретические схемы, наиболее устойчивые, существенные повторяющиеся связи теоретических конструкторов технологической матрицы (законы) относятся именно к этой модели. В частности, ведущим законом технологического движения, одновременно представляющим собой генеральную линию технического прогресса, является *закон перехода технологической функции⁸ человека к технологическому средству*. Из этого закона вытекают два следствия. *Первое* – коренные (качественные) изменения в технологическом движении и/или взаимодействии связаны не вообще с переходом технологической функции человека к технологическому средству, а с переходом этой функции на уровне *элементарного технологического взаимодействия*. *Второе* – в технологическом процессе в качестве технологического средства должен выступать не модифицированный предмет природы, а *искусственный природный процесс*, протекающий в целесообразных рамках созданных человеком технических структур. При этом весь технологический процесс подчиняется принципу *автоматизма*, который в логическом пределе организует этот процесс по принципам самодвижения, самооцен-

⁸ Технологическая функция технологического средства представляет собой все многообразие действий и операций над предметами технологического преобразования, выполняемых с помощью технических объектов и техники в целом.

ки, самоконтроля, адаптации (самообучения) и т. д., то есть без непосредственного участия в нем человека и при эпизодическом внешнем контроле с его стороны.

Вторым важным законом технологического движения (взаимодействия) является *закон определяющего значения технологической функции относительно содержания (компонентного состава) и структуры (устойчивой системы внутренних связей) технологического средства*. Технологическая функция целесообразно связывает все материальные компоненты технических объектов в единое целое. Она же определяет способ интеграции всего многообразия технических объектов в единую систему техники. Этот объективный закон развития технического объекта (технической системы или системы техники) реализуется через дифференциацию, специализацию и упрощение, которые являются одной из технологических и материальных предпосылок развития техники. Отсюда вытекают такие следствия: а) техника сама по себе как совокупность средств деятельности не представляет собой никакого самостоятельного значения. Она тогда приобретает определенную практическую значимость, когда движение всей ее структуры подчинено технологическим функциям преобразования (переработки) вещества, энергии и информации. Иными словами, в качестве связи элементов технического объекта выступает технологическая функция, а сами материальные технические элементы становятся ее оформлением; б) для передачи технологической функции человека технологическому средству технологический процесс должен быть *предельно расчленен* на элементарные технологические акты (операции). Только предельно расчлененные и упрощенные операции могут быть переданы техническому средству, а успешное функционирование и развитие последнего возможно с учетом передовых достижений науки и техники.

Третий закон технологического движения *отражает детерминацию технологических способов (методов), средств, технологий, предмета и результата деятельности технологической целью*. Технический прогресс, а в рассматриваемом случае – диалектический характер противоречий между потребностями развивающегося общества (например, в объеме и качестве аэронавигационного обеспечения ГА) и информационными возможностями соответствующей РЛ системы изменяет исходные потребности, мотивы и цели деятельности РЛ системы (рис. 1.1). Развитие же целей формирует новые технологические функции и соответствующие им форму и структуру технических объектов (РЛС, комплексов средств автоматизации, средств связи и т. д.), отражая бесконечную спираль технологического движения вещества, энергии и информации.

Трансформация основ технологической теории к проблемам теоретического описания РЛ системы связана: а) с конкретизацией природы техно-

логических взаимодействий по одному из четырех выше перечисленных видов или форм движения материи (физическая, химическая, биологическая, социальная – рис. 1.2); б) с конкретизацией предмета технологических изменений или взаимодействий (вещество, энергия, информация); в) с выявлением специфики элементарного технологического взаимодействия, то есть с выявлением той части технологического средства (природного процесса, орудия), которая непосредственно воздействует на предмет технологического преобразования, вызывая в нем соответствующие изменения.

Очевидно, что для РЛ системы предметом взаимодействия является информация. Природа этого взаимодействия (технологического движения информации) определяется социальной спецификой, а само это технологическое взаимодействие носит явно выраженный **информационный характер**. Элементарное технологическое (радиолокационное) взаимодействие тоже имеет свою специфику. На уровне конкретной РЛС оно, в первую очередь, представляет собой взаимодействие зондирующего сигнала с объектом радиолокации. На уровне некоторой локальной РЛ подсистемы оно представляет собой взаимодействие совокупности РЛ сигналов этой подсистемы с потоком воздушных целей, находящихся в зоне обнаружения последней. Наконец, на уровне самой РЛ системы оно представляет собой взаимодействие всей совокупности РЛ сигналов с потоком воздушных целей, находящихся в пределах радиолокационного поля. Соответственно технологическим средством этого радиолокационного взаимодействия будут: в первом случае – зондирующий сигнал РЛС, во втором – конкретная РЛС, а в третьем – РЛ подсистема необходимого уровня детализации (например, на уровне радиотехнического полка или зоны аэронавигационного обслуживания ГА). В свою очередь, сама РЛ система является средством в технологии информационного взаимодействия некоторой надсистемы, подчиняясь, как было указано выше, той технологической функции, которая ей определена технологической целью этой надсистемы.

С учетом введенной специфики РЛ взаимодействия можно конкретизировать сформулированные выше следствия из закона перехода технологической функции от человека к технологическому средству. В частности, *качественных (принципиальных) изменений показателей качества (тактико-технических параметров или боевых возможностей) конкретной РЛС можно достичь только лишь на уровне взаимодействия зондирующего сигнала с объектом локации*, изменив либо физическую природу (например, за счет перехода от тепло- к радиолокации или наоборот), либо характер (например, за счет перехода от совмещенной к многопозиционной радиолокации), либо параметры (например, за счет перехода от узкополосных к широкополосным сигналам) этого взаимодействия. Качественных изменений боевых возможностей РЛ подсистемы можно достичь

подобным образом, выбрав в качестве элементарного технологического средства отдельную РЛС (с учетом возможности изменения существующих в этой подсистеме внутрисистемных связей). Наконец, качественных изменений боевых возможностей РЛ системы в целом можно достичь, выбрав в качестве элементарного технологического средства отдельную РЛ подсистему с учетом всех предшествующих форм РЛ взаимодействия, вошедших в рассматриваемое макровзаимодействие в диалектически снятом виде. Второе же следствие закона перехода технологической функции человека к технологическому средству указывает, в частности, на то, что усиливающаяся тенденция к автоматизации процессов сбора, обработки и передачи радиолокационной информации (РЛИ) проявляется как одна из основных закономерностей развития современных РЛ систем различного функционального назначения⁹.

Следствие об определяющем значении технологической функции относительно технологического средства проявляется в РЛ системе как закон детерминации физической природы, принципов построения и структуры технологического средства (в рассматриваемом случае: а) зондирующего сигнала для РЛС, б) радиолокационной станции для РЛ подсистемы, в) РЛ подсистемы для всей РЛ системы) той технологической функцией, которую выполняет это средство в общем технологическом движении РЛИ. Поэтому любая военно-техническая или авиационно-транспортная политика, планирующая качественный скачок в области развития соответствующей РЛ системы, должна в первую очередь ставить задачи не количественного накопления РЛ техники (ведущего к застою и отставанию), а роста передовых базовых технологий. Отмеченная зависимость технологического средства от выполняемой им технологической функции позволяет объяснить и феномен морального старения того или иного образца РЛ техники, когда при изменении технологии взаимодействия и, следовательно, технологической функции этого образца в рамках РЛ системы, только что сошедшая с конвейера завода РЛС оказывается бесполезной. Пример тому – выпуск автономных радиовысотометров серии ПРВ при массовом выпуске трехкоординатных РЛС.

Достаточно показательный пример игнорирования закона зависимости технологического средства от выполняемой им технологической функции мы обнаруживаем в процессе анализа идеологии построения современных автоматизированных систем управления ПВО. Как пишет в этой связи А. Литошенко, «проблема автоматизации вопросов управления радиотехническими

⁹ Важно подчеркнуть, что автоматизация тех или иных процессов одновременно предполагает и высокий уровень их технологизации. Это положение отражает содержание одного из постулатов кибернетики. По едкому замечанию основателя отечественной школы кибернетики академика В.М. Глушкова «нельзя автоматизировать бардак».

войсками оставалась проблемой руководства этого рода войск. И руководители РТВ совместно с руководителями ОПК решали ее в рамках своего понимания этих задач: нужно попытаться максимально переложить на машину то, что вручную делают работающие в данном управлении офицеры. Точно такая же ситуация в истребительной авиации и в зенитно-ракетных войсках. В результате на Центральном командном пункте на рабочем месте главнокомандующего ВВС находятся... минимум восемь автоматизированных рабочих мест... Разумеется, реально управлять войсками в такой ситуации человек... не сможет».¹⁰

Речь идет о том, что при оптимизации процесса управления войсками необходимо в первую очередь автоматизировать технологическую функцию самого главнокомандующего как основного субъекта управления в рамках рассматриваемой системы и как основного средства управления этой системой в рамках надсистемы (в рамках Вооружённых сил Российской Федерации). Только в этом случае, в силу закона зависимости содержания и структуры технологического средства от выполняемой им технологической функции (в рассматриваемом случае АСУ ЦКП – автоматизированной системы управления Центральным командным пунктом), на рабочем месте главнокомандующего будет действительно находиться всего лишь одно оконечное (выходное) устройство, позволяющее ему эффективно и в полном объеме управлять войсками. В кибернетике это положение соответствует одному из ее основных постулатов, согласно которому *автоматизация управления будет успешной только в том случае, когда ею непосредственно занимается лицо, в интересах которого создается АСУ и кто будет сам работать на средствах этой системы.*

Подобные комментарии можно продолжить, однако все они затрагивают только лишь некоторые принципы технологического подхода и не в состоянии заменить целостную теорию технологического движения информации в рамках РЛ системы. Очевидно, что задача построения такой теории все еще ждет своего решения. Так, рассмотрим возможную структуру технологического дисциплинарного комплекса, который может сформироваться или на который можно будет ориентироваться в процессе построения упомянутой теории. Разработкой такого дисциплинарного комплекса занимается отрасль прикладного науковедения, называемая *техноведением*.

Теоретический проблемный блок техноведения объединяет дисциплинарный комплекс технико-технологических наук, объектом которого

¹⁰ Литошенко А. АСУ: выбор вектора развития // ВКО [эл. ресурс] <http://vko.ru/DesktopModules/Articles/ArticlesView.aspx?tabID=320&ItemID=158&mid=2892&wversion=Stagin>.

является: а) диалектика техники как определенной формы материи, конструктивно организованной в технологическое средство в соответствии с технологической функцией и б) диалектика технологии как некоторого реального процесса, как специфической формы движения материи. Относительно характера протекающих в этом дисциплинарном комплексе процессов и специфики взаимосвязи технических и технологических наук здесь еще далеко не все ясно. Что касается структуры технологических наук, то сложившийся здесь дисциплинарный комплекс принято подразделять на два уровня: теоретическая технология и инженерно-технологические дисциплины. *Теоретическая технология*, в свою очередь, включает технологические науки широкого спектра: **теоретические** (фундаментальные, частные, специальные) и эмпирические (результат прикладных теоретических исследований). *Инженерно-технологические науки* также подразделяются на два уровня: инженерно-технологическая **методология** и инженерно-технологическое **проектирование**. Объединяется отмеченный комплекс объектом исследования (технология), взаимосвязью соответствующих форм деятельности (технологическая деятельность) и, следовательно, идеальной общностью их конечных продуктов. Расчленяется этот дисциплинарный комплекс качественно различным уровнем предмета исследования, выраженным в целях, средствах и результатах.

Теоретическая технология, как это было показано выше, занимается изучением и описанием своих технологических объектов в виде абстрактных теоретических моделей, то есть производством знаний, выполняя традиционно познавательную функцию, направленную на саморазвитие науки и движение к сущности технологии и ее законам. Ее предмет – процессы технологического взаимодействия. Цель – изучить и описать закономерности взаимодействия технологического средства и предмета технологического преобразования, установить параметры и условия протекания технологических процессов на пути движения предмета технологического преобразования к ожидаемому технологическому продукту. Ее результат – теория технологии как системная форма организации соответствующего знания, адекватно отражающего сущность технико-технологического феномена средствами собственного научного языка. Теоретическая технология является теоретическим базисом для инженерно-технологических наук.

Инженерно-технологические науки носят четко выраженную практическую направленность, а их знания – методологический и конструктивный характер. В качестве их основного предмета, ядра анализа выделяются теоретико-технологические, общенаучные и инженерно-методические знания. Опираясь на эти знания как исходные принципы и организующие начала, инженерно-технологические науки решают важнейший комплекс прикладных задач. На уровне инженерно-технологической методологии

этот комплекс задач связан с разработкой технологических способов и методов преобразования предмета в необходимый продукт, структурно-функциональных основ инженерного анализа и синтеза технологических цепей, с разработкой теории, формул, способов, методов, методик и приемов расчета, проектирования, организации и управления технологическими процессами. Целью инженерно-технологического проектирования является создание технологического процесса необходимого качества и в заданных количественных параметрах. Его продукт – это проект, включающий в свое содержание: а) модель создаваемого технологического процесса, которая, как и в теоретической технологии, хотя и носит семиотический (знаковый) характер, но выражена в специфическом языке чертежа, структурно-логических или функциональных схем, графиков и др. Модель описывает структурно-функциональный образ объекта, его компоненты, их взаимосвязь и взаимодействие; б) предписания для реализации модели, обеспечения ее функционирования и развития.

Таким образом, **технологические науки** стремятся к постижению существенных связей между всеми звеньями технологического процесса, который можно выразить технологической триадой «субъект деятельности → технологическое (техническое) средство → предмет технологического изменения (преобразования, взаимодействия)». Соответственно инженеры-технологи, инженеры-организаторы производства, инженеры-экономисты заняты созданием, модернизацией, совершенствованием *технологических процессов РЛ систем и всей сопутствующей этим процессам инфраструктуры*. Они в своей деятельности используют в прикладных значениях теоретические достижения естественных, гуманитарных и социальных наук.

Как будет показано далее на примере радиолокации, **технические науки** имеют не менее сложную внутреннюю структуру. В них, как и в технологических науках, имеется техническая теория, методология инженерной деятельности и методики инженерного проектирования. Отличие состоит в том, что деятельность технических наук направлена *на создание новой и совершенствование, модернизацию существующей техники как среднего звена представленной выше технологической триады*. Соответственно этому и основная масса инженеров (инженеры-конструкторы, инженеры-проектировщики, инженеры-исследователи, инженеры по технической эксплуатации) заняты разработкой, проектированием, конструированием, производством и эксплуатацией технических устройств и систем техники, используя для решения этих задач преимущественно теоретические знания в области технических и естественно-математических наук.

Мы завершили характеристику технологической специфики концептуального ядра междисциплинарной теории РЛ систем. Понятно, что это

только лишь некоторые теоретические основы, которые пока не в состоянии заменить целостную теорию технологического движения информации в рамках РЛ системы. В то же время деятельность, охватывающая рассмотренную технологическую триаду, сама по себе является некоторой целенаправленной нормативной подсистемой РЛ системы и в этом своем качестве может изучаться не только как объект технологического, но и системного анализа. Сама же системная концепция, с учетом специфики исследуемой проблемы, составляет важный компонент целостной теории РЛ систем. Рассмотрим основные положения системной теории более подробно.

1.1.2. Системотехнический компонент теории радиолокационных систем

Как известно, онтологической основой формирования системного представления о мире является тот очевидный факт, что живая и неживая природа разделена на слои (стратифицирована) с различной степенью организованности. Высшие, более макроскопические слои являются основными и поэтому «возвышаются» над низшими микроскопическими слоями. Если организационная структура слоя такова, что он как целое обладает качественно новыми характеристиками, которых нет в нижних слоях, то такой слой принято определять как систему. Таким образом, *система – это нечто большее, чем просто сумма ее составляющих, потому что она обладает качествами, которые не являются признаками частей, а только системы как целого*. Изучение фрагментов реальности с точки зрения структуры и, следовательно, с точки зрения их некоторых общих свойств, таких как отношение между целым и частями, виды внутренних взаимодействий, степень сложности того или иного фрагмента и др., позволяет рассматривать природные и общественные феномены с единой теоретической и методологической позиции, получившей название системного подхода, а в терминологии Томаса Куна – системной парадигмы.

Современный системный подход к исследованию объектов и процессов реальности представляет собой диалектическое единство системологии как теории и системотехники как метода. Теоретической основой этого подхода является теория всеобщей организационной науки (тектология), разработанная в 1913–1928 гг. отечественным ученым А.А. Богдановым. В этой работе автор уделил большое внимание проблеме системной целостности общества и его отдельных подсистем различного рода. Он предвидел, что «"коллективистское" общество представляет собой высокодифференцированную систему, между частями и разными сторонами которого

должны возникать и возникают все новые и новые расхождения». По мнению основателя общей теории систем А.А. Богданова, дифференциация, богатство внутренних связей системы выражают уровень ее развития. Одновременно целостность системы требует гармонизации, что обеспечивается развитием соответствующих связей («дополнительных соотношений») между расходящимися частями. Возрастание различий между элементами системы ведет к все более устойчивым структурным соотношениям внутри нее. При этом «системное расхождение включает в себе тенденцию развития, направленную к дополнительным связям».

Вместе с тем системное расхождение включает в себе и другую тенденцию, развивающую определенные условия неустойчивости – обострение системных противоречий. Противоречия эти на известном уровне их развития способны перевешивать значение дополнительных связей. Поэтому любая система путем дифференциации элементов развивается прогрессивно до известного предела, когда части целого становятся слишком различными в своей организации. На этой стадии дезорганизующий момент – следствие накопившихся системных противоречий – превышает силу дополнительных связей между частями и ведет к их разрыву, к общему крушению организационной формы целого. Как подчеркивал А.А. Богданов, «результатом должно явиться или преобразование структуры, или простой распад»¹¹.

Последователи А.А. Богданова (Л. Берталанфи, Ст. Бир, Н. Винер, А. Рапопорт, П.К. Анохин, В.Н. Садовский, Э.Г. Юдин и др.) развили высказанные им системные идеи и гипотезы в рамках нескольких «системных направлений»: системный подход, системные исследования, системный анализ, общая теория систем, системология, системотехника и т. д., которые П.К. Анохин в свое время удачно назвал обобщенным термином «системное движение».

В настоящее время системный подход является важнейшим практико-ориентированным методологическим средством анализа и синтеза сложных объектов различной физической природы и различного назначения, находящихся в относительно устойчивом состоянии. Его теоретико-методологической основой является общая теория систем (ОТС), в современном виде сформулированная Л. фон Берталанфи и А. Рапопортом¹². Данная теория начинается с определения системы как комплекса взаимодействующих компонентов, формирующих организованное целое. В ней не существует принципиального различия между физическими (неоргани-

¹¹ Богданов А.А. Тектология (Всеобщая организационная наука): в 2-х кн. Кн. 1 / отв. ред. Л.И. Абалкин. М.: Экономика, 1989. С. 32–33.

¹² Берталанфи Л. Общая теория систем – критический обзор // Исследования по общей теории систем / ред. В.Н. Садовский, Э. Г. Юдин. М., 1969.

ческими), биологическими (органическими) и поведенческими (социальными) системами. Тем не менее, внутренняя динамика и способ взаимодействия с окружающей средой (то есть тип организованности) позволяют провести разграничительную линию между этими классами систем.

Основной подход, следуя которому можно выявить и классифицировать системные признаки в ОТС, состоит в следующем. В процессе взаимодействия с изменяющимся окружающим миром открытые системы, взаимодействуя с внешней средой, стремятся сохранить совокупность собственных системных признаков (свою «индивидуальность»¹³) и механизм сохранения устойчивости самой системы (механизм динамической адаптации системы внутри изменяющегося окружения). Так как обмен материей (или системными элементами) происходит между открытой системой и окружающим ее миром, элементы такой системы в своем исходном виде не могут быть сохранены; тем не менее, отношения между элементами и системной структурой сохраняются. Это простейший способ сохранения «индивидуальности». Более высокий способ связан со способностью организации системы к воспроизведению структур, если эти структуры вызваны внешними факторами. Наконец, еще более высокий способ сохранения «индивидуальности» системы заключается в воспроизведении ее внутренней организации посредством самоорганизации и самовоспроизводства.

Что касается механизма сохранения устойчивости системы, здесь ОТС выделяет две альтернативы. В простых случаях «постоянства среди изменений» сохраненные или близкие к ним свойства системы стабильны или стационарны. Отклонения от нормального состояния ведут к цепочке событий, которые восстанавливают начальное нормальное состояние за счет петли обратной связи. Альтернативный же механизм восстановления стационарного состояния реализуется в виде динамической процедуры, которая не является обратной связью в обычном ее понимании, а наоборот, реализуется через свободное динамическое взаимодействие внутри многокомпонентной системы, которое ведет к «слепой» (неуправляемой) саморегуляции системы.

Для сложных систем высокого уровня (например, человека) сохранение индивидуальности означает «поддержание автономии и целостности личности». Взаимодействие и обмен этой открытой системы с окружающим ее миром происходит в процессе коммуникаций и обмена информацией (знаниями), чувствами и эмоциями. Отбор в процессе этого обмена приводит к созданию некоторой иерархии правил принятия, отказа или ис-

¹³ Первоначально термин был введен применительно к живым (биологическим) системам. Для случая его распространения на системы другой природы он взят в кавычки.

ключения любого вида информации, которая угрожает столкновением с ранее сформированными идеологическими, политическими или религиозными идеями. Очевидно, что форма этого процесса обмена относится в большей степени к форме структуры личности. Подобные процессы характерны и для общества как некоторой совокупности индивидов, все противоречивое многообразие индивидуальных качеств которых составляют равнодействующую в виде так называемой идентификационной матрицы общественного сознания.

Поскольку система представляет собой организованное целое, постольку неизбежно встает проблема ее границ, проблема выделения системы из окружающей ее среды. Однако во многих случаях эта проблема решается достаточно просто, потому что можно четко выделить, с одной стороны, активно взаимодействующие системные компоненты с циклически связанной динамикой, а с другой – слабую неопределенную взаимосвязь между системными компонентами и внешним окружением системы. Такое выделение системы из ее окружения хотя и не является абсолютным, так как системы и их окружение могут всегда определяться как подсистемы в интегральной иерархической структуре более высокого уровня, оно, тем не менее, ведет к классификации сил и способов взаимодействия между системой и компонентами внешнего окружения.

В наиболее общих случаях открытых систем, окруженных внешним миром, системы не обязательно точно сохраняют свою «индивидуальность» под воздействием изменяющихся внешних условий, но они реагируют на эти изменения методом структурно-консервативной динамической адаптации, при котором внутренние отношения между системными элементами могут непрерывно изменяться без утери их главных качеств и так долго, как долго будет сохраняться (в определенных пределах интенсивности) воздействие внешнего окружения. Если же изменения внешнего окружения превысят определенный предел, система может стать нестабильной и начать движение к другой фазе или форме внутренних отношений. Стабильность сменяется нестабильностью и возможным переходом системы в новое качественное состояние, называемым фазовым переходом. С возникновением ситуации нестабильности ОТС утрачивает свою объяснительную и прогностическую силу относительно сущности и форм существования неустойчивых систем, уступая место новой отрасли системно-научного знания – синергетике.

При определении классификационных признаков систем различной природы и назначения обычно исходят из диалектики их структуры и функций. Структура *физических систем*, как правило, может быть установлена детально аналитическими средствами, описывающими законы природы на микроуровне. По специфике функций, выполняемых этими

структурами, принято выделять два вида таких систем: а) системы без целенаправленно спроектированных функциональных структур и б) системы, целенаправленно спроектированные человеком и наделенные им специфическими структурами. В первом случае речь идет о *системах неживой природы*. Если такие системы имеют некое постоянство, проявляющее динамическую стабильность и/или адаптацию к окружающей среде, которую можно интерпретировать как целостность, тогда эта целостность является возникшим системным свойством. Во втором случае речь идет о *технических системах*, в которых цели «не заканчиваются в самих структурах», а возникают от намерений в сознании идеологов, методологов, инженеров-конструкторов и конечных пользователей. Если в таких технических системах имеется специфическое качество адаптационного приспособления, они относятся к подклассу кибернетических систем.

В *биологических системах* взаимодействие структур происходит таким образом, «как будто оно сконструировано и направлено рациональным замыслом» в соответствии с выполнением каких-то полезных для системы намерений. Тем не менее, функциональная направленность («рациоморфность») структур в такого рода системах (биологических организмах) объясняется продолжительным воздействием механизмов эволюции.

Функции, выполняемые структурами в *социальных системах*, уже не являются «рациоморфным» результатом эволюции, а являются результатом намеренно и осознанно действующих разумных и рациональных субъектов, которые предвидят в своем сознании, какая из структур может наиболее эффективно выполнять необходимые для достижения данной цели виды деятельности. Завершенный набор осознанно сформулированных целей, намерений и достижений общества устанавливает смысловую и культурную тождественность в понимании членов этого общества как некоторой социальной целостности.

В социальных системах, опосредствованных некоторой подсистемой техники (так называемые *эрготические*, или человеко-машинные системы), разумность и рационализм субъектов деятельности в виде знания и последовательного применения законов социальной формы движения материи дополнительно предполагают знание и применение всеобщих законов технологического движения вещества, энергии и информации, объединяющих в единое целое и субъективный, и объективный компоненты такой системы.

Таким образом, сравнив физические, биологические и социальные системы, можно проследить определенную преемственность от «слепого» возникновения целостных свойств путем воздействий законов природы в физике или направленных эффектов в технике, через «рациоморфное поведение» функциональных структур в биологии, к знаковым структурам,

привнесенным человеком через целенаправленную и опосредствованную техникой деятельность в свою социально-культурную систему.

Одним из основных преимуществ ОТС является отражение в ней того достаточно важного обстоятельства, что *существуют структурные и динамические сходства (а не только случайные и поверхностные аналогии) между существенно различными физическими, биологическими и социальными системами.*

Однако даже самые передовые и абстрактные научные теории должны быть детерминированы практикой. Поэтому осознание и вербальное описание сравниваемых структур и динамики в различных системах необходимо дополнить операционализмом (разработкой и исследованием). В этой связи ОТС начинает члениться на ряд частных научных концепций и постепенно трансформироваться в метод системного исследования, предусматривающий введение некоторого формализованного алгоритма, ведущего к точной формулировке структурной сопоставимости различных систем.

Завершающим шагом в системно-теоретическом исследовании является объяснение имеющихся (возникших) системных признаков. Об объяснительном уровне развития теории можно говорить в том случае, если между этой теорией и разработанным на ее основе методом познания и преобразования действительности имеются следующие устойчивые взаимосвязи:

1. Существует строгая процедура верификации (в терминологии К. Поппера – фальсификации) с точными (если возможно количественными) критериями, способными разграничить истинные и ложные теоретические утверждения об исследуемой системе, поскольку ценность теории высока только в том случае, если она доказана как правильная по отношению к множеству независимых критериев и если как можно больше альтернативных теорий могут быть отвергнутыми на основании этих же критериев как ложные.

2. Истинное содержание теории состоит из изоморфизма (эмпирически проверенного критическими экспериментами) между какими-то слоями реально существующей системы и концептуальными положениями структуры этой теории. Причем внутренняя концептуальная структура теории является закономерным следствием логической и/или математической дедукции. В этом случае логически установленная интерполяция между теоретическими концепциями (через проверенный изоморфизм) соответствует структурным и динамическим внутри реальной системы.

В целом системный подход опирается на философскую методологию, общетеоретическое и конкретно-теоретическое научное знание о системах с последующей их дифференциацией по общетехническим и кон-

кретно-техническим моделям и разработкам (рис. 1.3)¹⁴. В иерархии представленных на рисунке теорий системный подход к проблемам становления и развития РЛ систем входит в класс эмпирических системных теорий и разработок.

Практическое применение системного подхода сводится к тому, что каждый элемент, звено, компонент, функционирование которого оптимизируется, рассматривается как неотъемлемая часть другой, более сложной системы, в рамках которой пытаются выяснить, с одной стороны, каким образом функционирование данного элемента (звена, компонента) влияет на состояние и функционирование всей системы, а с другой – каким образом функционирование последней влияет на состояние и функционирование этого элемента (звена, компонента).

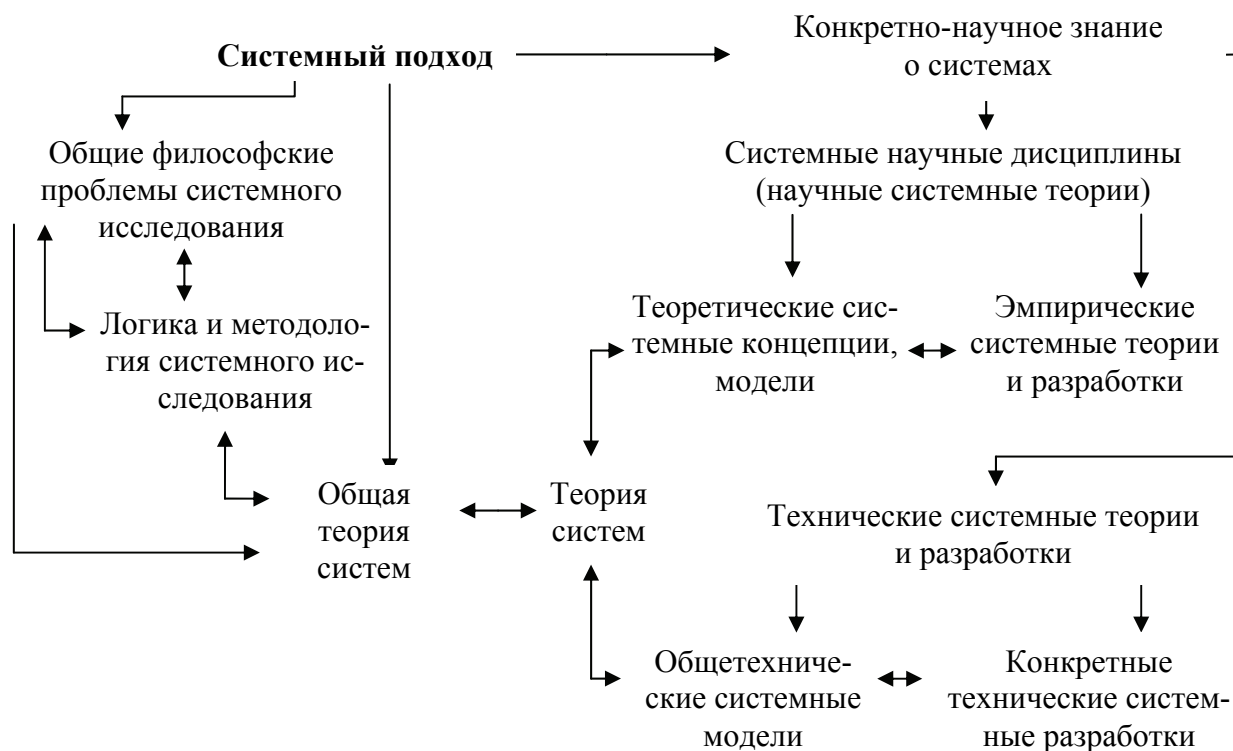


Рис. 1.3. Обобщенная структура системного подхода

¹⁴ В основу схемы положена классификация системных исследований, разработанная В.Н. Садовским. В представлении методолога «основными сферами системных исследований являются системный подход и конкретно-научное знание о системах. При этом системный подход выражает процессуальный, методологический, рефлексивный аспект системных исследований, а конкретно-научное знание о системах включает в себя всю практику системных исследований» (см.: Садовский В.Н. Основания общей теории систем: логико-методологический анализ. М. : Наука, 1974. С. 27).

Специфика системного подхода к изучению средств радиолокации и функциональной структуры РЛ системы в целом определяется тем, что он ориентирует исследователя на обнаружение всего *многообразия типов связей и отношений*, имеющих место как внутри этого сложного военнотехнического и социального объекта, так и в его взаимоотношениях с другими объектами. В результате оптимизационная задача предстает перед ним как задача *многих переменных*, а упрощенное представление о РЛ системе как некотором простом наборе исходных элементов заменяется пониманием ее как *целостного образования*, свойства которого не сводятся и не выводятся из свойств его элементов.

У исследователя, таким образом, появляется возможность, с одной стороны, рассматривать отдельные стороны (свойства) объекта лишь в их *соотнесении с объектом как целым*, а с другой – вскрывать основные законы *поведения* (функционирования и развития) таких целостных объектов. При последующей детализации этих задач он уже в состоянии вскрыть: а) *организацию* рассматриваемых объектов и их иерархическое строение, б) соотношение *внешней и внутренней детерминированности*, в) процессы *передачи информации* и варианты *целенаправленного поведения*, г) условия *стабильности* (постоянства) исследуемых объектов при непрерывном изменении многих их компонентов, д) механизмы *конкуренции и рефлексивного управления*, е) *способы синтеза* в едином знании разных описаний одного объекта, ж) свести все эти многообразные и противоречивые представления о РЛ системе в *единую теоретическую картину*, з) выявить на этой основе возникновение уникального и даже загадочного свойства целостности *сверх суммарного (системного) эффекта, когда результат функционирования некоторой целостности оказывается не только больше суммы эффектов составляющих, входящих в эту целостность, но и качественно иным*.

В то же время системно-научная проблематика все еще находится в стадии становления. Многие ее фундаментальные положения и вытекающие из них принципы в различных научных школах интерпретируются по-разному, носят неоднозначный и даже противоречивый характер. Эта проблематика до сих пор не получила конкретного завершения в виде определенного комплекса научных положений и методов – в основном все спорно, все уточняется, все движется и изменяется. Именно в этом смысле примененный А.П. Анохиным термин «системное движение» оказался наиболее удачным. Достаточно сказать, что само определение понятия «система», которых насчитывается несколько десятков, до сих пор вызывает научные споры и дискуссии.

Вот как эту проблему (вполне справедливо) характеризует В.А. Карташов: «...Основоположники общей теории систем отразили главную тен-

денцию развития науки конца 40-х начала 50-х годов: *необходимость целостного представления внешнего мира* в процессе познания, исследования именно взаимосвязанных совокупностей материальных образований, их организации и поведения... что само по себе было прогрессивным и отражало объективные научные потребности. Но, правильно указав основные направления, они не дали исчерпывающей, основополагающей характеристики той целостности, которая должна была стать предметом новой методологии в исследовательской практике. И не смотря на то, что новая методология... сразу же привлекла внимание широкой научной общественности, вместе с тем... надолго были закрыты глаза на необходимость исчерпывающего представления узловых категорий новой формы научного мышления... В методологии системного движения уже достаточно давно определился круг проблем (проблемы целостности, соотношения системы и структуры, системы и подсистемы, системы и среды, проблемы проведения удовлетворительных границ системы и ряд других). Однако проблема происхождения понятия системы явно выпадает из ряда перечисленных, поскольку никогда не только не была решена, но и не ставилась как актуальная, как достойная самостоятельного решения». И далее: суть сложившегося здесь противоречия «сводится к установлению «первичности» основания теории: либо строится адекватная теория и из нее выводится представление о «центральном» понятии (системе), коль скоро прямое эмпирическое его установление затруднительно в рассматриваемый период времени, либо, напротив, прилагаются определенные усилия к установлению этого центрального понятия, установлению его места среди других объектов мира, а затем уже следует определение общих принципов его бытия, его существования, его взаимоотношений с другими объектами..., то есть создание теории... Но если мы говорим о недостаточной неопределенности самой системы, то можно ли говорить об определенности подхода, основанного на ней?»¹⁵

Ниже, при определении понятия системы, мы еще вернемся к исследованиям В.А. Карташова. В целом же заметим, что до настоящего времени в рамках системного подхода все еще сосуществует множество эмпирических и частных теоретических схем, общих и частных методик, исследовательских схем, полуинтуитивных рецептов, различающихся общим уровнем методологического обоснования, глубиной теоретической проработки, предметом исследования, характером решаемых научных и практических задач, уровнем методологической культуры того или иного исследователя и его личными предпочтениями. Поэтому в системной проблема-

¹⁵ Карташов В.А. Система систем. Очерки общей теории и методологии. М. : Прогресс-Академия, 1995. С. 19–20; 23–25.

тике пока сложно выделить некоторое теоретическое ядро, как это имело место в случае с технологическим компонентом теории РЛ систем, и приходится ограничиваться набором частных представлений о системной специфике инженерно-технической и инженерно-технологической деятельности, высшей теоретической формой отражения которых является *системотехника*.

Сложившаяся гносеологическая ситуация усложняется возникновением новой отрасли научного знания о самоорганизации сложных структур, получившей название «синергетика». В силу того, что гомеостатические процессы рассматриваются ею как частный случай эволюционирования сложных систем, она в упомянутом выше системном движении сразу стала претендовать на статус междисциплинарной методологии. Между тем и эта отрасль научного знания только лишь проходит стадию концептуализации, пребывает, выражаясь терминами Т. Куна, на допарадигмальном уровне развития. Здесь, как и в самой системной методологии, пока преобладают эмпирические схемы и частные методики. Круг задач, который удастся удовлетворительно описать строгим аналитическим языком, пока существенно ограничен. Не ясен и методологический статус синергетики. У последовательных сторонников синергетической парадигмы ее междисциплинарный статус не вызывает сомнений. Более же осторожные участники системного движения воспринимают синергетику пока лишь как один из компонентов междисциплинарной методологии.

Не в полной мере ясны и перспективы взаимоотношения синергетики с всеобщей (философской) методологией. Сторонники диалектического материализма считают синергетику математической основой диалектической логики, а представители диаметрально противоположной философской концепции – методологической основой постмодернизма и постструктурализма¹⁶, не без основания названных главным редактором журнала «Философия и жизнь» И.А. Гобозовым постмодернистским трепом¹⁷.

Этими обстоятельствами предопределяется наш дальнейший подход к выявлению системотехнического компонента теории РЛ систем как разновидности сложных информационных системы широкого назначения. Вначале будут приведены уровни концептуализации системотехники как высшей ступени рационального обобщения в технике, затем – основные понятия из общей теории систем, а в заключении – принципы и методы системотехники. В дальнейшем, на основании этих общетеоретических и методологических положений системного подхода, будет предпринята

¹⁶ Баксанский О.Е., Кучер Е.Н. Когнитивные науки: от познания к действию. М.: КомКнига, 2005. С.64.

¹⁷ Гобозов И.А. Куда катится философия? От поиска истины к модернистскому трепу (Философский очерк). М., 2005. 200 с.

попытка разработки: а) качественной и математической моделей некоторой абстрактной РЛ системы и ее анализа, б) концептуальных моделей радиолокационной науки и радиолокационной системотехники. Синергетика же будет рассмотрена в отдельном параграфе как один из компонентов междисциплинарной методологии.

При описании системного подхода мы не ставим перед собой в качестве самостоятельной задачу его систематического изложения, что невозможно без привлечения серьезного математического аппарата. Стремясь осветить только основные идеи этого междисциплинарного подхода и их возможные эвристические следствия в контексте проблем становления и развития теории и методологии РЛ систем, мы свое изложение строим в логике введения в научную дисциплину, исходя из того, что читатель уже что-то слышал о большинстве излагаемых положений и некоторым образом знаком с системной терминологией.

Итак, системотехника представляет собой особую деятельность по созданию сложных технико-технических систем с опорой не только на естественно-научное и техническое, но и гуманитарное образование инженеров, то есть ориентируется на системную картину мира. В этом смысле она является прежде всего современным видом инженерной технической деятельности. В то же время системотехника включает в себя и особую научную деятельность, поскольку является не только сферой приложения научных знаний, но и средством выработки новых знаний **о технике и технологии**. Поэтому в системотехнике технико-технологическое знание проходит полный цикл функционирования – от его получения до использования в инженерной практике. Особое значение в системотехнике приобретает деятельность, направленная на организацию, научно-техническую координацию и руководство всеми видами системотехнической деятельности¹⁸: а) проектирование компонентов, конструирование, отладка, разработка новой технологии и техники; б) разработка новых отраслей научно-технологического и научно-технического знания; в) стыковка и интеграция частей проектируемой системы в единое целое. Последний компонент составляет ядро системотехники и определяет ее специфику и системный характер.

Концепция современной системотехники представлена двумя уровнями.

Первый уровень концептуализации (теоретизирования) системотехники относится к исследованию систем, удовлетворительное мате-

¹⁸ Некоторые системотехники, учитывая все многообразие современных технико-технологических задач, предлагают ввести понятие «*системная коллективность*», способное отразить ситуацию, когда в научной разработке и проектировании сложных социотехнических систем комплексно работают представители практически всех отраслей науки, начиная от философов и кончая специалистами медицины и эргономики.

матическое описание состояния которых (в первую очередь – описание степени неопределенности) существенно затруднено или невозможно. На этом уровне строго обоснованного системотехнического метода, сопоставимого по методологической силе и эвристическим возможностям с научным методом (методом науки), как и удовлетворительного рабочего аппарата построения системных моделей объекта, пока не создано. Одна из главных причин такого положения дел состоит в неполноте, в недостаточной развитости концептуальных основ самой системологии, в первую очередь, относительно выявления, описания и объяснения способа действия сложных систем в различных условиях ее взаимодействия со средой.

В этом случае содержание системотехники сводится к представлению реальных (существующих) или воображаемых (создаваемых) сложных систем упрощенными (преимущественно качественными) описаниями, то есть моделями, отражающими определенные, наиболее важные грани сущности сложной системы, и исследованию таких моделей. Формирование моделей осуществляется на основании тех данных, которые можно получить о сложной системе экспериментальными или интеллектуальными средствами. В этом случае системотехнический метод опирается на эксперимент и ориентирован на выявление закономерностей, непосредственно следующих из наблюдения и эксперимента. Поскольку эксперименты ставятся исходя из целей и задач исследования, постольку они носят явно выраженный прагматический и ситуационный характер. На основании выявленных фактов и эмпирических закономерностей создаются модели *объекта, среды и ситуации*. В дальнейшем исследователь-системотехник имеет дело с моделью, ориентированной на цели и задачи исследования. Модель заменяет исследователю строгую теорию объекта и становится источником (генератором) гипотез, идей, тех или иных выводов, домыслов или догадок.

Понятно, что применительно к конкретным научным разработкам и прикладным инженерным задачам этот подход все еще носит полуинтуитивный, частнометодический, рецептурный характер. В процессе его применения не следует ожидать появления логически строгих понятий, эффективных математических моделей, безукоризненно обоснованных выводов и следствий. В системном языке описания преобладают неявные определения или метафоры; в моделировании – методы качественного описания объекта; в заключениях и выводах – решения, принятые преимущественно на основе эмпирических фактов, эмпирических закономерностей, а в ряде случаев – на основе интуиции и/или здравого смысла. В этом состоит одна из основных проблем успешного применения системного подхода к разработке адекватной теории РЛ систем. Как писал в свое время Ф. Энгельс, «здравый человеческий рассудок, весьма почтенный спутник в четырех стенах своего домашнего обихода, переживает

самые удивительные приключения, лишь только он отважится выйти на широкий простор исследования»¹⁹.

Второй уровень концептуализации системотехники относится к исследованию систем, состояние которых (включая все виды информационной или априорной неопределенности) удастся удовлетворительно описать строгими или приближенными математическими методами. По эвристической силе и научной доказательности результатов он приближается к методу науки. Однако существенным его недостатком является ограниченность класса системных объектов, к которым этот концептуальный уровень системотехники может быть применен. В монографии рассмотрены два примера его применения к решению актуальных проблем РЛ систем и радиолокационной теории. Первый пример применения приводится в настоящей главе при разработке энтропийной и математической моделей РЛ системы, второй – в заключительных главах при обосновании концепции *радиолокационной системотехники*.

Таким образом, междисциплинарный характер теории РЛ систем предполагает **системный теоретический гомеостаз**, то есть оперирование всем имеющимся в распоряжении исследователя научным знанием одновременно.

1.2. Системный подход и проблемы междисциплинарной методологии

В современном науковедении сложилось двоякое понимание научной методологии. В представлениях одних ученых методология выступает как теория метода, в представлениях других – как некоторая совокупность методов и методик исследования и деятельности. При этом в конкретных исследованиях и даже в теоретических работах специфика применяемой методологии авторами обычно не оговаривается и проблема выявления ответа на этот непростой вопрос остается за читателем.

В то же время фактически устоявшимся считается представление об уровнях методологии, в которых принято выделять всеобщую (философскую), общенаучную (междисциплинарную) и частнонаучную (дисциплинарную) методологии. К настоящему времени понимание методологии как теории метода характерно для научной философии. Именно так соотносятся, например, диалектическая логика и диалектический метод. Что касается общенаучной и частнонаучной методологии, то они рассматриваются

¹⁹ Маркс К., Энгельс Ф. Соч. 2-е изд. Т.19. С. 204.

преимущественно как совокупность методов, отличающихся уровнем проработки и степенью общности решаемых задач. Такое положение дел связано с отсутствием более или менее строгого описания (научной рефлексии) этих видов методологии, вследствие чего каждая из них и оказывается представленной некоторой совокупностью методов.

Проблема выявления методологических оснований РЛ систем, как и в случае выявления их теоретических оснований, не лишена противоречия, неочевидного до тех пор, пока эти два вида методологии (дисциплинарная, или «вертикальная», и междисциплинарная, или «горизонтальная») функционируют, развиваются и применяются раздельно. Однако такая форма их сосуществования носит идеализированный характер. Реальная РЛ система, как уже отмечалось, перед своим идеологом, конструктором или исследователем предстает в виде диалектического единства радиолокационного содержания и системной формы, в рамках которого отделить дисциплинарную методологию от междисциплинарной (и наоборот) не представляется возможным. Здесь и возникает противоречие, которое при разработке или исследовании технических систем носит принципиальный характер.

Дисциплинарная (радиолокационная) методология решает конкретную задачу разработки радиолокационной теории и ее трансформации в научно обоснованные методы и принципы синтеза и построения радиолокационных устройств и РЛС. Эти методы и принципы носят научно обоснованный характер, имеют высокий уровень формализации и обеспечивают оптимальные или близкие к оптимальным научные результаты. Само же движение методологии идет от хорошо определенной дисциплинарной задачи к выявлению адекватного метода ее решения. В том же случае, когда в рамках теории необходимый для инженерной практики метод вывести не удастся, имеется возможность привлечь подобный метод из родственных отраслей знания, поскольку строгость дисциплинарного подхода позволяет провести согласование этого метода с имеющимся теоретическим базисом и обоснованно его отвергнуть в случае несостоятельности.

Междисциплинарная (системная) методология представляет собой результат попыток современного научного познания взглянуть с единой точки зрения на многие объекты, явления, изучаемые в различных научных дисциплинах. Ее основным результатом является синтетический метод познания целостных объектов, воспроизводящий главные, определяющие свойства целостности посредством выявления структурных закономерностей при абстрагировании от предметного содержания. Это принципиально иной, ассоциативно-сетевой способ структурирования реальности, основанный не на строгих понятиях и категориях соответствующей научной дисциплины (радиолокации), а на метафорическом переносе смыслов, на полиморфизме

(неоднозначности) языков и методе аналогии. Здесь, как правило, отсутствует привычно очерченная, предметная постановка задачи. Все выглядит таким образом, как если бы метод сам «искал» свою задачу. Как пишут в этой связи В.И. Аршинов и В.Г. Буданов, для дисциплинарного мышления «междисциплинарная методология не просто маргинальна, но и зачастую противоречит цеховой этике, отвлекая внимание от насущных задач дисциплины, так как решает «случайные» задачи, из которых большинство либо еще не интересны, либо никогда не возникнут. Часто это вызывает реакцию отторжения со стороны дисциплинарно организованного мышления с его «естественной установкой» на когнитивный реализм»²⁰.

Первоначальное знакомство с системной методологией, которая в сокращенном варианте будет изложена ниже, наводит именно на такие размышления. Методологическое чудо, появление которого ожидалось с началом разработки общей теории систем и системного подхода, пока не наступило. Более того, по мере разработки системной методологии выяснилось, что круг задач, решение которых по строгости может быть сопоставимым с результатами применения дисциплинарной методологии, является здесь весьма ограниченным. Одновременно решение подавляющего большинства задач все еще базируется на интуиции, догадках и частных рецептах.

Тем не менее, согласовывать эти два методологических подхода все-таки приходится, поскольку многократно упоминавшийся двойственный характер РЛ системы (радиолокационное содержание и системная форма) ни куда не делся. Кроме того, основная цель междисциплинарной методологии состоит не в том, чтобы внедриться, потеснив дисциплинарную иерархию методов, но в том, чтобы дополнить ее, улучшив коммуникацию и сотрудничество между ними по поводу эффективного применения предлагаемой методологии и соответствующего междисциплинарного языка. Здесь снимается противоречие между так называемыми синтетиками и аналитиками, поскольку дисциплинарная и междисциплинарная методологии оказываются в отношении дополнительности друг к другу, в диалектическом единстве «вертикали» и «горизонтالي», тем более что синтетики и аналитики часто сочетаются в одном лице.

Рассматривая теорию и методологию РЛ систем, следует иметь в виду, что их двойственный характер справедлив только лишь для предельного уровня абстракции. При последующей детализации (декомпозиции) любой РЛ системы выявляется иерархия различных уровней ее сложности. Так, с точки зрения теории деятельности она может быть объектом оптимизации, в частности, объектом теории исследования операций. С точки

²⁰ Аршинов В.И., Буданов В.Г. Когнитивные основания синергетики // Синергетическая парадигма. Нелинейное мышление в науке и искусстве. М. : Прогресс-Традиция, 2002. С. 76.

зрения существующих в ней процессов управления она может быть объектом кибернетики. С точки зрения ее тактического (преимущественно информационного) предназначения она может быть объектом теории информации. С точки зрения возможности ее приспособления к стохастическим условиям внешней среды она может быть объектом теории адаптации. С точки зрения сложности и нелинейности протекающих в ней процессов она может быть объектом синергетики. Наконец, с точки зрения того, что добываемая РЛ системой информация может являться целью и средством ее противостояния с другими системами, она может выступать как объект теории конфликтов. Соответственно различный уровень сложности объекта исследования предполагает применение и различных методов.

Это значит, что междисциплинарная методология исследования РЛ системы, помимо системного метода, должна включать в себя и метод исследования операций, и метод теории управления, и метод теории конфликтов, и метод теории адаптации, и метод синергетики, и, наконец, метод теории информации.

Смысл же применения этой междисциплинарной методологии к исследованию РЛ системы РТВ, как и в случае с теоретическими основаниями, заключается **в методологическом системном гомеостазе**, то есть *в оперировании всей методологической информацией одновременно*²¹.

Рассмотрим основные компоненты междисциплинарной методологии, к которым в первую очередь отнесем принципы и методы исследования операций, системный, синергетический и информационный методы.

1.3. Обобщенная структура междисциплинарной методологии

1.3.1. Основные понятия, принципы и методы исследования операций

Одной из отраслей практико-ориентированного научного знания, предмет которой составляют задачи оптимизации сложных социальных и технических систем, является формирующаяся научная дисциплина «Ис-

²¹ Представление о том, что применение системного подхода к решению сложных структурно-организационных проблем предполагает разработку некоторой междисциплинарной методологии, становится все более очевидным. Как пишет С. Волков в упомянутой ранее статье «Путем проб и ошибок» (ВКО. 2010. №2. С. 40–53) относительно издержек реформирования ВС Российской Федерации, «...обоснование организационной структуры ВС является сложной проблемой, требующей широкого спектра методов исследований».

следование операций». Суть оптимизации состоит в принятии решений, обеспечивающих создание наилучших условий для функционирования и развития оптимизируемой системы посредством проведения различных организационных и технических мероприятий, определенного выбора вектора измеряемых и управляемых параметров, минимизации информационной неопределенности относительно параметров обстановки и т. д.

Под термином «теория исследования операций» принято понимать *некоторую систему понятий (систему научного знания), а также математических, количественных методов по обоснованию наиболее оптимальных с точки зрения определенного критерия решений во всех областях человеческой деятельности*, в т. ч. и специально-технической. *Решение* представляет собой некоторый более или менее осознанный выбор направлений, форм, методов и средств деятельности из ряда возможностей, имеющихся в распоряжении соответствующего субъекта²².

Очевидно, что чем сложнее, масштабнее, дороже и социально значимее разрабатываемые системы и процессы, тем более обоснованными и оптимальными должны быть принимаемые решения и тем важнее становятся научные методы, позволяющие заранее оценить последствия каждого решения, заранее отбросить недопустимые варианты, установить достаточность (недостаточность) материальных, информационных, финансовых и кадровых ресурсов для предстоящей проектной деятельности.

В целом исследование операций рассматривает некоторое мероприятие, преследующее определенную цель. Для этого мероприятия заданы некоторые условия, характеризующие исходную обстановку (средства, ресурсы и т. д.). В рамках этих условий требуется принять такое решение, чтобы планируемые мероприятия (разрабатываемые структуры и их последующее функционирование) были в каком-то смысле наиболее выгодными (эффективными). В соответствии с этими общими чертами вырабатываются и общие приемы решения подобных задач, в совокупности составляющие методологическую схему и аппарат исследования той или иной операции, включая выбор структуры и технологий функционирования РЛ систем.

А. Основные понятия. Однокритериальные задачи оптимизации.

Операцией в наиболее общем смысле принято называть всякое ресурсно обеспеченное мероприятие (систему деятельности или действий), объединенное единым замыслом и направленное к достижению определенной цели.

Признак целесообразности указывает на то, что операция представляет собой всегда управляемое мероприятие, то есть выбор параметров,

²² Более подробно см. : Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1980. 208 с.

средств и методов организации является прерогативой индивидуального или коллективного субъекта деятельности. Всякий определенный выбор субъекта деятельности называется *решением*, которое может быть оптимальным или неоптимальным. *Оптимальным* называют решение, по тем или иным основаниям (признакам или критериям) являющееся предпочтительнее других. В качестве *цели* исследования операции выступает предварительное количественное обоснование оптимальных решений. Обычно в распоряжении субъекта деятельности находится некоторая область решений, на первый взгляд практически равноценных и оптимальных, в пределах которой он должен сделать окончательный выбор.

Параметры, совокупность которых образует решение, называют *элементами решения*. В качестве таких элементов могут выступать числа, векторы, функции, физические параметры и т. д. Например, если составляется план поставки с одного и того же завода B_1 в аэропорты или аэродромы ГА A_i однотипных образцов РЛС, то элементами решения будут числа x_{1i} , показывающие, какое количество РЛС будет поставлено в эти компоненты РЛ системы ГА в течение определенного периода времени. Совокупность чисел $x_{11}, x_{12}, x_{13}, \dots, x_{1n}$ образует решение. Для простоты оперирования всю совокупность элементов решения обычно обозначают одной буквой x и называют «решение x ».

Помимо элементов решения, находящихся в сфере компетенции субъекта деятельности, любая задача исследования операций характеризуется *заданными* (внешними, или «дисциплинирующими») и *вариативными* (изменяющимися) условиями. Первые фиксированы с самого начала операции и в течение всего периода ее исследования остаются неизменными. К таким условиям могут быть отнесены помехозащищенность, пропускная и информационная способность, точностные параметры, вероятность правильного обнаружения и пропуска цели и др. Вторые могут изменяться. Поэтому субъект деятельности в определенных пределах вправе ими варьировать. К таким условиям можно отнести имеющиеся ресурсы (материальные, финансовые, кадровые), средства (производственные мощности заводов по выпуску новых образцов РЛС), транспорт, инфраструктуру, научно-технический задел в области разработки перспективных образцов РЛ техники и т. д. В своей совокупности эти условия формируют множество возможных решений X . При этом факт принадлежности решения x к множеству решений X записывается в виде формулы $x \in X$.

Для сравнения различных решений по оптимальности вводят *показатель эффективности* W , который выбирается из соображения целевой направленности операции. Лучшим считается решение, в максимальной степени способствующее достижению поставленной цели. Если показатель эффективности необходимо максимизировать (например, достичь макси-

мального использования возможностей РЛ системы при аэронавигационном обслуживании полетов ГА), его записывают в виде $W \rightarrow \max$, если минимизировать (например, расход ресурса РЛС) – то в виде $W \rightarrow \min$. Рассмотренный показатель эффективности часто называют *целевой функцией*.

Если выполнение операции сопровождается действием случайных факторов, в качестве показателя эффективности берется не сама величина, которую необходимо максимизировать (минимизировать), а ее математическое ожидание $M(W) = \bar{W}$. В случае двухальтернативного варианта достижения цели A некоторой операции (цель достигнута – цель не достигнута) в качестве показателя эффективности выбирается *вероятность достижения цели* $P(A)$.

Для количественных методов исследования операции разрабатывают ее *математическую модель*, которая, с одной стороны, должна отражать важнейшие черты явления, все существенные факторы, от которых в основном зависит успех операции, а с другой – носить достаточно обобщенный характер, не быть отягощенной второстепенными факторами.

Достижение цели операции связано с решением тех или иных *задач* исследования операции, которые принято разделять на *прямые* и *обратные*. Прямые задачи отвечают на вопрос: что произойдет, если в заданных условиях будет принято какое-то решение $x \in X$? В частности, чему будет равен при данном решении x выбранный показатель эффективности W ? Для решения такой задачи строится математическая модель, позволяющая выразить один или несколько показателей эффективности через заданные условия и элементы решения.

Обратные задачи отвечают на вопрос: как выбрать решение x для того, чтобы показатель эффективности W обратился в максимум? Очевидно, что прямые задачи соответствуют случаю исследования уже существующей РЛ системы. В случае же ее создания и дальнейшего развития можно выделить ряд самостоятельных прямых задач, однако в целом решение этой проблемы подчиняется логике решения обратной задачи. Например, если в качестве обобщенного показателя эффективности системы ПВО выбрать величину предотвращенного ущерба стране от действий средств воздушного нападения противника, то выбор оптимального решения для ЕАРЛС, основу которой составляет РЛ система РТВ, будет связан с тем или иным вариантом построения радиолокационного поля (в т. ч. и с использованием позиций двойного назначения), параметры которого обеспечили бы достижение сформулированного выше обобщенного показателя эффективности.

Если число возможных вариантов решения, образующих множество X , невелико, обратная оптимизационная задача может быть успешно решена их *простым перебором*, с последующим указанием на тот из вариантов решения, для которого W достигает максимума. В противном случае при-

меняется метод *направленного перебора*, при котором оптимальное решение находится рядом последовательных приближений, когда каждое последующее приближение приближает к искомому оптимальному.

В наиболее простом, ранее упоминавшемся применительно к ЕС ОрВД **детерминированном** случае, когда все условия операции известны заранее, все факторы, от которых зависит успех операции, делятся на две группы: а) заданные, заранее известные факторы (условия выполнения операции) $\vec{\alpha}$; б) зависящие от субъекта деятельности элементы решения, образующие в своей совокупности решение \vec{x} . При этом первая группа факторов одновременно содержит и ограничения, налагаемые на решение, то есть определяет область возможных решений X . В этом случае показатель эффективности запишется в виде $W = W(\vec{\alpha}, \vec{x})$, где параметры $\vec{\alpha}, \vec{x}$ являются в общем случае векторными величинами. В числе заданных условий вектора $\vec{\alpha}$ обычно присутствуют ограничения, налагаемые на элементы решения, имеющие вид равенства или неравенства.

В том случае, когда прямая задача решена (то есть вид зависимости $W = W(\vec{\alpha}, \vec{x})$ установлен), обратная задача может быть сформулирована следующим образом: *при заданном комплексе условий $\vec{\alpha}$ найти такое решение $\vec{x} = \vec{x}^*$, которое обращает показатель эффективности W в максимум*. Этот максимум обозначается как $W^* = \max_{x \in X} \{W(\vec{\alpha}, \vec{x})\}$. Полученная

формула интерпретируется следующим образом: W^* *есть максимальное значение $W(\vec{\alpha}, \vec{x})$, взятое по всем решениям, входящим в множество возможных решений X* . Это типичная математическая задача нахождения экстремума некоторой функции или функционала.

Значительно сложнее дело обстоит в случае, когда задача содержит элемент неопределенности. Реальные задачи исследования операций чаще всего содержат помимо рассмотренных двух групп еще одну – совокупность неизвестных факторов $\vec{\xi}$. В этом случае показатель эффективности W оказывается зависимым от всех трех групп факторов: $W = W(\vec{\alpha}, \vec{x}, \vec{\xi})$, а оптимизационная задача может быть поставлена следующим образом: *при заданных условиях $\vec{\alpha}$, с учетом неизвестных факторов $\vec{\xi}$, найти такое решение $x \in X$, которое, по возможности, обеспечивает максимальное значение показателя эффективности W* . Наличие неопределенных факторов $\vec{\xi}$ переводит задачу в новое качество: она превращается в задачу о выборе решения в условиях априорной неопределенности.

В теории исследования операций в наибольшей степени разработан метод оптимизации систем в условиях стохастической неопределенности, когда неизвестные факторы $\vec{\xi}$ являются статистически устойчивыми, то есть

представляют собой обычные объекты изучения теории вероятностей – случайные величины (или случайные функции), статистические характеристики которых известны или, в принципе, могут быть получены к нужному сроку. Показатель эффективности W , зависящий от этих факторов, тоже будет величиной случайной. Очевидно, что максимизировать эту случайную величину невозможно: при любом решении x она остается случайной, неконтролируемой. В этом случае возможны два подхода: а) оптимизация в среднем и б) оптимизация со стохастическими ограничениями.

При оптимизации в среднем факторы $\bar{\xi}$ «существенно случайны» и заметно влияют на показатель эффективности W , который тоже «существенно случаен». В этом случае в качестве показателя эффективности выступает математическое ожидание случайной величины $\bar{W} = M[W]$, а искомое решение x выбирается из условия обращения этого показателя в максимум:

$$\bar{W} = M [W(\bar{\alpha}, \bar{x}, \bar{\xi})] \Rightarrow \max.$$

Оптимизируя операцию «в среднем», после многих ее повторений обычно выигрывают больше, чем в случае, когда расчет отсутствует. Для повышения достоверности приема необходимо, чтобы операция обладала свойством повторяемости и «недостача» показателя эффективности в одном случае компенсировалась бы его «избытком» в другом. Очевидно, что подобный прием может быть достаточно эффективным в случае оптимизации ЕС ОрВД или подсистемы РТОП. Устойчивость расписания и регулярность полета ГА, плановый характер задач аэронавигационного обслуживания создают для этого необходимую статистическую базу. С определенными ограничениями объектами оптимизации в среднем могут быть ЕАРЛС или ЕС ОрВД. Ограничения связаны с той долей информационной неопределенности, которую вносит военный компонент этих систем, особенно в угрожаемый период и период военного времени. Наконец, такая оптимизация оказывается неэффективной относительно систем военного назначения, в частности, РЛ системы РТВ, поскольку существующая статистика современных воздушных и воздушно-космических операций весьма ограничена, а тактическая схема этих операции от удара к удару практически не повторяется.

Примером решения оптимизационной задачи в среднем применительно к конкретной технической задаче являются и рассматриваемая в заключительной главе монографии статистическая теория радиолокационной системотехники, и осуществляемый в рамках этой теории синтез

адаптивных измерителей параметров радиолокационных сигналов в условиях априорной неопределенности информативных параметров относительно параметров внешних помех и неинформативных параметров сигнала (так называемых параметров обстановки). Недостаток сведений об информативном параметре сигнала компенсируется здесь избытком информации о неинформативном параметре, в частности, об энергии ожидаемого сигнала. Избыточность такой информации обеспечивается дополнительным измерительным каналом, который в неадаптивных измерителях отсутствует. В данном случае мы имеем дело с одной из форм проявления *закона необходимого разнообразия Эшби*, согласно которому эффективное управление достаточно сложным объектом (системой) возможно лишь при достаточно сложной системе управления²³.

Применительно к отмеченной проблеме адаптивного измерения параметров радиолокационных сигналов закон необходимого разнообразия означает, что эффективное решение таких усложняющихся проблем возможно лишь за счет принципиального усложнения структуры решающего устройства. Этот закон проявляется и в том случае, когда от отдельного измерителя энергии ожидаемого сигнала отказываются, а задачу преодоления априорной неопределенности информативного параметра сигнала относительно неинформативного пытаются решить за счет расширения вектора состояния адаптивной системы. Задача успешно решается и в этом случае, однако адаптивная система оказывается еще более сложной, чем система с автономным измерителем энергии ожидаемого сигнала.

При оптимизации со стохастическими ограничениями выбирают некоторый показатель T , характеризующий эффективность W . На этот показатель накладывают ограничение t_0 и вводят некоторое условие $T \leq t_0$ ($T \geq t_0$) с вероятностью p настолько большой, чтобы событие $T \leq t_0$ ($T \geq t_0$) было практически достоверным. В этом случае условие оптимизации примет следующий вид: $P(T \leq t_0) \geq p$. Введение такого ограничения означает, что из области возможных решений X исключаются решения, ему не удовлетворяющие. Примером решения оптимизационной задачи со стохастическими ограничениями является математическая модель обобщенной РЛ системы, представленная в параграфе 2.9 второй главы.

Б. Многокритериальные задачи оптимизации.

Для крупномасштабных задач построения и исследования сложных РЛ систем наиболее типичной является *многокритериальность* – эффективность этих операций приходится оценивать несколькими количественными показателями W_1, W_2, \dots, W_n , один из которых желательно обратить

²³ Эшби У.Р. Введение в кибернетику. М. : Изд-во иностранной литературы, 1959. 432 с.

в максимум, другие – в минимум. При этом ни один из показателей не может быть выбран в качестве единственного, формулировка самой системы показателей оказывается достаточно сложной проблемой, а решение, одновременно удовлетворяющее нескольким показателям эффективности, найти не удастся.

Любое выбранное решение, обращающее в максимум один какой-то показатель, как правило, не обращает ни в максимум, ни в минимум другие. Поэтому *часто применяемый критерий «достигнуть максимального эффекта при минимальных затратах» (общеизвестный критерий эффективность/стоимость) носит в значительной степени декларативный характер и при научном анализе должен применяться с определенной осторожностью.* Это связано с тем, что он основан на неявном допущении, согласно которому недостаток в одном показателе всегда может быть скомпенсирован за счет другого, что, как правило, несправедливо.

В качестве примера приведем одну из немногих до настоящего времени попыток аналитической оценки эффективности РЛ системы РТВ ПВО (ЭФ_{РЛ}), в которой этому обобщенному параметру придано стоимостное выражение²⁴. В этой оценке ЭФ_{РЛ} представлена как превышение обеспечиваемого радиолокационной системой выигрыша В_{РЛ} над ее стоимостью СТ_{РЛ}:

$$\text{ЭФ}_{\text{РЛ}} = \text{В}_{\text{РЛ}} - \text{СТ}_{\text{РЛ}}. \quad (1.1)$$

Очевидно, что величина В_{РЛ} в первом приближении может быть определена как пропорциональная стоимости часть общего выигрыша системы ПВО (В_{ПВО}), представляющего собой ущерб, предотвращенный за счет создания системы ПВО, информационной подсистемой которой и является РЛ система РТВ. При этом

$$\text{ЭФ}_{\text{РЛ}} = \text{В}_{\text{ПВО}} \frac{\text{СТ}_{\text{РЛ}}}{\text{СТ}_{\text{ПВО}}} - \text{СТ}_{\text{РЛ}} = \text{СТ}_{\text{РЛ}} \left(\frac{\text{В}_{\text{ПВО}}}{\text{СТ}_{\text{ПВО}}} - 1 \right). \quad (1.2)$$

Относительный выигрыш В_{ПВО} / СТ_{ПВО} всегда гораздо больше единицы. Поэтому из формулы (1.2), на первый взгляд, следует, что какие-либо ограничения относительно СТ_{РЛ} отсутствуют. Учитывая объективный характер ограничения оборонных расходов в целом и на систему ПВО

²⁴ Основы построения радиолокационного вооружения РТВ / ред В.В. Литвинов. Харьков : ВИРТА ПВО, 1986. С. 17–19.

в частности, можно сформулировать вариационную задачу оптимального распределения $СТ_{ПВО}$ между родами войск: Зенитными ракетными войсками (ЗРВ), Истребительной авиацией (ИА), РТВ. Качественно ход зависимости $V_{ПВО} = f(СТ_{РЛ})$ представлен на рис. 1.4.

При отсутствии РЛ системы ($СТ_{РЛ} = 0$) эффективность ЗРВ и ИА (из-за отсутствия боевой и разведывательной информации от РТВ) незначительна. При увеличении затрат на РЛ систему улучшается качество целеуказания зенитного ракетного комплекса (ЗРК) и наведения ИА и, хотя количество огневых комплексов (за счет повышения качества РЛ обеспечения) может уменьшаться, величины выигрыша $V_{ЗРВ}$ и $V_{ИА}$ растут. Одновременно растет и общий выигрыш $V_{ПВО}$.

Оптимум выигрыша достигается при равенстве вероятных мер: а) вероятности радиолокационного обеспечения (РЛО) боевых действий ЗРВ и ИА с требуемыми показателями качества и б) заданной вероятности уничтожения воздушных целей (при наличии РЛИ от РТВ). При стоимости РЛ системы, соизмеримой со стоимостью системы ПВО (система ПВО вырождается в чисто информационную систему), эффективность последней равна нулю.

Из приведенного примера следует, что введенный здесь эмпирический (качественный) критерий «эффективность/стоимость» позволяет получить предельно общее представление о характере зависимости эффективности РЛ системы РТВ (как и системы ПВО в целом) от соответствующих материальных и финансовых затрат на их создание и поддержание в боеготовом состоянии. В то же время эти оценки, в частности, оценка характера зависимости $V_{ПВО}$ от $СТ_{РЛ}$, предполагают неявное допущение того, что при увеличении затрат на РЛ систему РТВ пропорционально растет выигрыш $V_{ЗРВ}$ и $V_{ИА}$, в то время как ЗРВ и ИА имеют собственные законы функционирования и развития, которые это допущение не учитывает.

Поэтому такой эмпирический критерий может быть применен для самой общей, достаточно приблизительной оценки эффективности РЛ или

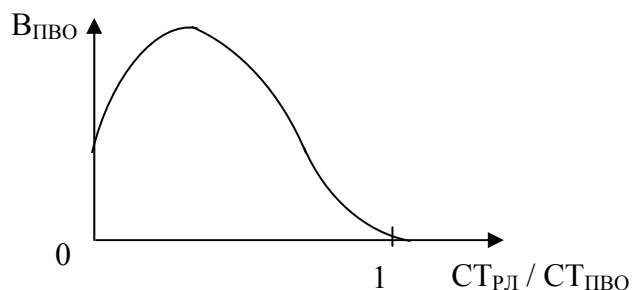


Рис. 1.4. Качественная зависимость $V_{ПВО} = f(СТ_{РЛ})$

другой системы. Получение же более достоверных оценок эффективности должно предусматривать не качественное описание ситуации в соответствии с законами здравого смысла, а разработку ее обоснованной математической модели на основе соответствующего научного анализа.

Возвращаясь к рассматриваемой многокритериальной задаче оптимизации, следует

заметить, что помимо исследуемого критерия «эффективность/стоимость» необоснованным также является и часто применяемый на практике так называемый обобщенный показатель эффективности W в виде взвешенной суммы частных показателей, в которую каждый из них W_i входит с некоторым весом α_i , отражающим его важность: $W = \alpha_1 W_1 + \alpha_2 W_2 + \dots$. При этом для тех показателей, значения которых необходимо увеличить, веса берутся положительными, уменьшить – отрицательными.

Необоснованность применения этого обобщенного показателя связана с тем, что весовые коэффициенты α_1, α_2 не являются постоянными. Они зависят как от самих величин W_1, W_2 , так и от параметров обстановки. Если же веса α_1, α_2 выбирать произвольно, что обычно и делается, то столь же произвольным будет вытекающее из них «оптимальное» решение. Такое явление в оптимизации получило название «перенос произвола из одной инстанции в другую»²⁵.

Тем не менее, применение математического аппарата к решению задач оптимизации позволяет получить ряд положительных результатов. Во-первых, он позволяет решать прямые задачи исследования операций, то есть для любого решения X находить значения показателей эффективности W_1, W_2, \dots , сколько бы их ни было. Поэтому для прямых задач многокритериальность – не помеха. И, во-вторых, что особенно важно, он помогает «выбраковывать» из множества возможных решений X заведомо неудачные, уступающие другим по всем критериям.

Рассмотрим это более подробно. Пусть имеется многокритериальная задача исследования операций с критериями W_1, W_2, \dots, W_k . Для простоты предположим, что все эти величины желательно максимизировать. Пусть в составе множества возможных решений есть два решения x_1 и x_2 , такие, что все критерии W_1, W_2, \dots, W_k для первого решения больше или равны соответствующим критериям для второго решения, причем хотя бы один из них действительно больше. Очевидно, тогда в составе множества X нет смысла сохранять решение x_2 как неконкурентоспособное, поэтому оно вытесняется («доминируется») решением x_1 . В результате процедуры последовательного отбрасывания заведомо непригодных, невыгодных решений множество X обычно существенно уменьшается: в нем сохраняются только так называ-

²⁵ Исключение могут составить частные технические задачи оптимизации, например, задача оптимизации весовой когерентной обработки пачки эхо-сигналов в цифровых доплеровских фильтрах. В такой обработке весовые коэффициенты для каждого импульса в накапливаемой пачке выбираются из противоречивого условия минимизации боковых лепестков амплитудно-фазовой характеристики соответствующего цифрового фильтра при допустимом расширении его основного лепестка. Однако эта задача носит детерминированный характер из-за ограниченности числа импульсов в пачке и возможности простой практической проверки конечного результата оптимизации.

емые *эффективные* (иначе «паретовские») решения, характерные тем, что ни для одного из них не существует доминирующего решения.

Проиллюстрируем прием выделения паретовских решений на примере задачи с двумя критериями: W_1 и W_2 (оба требуется максимизировать). Множество X состоит из конечного числа n возможных решений x_1, x_2, \dots, x_n . Каждому решению соответствуют определенные значения показателей W_1, W_2 ; будем изображать решение точкой на плоскости с координатами W_1, W_2 и занумеруем точки соответственно номеру решения (рис. 1.5). Очевидно, из всего множества X эффективными будут только решения x_2, x_5, x_{10}, x_{11} , лежащие на правой верхней границе области возможных решений (см. жирные точки, соединенные линией, на рис. 1.5). Для всякого другого решения существует хотя бы одно доминирующее, для которого либо W_1 , либо W_2 , либо оба больше, чем для данного. И только для решений, лежащих на правой верхней границе, доминирующих решений не существует.

Когда из множества возможных решений выделены эффективные, анализ может вестись уже в пределах этого «эффективного» множества. На рис. 1.5 его образуют четыре решения: x_2, x_5, x_{10} и x_{11} ; из них x_{11} – наилучшее по критерию W_1 , x_2 – по критерию W_2 . Дело должностного лица выбрать тот вариант, который для него предпочтителен (приемлем) по обоим критериям.

Аналогично строится множество эффективных решений и в случае, когда показателей не два, а больше (при числе их, большем трех, геометрическая интерпретация теряет наглядность, но суть сохраняется). Множество эффективных решений легче обозримо, чем множество X . Окончательный же выбор решения по-прежнему остается прерогативой соответствующего руководителя.

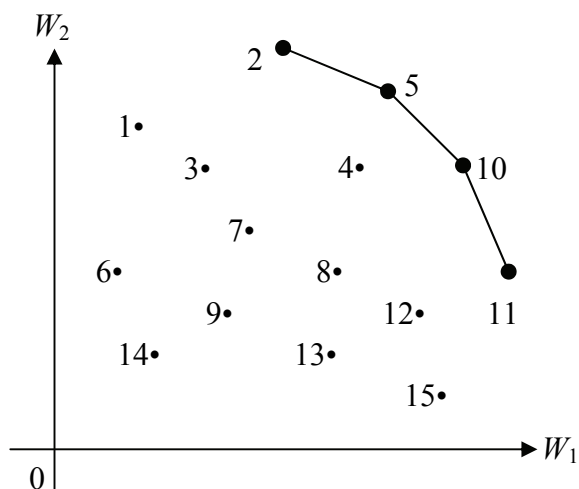


Рис. 1.5. Вариант распределения решений x_i множества X

Следует заметить, что сама процедура выбора решения, будучи повторена неоднократно, может послужить основой для выработки некоторых формальных правил, применяемых уже без участия человека. Речь идет о так называемых «эвристических» методах выбора решений, когда группа экспертов многократно выбирает компромиссное решение в многокритериальной задаче исследования операций, решаемой при разных условиях $\vec{\alpha}$. Набирая статистику по результатам выбора, можно, на-

пример, разумным образом подобрать значения «весов» $\alpha_1, \alpha_2 \dots$ в соотношении $W = \alpha_1 W_1 + \alpha_2 W_2 + \dots$ и воспользоваться таким обобщенным критерием для выбора решения на этот раз уже в автоматическом режиме, без участия человека. На это иногда приходится идти в условиях информационного конфликта, когда времени на обдумывание компромиссного решения нет.

В современных автоматизированных системах управления широко используется процедура выбора решения в так называемом «диалоговом режиме», когда машина, произведя расчеты, выдает лицу, управляющему операцией, значения показателей W_1, W_2, \dots , а это лицо, критически оценив ситуацию, вносит изменения в параметры управляющего алгоритма либо соглашается с предложенным вариантом решения.

В случае когда решение многокритериальной задачи по тем или иным причинам оказывается невозможным, применяют варианты компромиссных решений. *Первый из них* связан с сведением многокритериальной задачи к однокритериальной. Один показатель (например W_1) выделяют в качестве главного и стремятся его обратить в максимум. На все остальные критерии W_2, W_3, \dots накладывают некоторые ограничения, потребовав, чтобы они были не меньше каких-то заданных w_2, w_3, \dots . В этом случае все показатели, кроме одного – главного, переводятся в разряд заданных условий $\bar{\alpha}$. Очевидно, что такой подход может быть применен при выборе решения в соответствии с упоминавшимся ранее критерием «эффективность/стоимость», когда оптимизация структур и технологий их взаимодействия по критерию эффективности происходит при фиксированном (имеющемся в распоряжении государства) ресурсе финансовых средств. Поскольку известный произвол в назначении границ W_1, W_2, \dots здесь все же остается, постольку поправки в эти границы могут вводиться по мере необходимости.

Второй вариант связан с введением последовательных уступок от критерия к критерию. Предположим, что показатели W_1, W_2, \dots расположены в порядке убывающей важности. Сначала ищется решение, обращающее в максимум первый (важнейший) показатель $W_1 = W_1^*$. Затем назначается, исходя из практических соображений, с учетом малой точности, с которой известны входные данные, некоторая «уступка» ΔW_1 , которую субъект согласен сделать для того, чтобы максимизировать второй показатель W_2 . Далее, на показатель W_1 накладывается некоторое ограничение – от него требуется, чтобы он был не меньше, чем $W_1^* - \Delta W_1$, и при этом ограничении осуществляют поиск решения, обращающего в максимум W_2 . После этого снова назначают «уступку» в W_2 , ценой которой можно максимизировать W_3 и т. д. Очевидно, что при таком способе построения компромиссного решения сразу видно, ценой какой «уступки» в одном показателе приобретается выигрыш в другом и какова величина этого выигрыша.

Задача построения и развития ЕАРЛС, как и задача создания АНС Российской Федерации, по основным своим признакам относится к классу стохастических многокритериальных задач, для решения которой может быть вполне обоснованно применены рассмотренные выше методологические и методические средства теории исследования операций. Например, для АНС Российской Федерации к числу ее основных показателей отнесена следующая группа критериев²⁶:

- обеспечение национальной безопасности в сфере использования и контроля воздушного пространства Российской Федерации;
- безопасность воздушного движения;
- пропускная способность аэронавигационной системы;
- эффективность аэронавигационной системы;
- доступность аэронавигационной системы;
- авиационная безопасность в сфере аэронавигации (антитеррористическая защищенность);
- охрана окружающей среды;
- совместимость аэронавигационных систем.

Однако в угрожаемый период или в условиях информационного (военного) конфликта, когда АНС Российской Федерации переходит в режим военного времени, группа этих показателей существенно изменяется. В этих условиях в распоряжении командования имеется не только комплекс информационных, но и огневых средств ПВО и ВВС, которые предъявляют к своей информационной подсистеме совсем иные требования. Очевидно, что имеющиеся средства необходимо наиболее оптимальным образом разместить вокруг объектов, организовать все виды боевого взаимодействия, распределить между ними имеющиеся информационные, материально-технические, кадровые и финансовые ресурсы, назначить зоны ответственности, для огневых средств произвести распределение целей, боезапаса и т. д.

Если предположить, что каждый из самолетов противника, участвующих в налете, является потенциальным носителем мощного поражающего средства, которое будучи применено по тому или иному объекту, гарантирует его уничтожение, то главная задача противовоздушной операции – не допустить к охраняемым объектам ни одного самолета, а естественный показатель эффективности будет сопоставим с вероятностью W того, что ни один самолет не прорвется к назначенному объекту. Очевидно, что это очень жесткий показатель.

Но единственный ли это важный показатель, который можно обоснованно сопоставить с затратами на систему ПВО и ВВС в соответствии

²⁶ Концепция создания и развития Аэронавигационной системы России. [эл. ресурс] <http://www.gkovd.ru>.

с рассмотренным ранее критерием «эффективность/стоимость»? Безусловно, нет. При одной и той же вероятности W командование предпочтет решение, при котором будет уничтожено наибольшее количество самолетов противника как потенциальных участников последующих налетов, если цель предыдущих не достигнута. Отсюда второй показатель эффективности M – среднее число пораженных целей, который тоже необходимо максимизировать. Кроме того, командованию далеко не все равно, каковы будут собственные боевые потери P – еще один критерий, который подлежит минимизации. Желательно, кроме того, сделать минимальным средний расход зенитных ракет R_z и ракет класса «воздух – воздух» R_v . Наконец, руководство страны заинтересовано в достижении перечисленных выше показателей эффективности при приемлемых материально-технических и финансовых затратах, которые, в случае превышения определенных размеров, могут оказаться для экономики страны непосильным бременем.

Какие же изменения в этом случае должны претерпеть показатели эффективности АНС Российской Федерации? Очевидно, что критерий обеспечения национальной безопасности в сфере использования и контроля воздушного пространства Российской Федерации из критерия потенциального, каковым он является в мирное время, переходит в разряд объективных критериев выполнения АНС своей оборонной функции. Претерпят существенные изменения и критерии пропускной способности и эффективности аэронавигационной системы, поскольку задачи аэронавигационного обеспечения боевых действий огневых средств ПВО и ВВС будет решаться ею в условиях целенаправленного радиоэлектронного противодействия и огневого подавления компонентов системы со стороны противника.

Подобных примеров в своей короткой истории существования АНС Российской Федерации пока, к счастью, не имеет, поэтому обратимся за примером к истории войск ПВО.

Так, в противостоянии Вьетнама агрессии со стороны США в войне 1964–1973 гг. ЗРВ ПВО Вьетнамской народной армии (236-й и 238-й зенитно-ракетные полки (зрп) четырехдивизионного состава со смешанными советско-вьетнамскими расчетами) в течение 1965 г. (первого года применения ЗРВ против средств воздушного нападения (СВН) США) произвели 104 стрельбы по средствам воздушного нападения агрессора, сбив при этом 93 самолета противника (86 самолетов тактической и палубной авиации и 7 беспилотных летательных аппарата – БПЛА). Много это или мало и можно ли только по этим данным провести более или менее адекватную оценку эффективности применения ЗРВ? Очевидно, что нет, поскольку при оценке этой эффективности важны не только соотношение общего количества стрельб и сбитых самолетов, но также общий расход ракет и, что немаловажно, размер собственных потерь, поскольку противник принимал

самые решительные меры по огневому поражению зенитно-ракетных дивизионов (зрдн).

В рассматриваемом случае общий расход боекомплекта дивизионов составил 121 ракету (1,3 ракеты на одну цель). Относительный показатель эффективности стрельбы составил 0,8. Общий же показатель соотношения потерь обороняющейся и нападающей сторон (количество сбитых СВН/количество поврежденных зрдн) составил 23,0. Имея такие обобщенные показатели (количество сбитых самолетов, расход ракет на воздушный бой и соотношение потерь противоборствующих сторон), уже можно сделать некоторый обоснованный вывод относительно эффективности созданной группировки ПВО.

Понятно, что в рассматриваемом случае эффективность боевой стрельбы ЗРВ оказалась весьма высокой. В последующие годы американо-вьетнамской войны, по мере освоения СВН США тактики применения радиопомех и противоракетного маневра, эта эффективность существенно снизилась²⁷. В то же время, можно ли с достаточной степенью обоснованности говорить об общей эффективности боевых действий ЗРВ этого периода, особенно с учетом введенного выше обобщенного показателя W (вероятность того, что ни один самолет не прорвется к назначенному объекту)? Очевидно, что нет, поскольку число сбитых самолетов, кроме учета общего расхода ракет и собственных потерь, необходимо сопоставить с общим числом самолетовылетов агрессора и размером ущерба, нанесенного охраняемым объектам уцелевшими самолетами. Как показывает обобщенный опыт локальных войн с массированным применением средств воздушного нападения (самолетов тактической, стратегической и палубной авиации, БПЛА и крылатых ракет – КР), сторона нападения (в силу специфики воздушно-космической операции) имеет возможность создавать плотность потока целей в зоне ответственности ПВО группировки, существенно превышающую боевые возможности ее огневых средств. Достаточно сказать, что в приведенном выше примере боевых действий двух зрп Вьетнамской народной армии в 1965 г. (напомним: сбито за год 93 воздушных объекта) только в одном ударе по восьми зрдн упомянутых полков 27.07.1965 г. (предшествовал основному удару по охраняемому объекту – г. Ханой) было задействовано 60 самолетов противника (тем не менее, безрезультатно).

В таких случаях речь может идти только лишь о максимальном количестве сбитых СВН при минимальном расходе своих ракет и минимизации собственных боевых потерь, поскольку определенное количество воздушных ударных средств по вполне объективным обстоятельствам обычно преодолевает ПВО локальной группировки.

²⁷ Малыгин А., Малыгин М. Становление ПВО Вьетнама // ВКО. 2006. №3. С.52–59.

Максимального значения показателя эффективности W (вероятности того, что ни один самолет не прорвется к назначенному объекту) можно достигнуть только в условиях построения глубоко эшелонированной системы ПВО, при которой СВН противника встречаются на дальних подступах к охраняемому объекту (до достижения им Государственной границы или рубежа пуска крылатых ракет) самолетами ИА и на всем маршруте подлета к объектам удара подвергаются массированному, хорошо скоординированному и эффективному воздействию всех огневых средств ПВО и средств радиопротиводействия бортовым радиоэлектронным средствам СВН. Очевидно, что такое построение системы ПВО оправдано применительно к угрозе ядерной войны, поскольку сопряжено с гигантскими финансовыми и материальными затратами государства.

Другой пример. В агрессии США и НАТО против Югославии (операция «Союзная сила» 24 марта – 10 июня 1999 г.), проходящей при подавляющем количественном и качественном превосходстве коллективных сил агрессии (19 стран НАТО + все соседние страны СРЮ), финансово-экономические потери Югославии, включая военные потери, ущерб экономике и инфраструктуре, некоторыми военными экспертами оценивается в 100 млрд долларов. Пропагандистская машина США и НАТО представила результаты этой агрессии как свою очередную блестящую победу.

В то же время суммарные затраты альянса на войну с Югославией (по оценкам этих же экспертов) оказались соизмеримыми с ущербом самой Югославии. Вооруженные силы небольшой европейской страны не могли противопоставить массированным налетам авиации коллективного агрессора эффективную систему ПВО, зато они смогли противопоставить этим налетам широкий спектр маскировочных средств и ложных позиций ПВО. Поэтому поражение объектов достигалось не столько за счет эффективного применения авиации, сколько за счет многократных повторных ударов с предварительной доразведкой. Очевидно, что все это требовало от стороны нападения дополнительных затрат военно-технических, временных, финансовых и кадровых ресурсов. Если же обратиться (пусть даже к качественной) оценке эффективности (1.4), где левая часть уравнения может характеризовать эффективность операции «Союзная сила», а правая – разность между материальными затратами на нее и ущербом, нанесенным обороняющейся стороне, то несложно заметить, что эффективность такой операции близка к нулю.

Понятно, что подобная ситуация для нападающей стороны не может считаться приемлемой. Например, в ходе операции многонациональных сил в Ираке в 1991 г. первый показатель (совокупные потери Ирака) был значительно выше второго. Кроме того, войскам ПВО и ВВС Югославии удалось в целом сохранить боеспособность и сбить (по данным Министер-

ства обороны Югославии, которые альянс отрицает) 61 самолет, 7 вертолетов, 30 БПЛА, 238 КР многонациональных сил.²⁸ Нанеся обороняющейся стороне ущерб, который, в целом, не подорвал ни ее экономику, ни обороноспособность, ни волю народа к сопротивлению, альянс фактически нанес сам себе материальный ущерб такого же порядка. Не случайно, что в конечном итоге агрессор вынужден был перейти к политическим средствам решения поставленных задач в форме переговоров с руководством Югославии через посредничество В.С. Черномырдина.

Все эти задачи, включая комплекс проблем и задач оптимизации ЕАРЛС и в целом АНС Российской Федерации применительно к условиям военного конфликта, являются предметом рассмотренной выше теории исследования операций. Эффективность этой теории существенно возросла с появлением компьютерных технологий и основанных на этих технологиях методов ситуационного статистического моделирования.

Достаточно сказать, что, готовясь к агрессии против Ирака «Шок и трепет» (март–апрель 2003 г.), американцы призвали в армию специалистов по исследованию операций и ситуационному моделированию войн. Эти специалисты промоделировали порядка 200 различных вариантов удара по Ираку. Из них было вначале отобрано 22, потом 3. И, наконец, был принят окончательный вариант из трех, предусматривающий массированное применение СВН (так называемая бесконтактная война) в течение 35 суток без применения сухопутных войск и потерь. В реальной боевой практике так и получилось. Продолжительность операции (38 суток) фактически совпала с прогнозируемой, а потери многонациональных сил оказались минимальными²⁹.

Вместе с тем при постановке и решении задачи оптимизации РЛ системы исследователь сталкивается с наличием в ней множества взаимодействий координационного и субординационного порядка и, следовательно, с необходимостью учета ее компонентной, структурной и функциональной сложности. В этом случае РЛ систему рассматривают как сложную систему, а арсенал методологических средств исследования операций дополняют методологическими средствами системного подхода.

Соотношение методологических средств этих двух подходов до сих пор строго не установлено и вызывает научные дискуссии. Вот что пишет по этому поводу Х. Райфа в работе по исследованию операций: «Принято считать, что термин «системный анализ» относится к анализу решений в очень сложных задачах, которые определены довольно нечетко. Об «ис-

²⁸ Горячев И. ВВС Союзной Республики Югославия в войне 1999 г. URL: info@rus-obraz.org.

²⁹ Слипченко В. К какой войне должна быть готова Россия? // www.Bestreferat.ru / referat – 5925.html

следовании операций» же говорят в случае анализа решения для более ограниченного класса ситуаций, когда и структура задачи, и цели в ней довольно хорошо определены. Конечно, никакой четкой границы между двумя этими категориями нет»³⁰. В противоположность этому утверждению Ф.Г. Колмоец соотношение теории исследования операций и системного анализа изображает двумя непересекающимися кругами Эйлера, каждый из которых, в свою очередь, частично охвачен третьим кругом, символизирующим теорию принятия решений³¹. Но каков бы ни был разброс мнений, следует все же признать, что комплексное применение теории исследования операций и системного подхода к исследованию, построению и совершенствованию стохастических структур (с точки зрения системного подхода – сложных систем) часто оказывается весьма плодотворным.

1.3.2. Основные понятия, исходные теоретические положения, методы и принципы системного подхода

Несмотря на отмеченные выше теоретические и методологические проблемы системного движения формирующийся *системный подход*, в отличие от классического подхода, ориентированного на познание целого посредством познания его частей, представляет собой общенаучную (междисциплинарную) методологию познания частей на основании знания закономерностей целого и целостности. Он расширил возможности и границы классического познания, а системотехника обеспечила успешное решение множества практических задач. Как всякая междисциплинарная методология системный подход имеет развитый понятийный аппарат, исходные положения теории (постулаты), отражающие основные свойства системы как некоторой целостности, а также основанные на этих постулатах методы и принципы (нормативные правила) системотехнической деятельности, которые позволяют решать широкий класс задач анализа и синтеза сложных систем.

В то же время между компонентами этой методологии до сих пор отсутствует четкая разграничительная линия, когда тому или иному теоретическому утверждению, отражающему онтологический (сущностный) аспект системы, приписывается нормативная функция, а норме, призванной осуществлять регулирование исследовательской или проектной деятельности

³⁰ Райфа Х. Анализ решений (введение в проблему выбора в условиях неопределенности). М. : Наука, 1977. С. 387.

³¹ Колмоец Ф.Г. Системный анализ: методологический и содержательный аспекты // Военная мысль. 2006. №4. С. 63–79.

субъекта, приписывается некоторое теоретическое содержание. Такая познавательная ситуация довольно распространена, особенно в отраслях научного знания, проходящих стадию концептуализации и формирования собственного общетеоретического компонента. Она является закономерным следствием смешения двух принципиально различных уровней научной рефлексии – научно-теоретической и научно-методологической. Предметом первой являются формы, логическая структура и уровни научного знания, достоверно и адекватно отражающего тот или иной фрагмент реальности в соответствующей системе понятий и категорий. Критерием ее научности является *истинность* получаемого знания. Предметом второй является совокупность норм, требований или правил, вытекающих из истинного знания, которой субъект обязан руководствоваться в своей научно-исследовательской или практической (проектной) деятельности. Критерием научности этого уровня рефлексии является *эффективность* выполняемой деятельности. В том случае, когда эти две принципиально различные нормативные системы не расчлняются, методолога на пути его движения к истине поджидают многочисленные гносеологические синдромы и логические парадоксы, способные свести к нулю результаты самого передового исследования. Поэтому с целью придания исследуемому методологическому базису некоторой внутренней логики его основные компоненты рассмотрим в следующем порядке. Вначале приведем базовые системные понятия и категории, затем – основные свойства системы, а также ряд основополагающих положений общей теории систем (постулатов), затем – основные методы и совокупность нормативных правил (методологических принципов) системного подхода и системотехнической деятельности.

Подчеркнем, что приведенное ниже описание системного подхода не лишено противоречия. С одной стороны, оно должно быть достаточно полным, чтобы у субъекта системного подхода сложилось целостное представление о теории и методологии этого подхода. С другой – задача его описания в рамках конкретных научных исследований не является основной и, следовательно, такое описание по вполне объективным причинам обычно носит ограниченный, минимально необходимый характер. Рассмотрим второй вариант системного подхода.

1.3.2.1. Основные понятия и исходные теоретические положения (постулаты) системного подхода

Базовым понятием формирующейся теории систем является понятие о самой системе. Ранее, со ссылкой на В.А. Карташова, отмечалось, что в системном движении до сих пор отсутствует четкое, однозначное и исчерпывающее определение такого понятия. В этой связи им был предпри-

нят сопоставительный анализ нескольких десятков определений понятия системы³² и предложено определение следующего содержания: **«Система есть функциональная совокупность материальных образований, известным образом вовлеченных в отношения содействия в создании некоторого устойчивого эффекта, определяющего действительную возможность получения полезных для субъекта действия результатов, достаточно удовлетворяющих исходной (реальной) потребности».**³³

Несложно заметить, что традиционное определение системы действительно имеет неоправданно расширенное толкование. В то же время и предложенное В.А. Карташовым определение системы не носит исчерпывающего, фундаментального характера, как на это рассчитывает автор. Например, образ вовлечения в системные отношения элементов РЛ системы может носить известный (детерминированный) характер только в отдельных случаях, преимущественно в мирное время. В остальные периоды ее функционирования, особенно в условиях воздушного удара, эти детерминации могут оказаться достаточно условными, хотя РЛ система может продолжать выполнять свои системные функции, в том числе и совокупностью неизвестных на данный момент времени для надсистемы отношений со средой. Далее. Если в определении ведется речь об отношении содействия, то любая РЛС как техническая подсистема РЛ системы не подпадает под это определение, поскольку положенное в основу ее построения элементарное технологическое взаимодействие (взаимодействие зондирующего сигнала на объект локации) предполагает не содействие (со стороны объекта), а преимущественно воздействие (со стороны зондирующего сигнала). Иногда это воздействие сопровождается противодействием, но РЛС в целом от этого противодействия не утрачивает системных качеств. И так далее.

Видимо понимая эти проблемы, В.А. Карташов в последующем приводит развернутое и более адекватное определение системы в виде некоторого контекста. «Как следует из основного определения, – пишет автор, – совокупность материальных образований может рассматриваться как система, если она обладает функциональностью, если при этом достигается некоторый полезный (или вызвавший интерес исследователя) эффект, дающий возможность получения соответствующих полезных результатов (определяющий потенциальную полезность), и если она при этом устойчи-

³² Наиболее распространенным является следующее определение: *система* – совокупность элементов любой физической природы, взаимосвязанных между собой таким образом, что возникает определенная целостность, единство. При этом целостность заключается в том, что свойства системы не могут быть сведены к простой сумме свойств составляющих её элементов, а исключение одного из элементов приводит к нарушению функционирования всей системы. См. : *Философский словарь* / ред. И.Т. Фролов. М. : Политиздат, 1991. С. 408.

³³ Карташов В.А. Система систем. Очерки общей теории и методологии. М. : Прогресс-Академия, 1995. С.145.

ва, то есть способна к стабильному воспроизводству полезного эффекта в пределах допустимых значений основных констант. При этом имеется в виду также, что причины функциональности достаточно определены, так что в основном известны взаимоотношения частей данной совокупности, образующие полезный эффект»³⁴. Это определение системы мы выбираем в качестве основного и переходим к анализу остальных понятий теории систем.

Всякая система включает элементы, их связи (структуру) и характерные для этих элементов и связей свойства, которые проявляются через ту или иную функцию системы. Части системы, обладающие аналогичными (одноуровневыми, однотипными) свойствами, называют *подсистемами*. Объединение нескольких систем, обладающее системным свойством (целостностью), называют *надсистемой*, или системой более высокого порядка.

Элемент системы – относительно устойчивый объект (часть системы), с однозначно определенными свойствами, находящийся во взаимосвязи с другими относительно устойчивыми, качественно определенными объектами, образующими в совместном взаимодействии глобальный эффект системы. Каждый элемент системы имеет входы и выходы (по крайней мере, один вход и один выход). Среди основных выделяют *внутренний элемент* (элемент, который имеет связи только с другими элементами данной системы и не имеет связи со средой), *внешний элемент* (имеет связи не только с элементами данной системы, но и с элементами надсистемы или среды) и *рефлексивный элемент* (элемент, обладающий рецепторными свойствами относительно оказываемого на него воздействия, то есть способный под его влиянием образовывать направленный эффект). Воздействие может состоять в передаче вещества, энергии, информации или комбинации этих компонентов. Соответственно говорят о вещественном, энергетическом, информационном обмене между системой и средой, называемом метаболизмом.

Среда представляет собой окружение, с которым система взаимодействует или посредством которого система взаимодействует с другими системами. Взаимодействующие со средой системы называются *открытыми*. *Закрытые* (замкнутые) системы среды не имеют. Средой для одной из подсистем системы могут служить остальные подсистемы или часть из них, а также другие «сторонние» системы. Поэтому среда – тоже система.

Понятия «элемент», «подсистема», «система», «надсистема» взаимно преобразуемы: система может рассматриваться как элемент системы более

³⁴ Карташов В.А. Система систем. Очерки общей теории и методологии. М. : Прогресс-Академия, 1995. С. 258.

высокого порядка, а элемент, при углубленном анализе, – как система; отношение к системе определяется не только ее содержанием, но и точкой зрения на нее, позицией, задачей исследователя. Например, РЛ система РТВ для ПВО и ВВС является элементом надсистемы, а для конкретной РЛС – надсистемой.

Связь элементов – одно из фундаментальных понятий в системном подходе, отражающее факт непосредственного *взаимодействия* элементов системы, а также элементов и внешней среды; система как единое целое существует именно благодаря наличию связей между ее элементами; виды связи (виды взаимодействий) выражают законы функционирования системы.

Структура системы – относительно устойчивая совокупность связей элементов, конкретизированных по величине и направлению и придающих этим элементам свойство целостности. Характеризует строение и внутреннюю форму организации системы и выступает как единство устойчивых взаимосвязей между ее элементами и законов существования этих взаимосвязей. Каждой системе присущи неисчерпаемое многообразие внутренних и внешних связей, а также способность ее перехода из одного состояния в другое (полиструктурность). Поэтому в зависимости от целей исследования в теории может раскрываться то один, то другой компонент структуры. При изучении степени изоморфизма систем выявляется, прежде всего, такой компонент их структуры, как общие законы функциональных отношений. Если же изучаются специфические особенности строения систем, природа их свойств и взаимодействий, то на первый план выдвигается **материальное содержание структуры**, то есть *совокупность составляющих систему элементов в их взаимосвязи друг с другом*.

Соотношение элементов и структуры системы подчиняется структурно-функциональному принципу: *все свойства и функции системы зависят от характеристик ее элементов и структуры (системы связей) их взаимодействий между собой*.

Приведем небезынтересное на этот счет высказывание Ф. Энгельса, сделанное им в ходе дискуссии с Дюрингом. «...Мы хотим призвать еще одного свидетеля в пользу перехода количества в качество, а именно Наполеона. Последний следующим образом описывает бой малоискусной в верховой езде, но дисциплинированной французской кавалерии с мамлюками, в то время безусловно, лучшей в единоборстве, но недисциплинированной конницей: «Два мамлюка безусловно превосходили трех французов; 100 мамлюков были равны по силе 100 французам; 300 французов обычно одерживали победу над 300 мамлюками, а 1 000 французов всегда побивали 1 500 мамлюков»... У Наполеона определенная минимальная величина конного отряда необходима, чтобы дать проявиться силе дисциплины, зало-

женной в сомкнутом строю и планомерности действия, и чтобы эта сила дисциплины выросла до превосходства даже над более значительными массами иррегулярной кавалерии, имеющей лучших коней, более искусной в верховой езде и фехтовании и, по меньшей мере, столь же храброй»³⁵.

Очевидно, что в случае с мамлюками находит свое проявление не только диалектический закон перехода количественных изменений в новое качество, но и системный закон композиции, согласно которому изменение вида связи элементов (структуры системы) сопровождается приобретением системой принципиально нового качества (в рассматриваемом случае – проявление упомянутой силы дисциплины и преимуществ сомкнутого строя с закономерной победой над противником, который действовал в своей боевой организации системные связи более низкого качества).

Нарушение принципа системности, по мере роста объема авиационных перевозок и услуг, нашло свое проявление и в ЕС ОрВД. В приведенной выше Концепции создания и развития Аэронавигационной системы России эти нарушения охарактеризованы следующим образом: «Существующие службы аэронавигационной информации, обеспечивающие функционирование ЕС ОрВД:

- разобщены по ведомственному принципу, что затрудняет оперативный доступ пользователей к требуемой аэронавигационной информации;
- практически отсутствует контроль качества предоставляемой аэронавигационной информации со стороны государства;
- оценка аэронавигационной информации при сертификации аэродромов производится не в полном объеме;
- отсутствует сертифицированный государственный банк аэронавигационных данных;
- не обеспечен переход к созданию, обработке и передаче аэронавигационной информации в электронном виде».

Более развернуто эти проблемы системной организации отражены в статье А.И. Пономаренко «Оптимизация структуры предприятий радиоэлектронного комплекса в интересах развития аэронавигационной системы». Как пишет автор, «анализ работ по модернизации ЕС ОрВД, проводимых в настоящее время, показывает, что российский рынок средств и систем управления воздушным движением является слабо централизованным. Заказчики приобретают большое количество разунифицированного оборудования у разных производителей (более 50 поставщиков). Только за последние 5–7 лет создано, сертифицировано и принято на оснащение гражданской авиации пять типов первичных РЛС, пять типов вторичных РЛС, более десятка типов оборудования для центров управления воздуш-

³⁵ Маркс К., Энгельс Ф. Соч. 2-е изд. Т. 20. С. 13–132.

ным движением. Указанные изделия зачастую близки по своим основным ТТХ, однако разработаны разными фирмами и значительно отличаются особенностями эксплуатации и технического обслуживания, что приводит к трудностям обучения технического персонала, накоплению разнотипных комплектов ЗИП и т. д. Доля крупных проектов на рынке систем и средств УВД невелика. Все это приводит к неэффективному расходованию ограниченных ресурсов и отсутствию единой технической политики при создании перспективной АНС России. Значительный объем работ выполняют различные частные фирмы, которые принадлежат физическим лицам, что создает дополнительные риски для государства. Примером может служить банкротство ООО «Информтехнология», которое выполняло работы по контрактам с ФГУП «Госкорпорация по ОВД» и инозаказчиками на десятки миллионов рублей и оказалось не в состоянии рассчитаться по своим обязательствам».

И далее: «Некоторые частные фирмы прекратили свое существование, тогда как выпущенные ими изделия до сих пор находятся в эксплуатации, хотя сертификат на них и приостановлен. Ряд фирм поставляет заказчикам изделия без сертификата, поскольку не имеют сертифицированного производства... Нередки ситуации, когда частные фирмы берутся за реализацию комплексных проектов оснащения системами УВД аэропортов или РЦ, но не доводят до конца свои обязательства, в связи с чем их оборудование лежит уже несколько лет мертвым грузом на балансе эксплуатирующей организации... С другой стороны, интеграция зарубежной промышленности, поставщиков средств и систем УВД, в крупные фирмы, такие как «Lockheed Martin» (США), «Thales» (Франция), EADS (Германия), АМС (Италия) и другие, агрессивная политика отдельных западных компаний по проникновению на рынки Российской Федерации и стран СНГ требуют принятия адекватных мер и объединения усилий отечественной промышленности в интересах обеспечения национальной безопасности. В связи с этим актуальной становится задача формирования кооперации разработчиков и производителей различных видов оборудования для УВД». При этом «выполнение работ по модернизации ЕС ОрВД... требует безусловного исключения дополнительных рисков для государства. Уникальность этих работ, их сложность и объемы диктуют необходимость привлечения крупной отечественной промышленной организации в качестве генерального подрядчика (головного исполнителя работ)»³⁶.

Подобные примеры можно привести из боевых действий, основываясь на уже упоминавшемся опыте централизованного и децентрализованного взаимодействия информационных и огневых средств ПВО Вьетнама.

³⁶ http://www.rasu.ru/new_site/docs/2007.09.12_nn_lemz.doc

После ошеломляющих потерь своей авиации в течение 1965–1966 гг. командование ВВС США принципиальным образом пересмотрело тактику применения ударных воздушных группировок по объектам ДРВ. Применяемые в действиях авиации США способы и тактические приемы стали носить системный характер как во времени, так и в пространстве. При этом исключался шаблон в преодолении и подавлении системы ПВО. Такая совокупность приемов включала: применение малых и предельно малых высот полета, массированную постановку пассивных и активных радиоэлектронных помех РЭС ПВО из зон барражирования и из боевых порядков ударных групп, систематическое применение маневра в зонах поражения ЗРК с использованием демонстрационных и отвлекающих действий, создание высокой плотности ударов при действии авиации с различных направлений.³⁷

Соответственно с принятыми командованием США мерами снизилась и эффективность применения ЗРВ ПВО Вьетнама по сравнению с эффективностью боевых действий в 1965 г. В частности, в 1972 г., относящемуся к заключительному этапу американо-вьетнамской войны, ЗРВ сбили 376 самолетов (93 – в 1965 г.); средний расход на сбитый самолет противника составил около 5 ракет (1,3 ракеты в 1965 г.); средняя эффективность стрельбы по всем типам самолетов составила 0,34 (0,8 – в 1965 г.). Обобщенный же показатель потерь (СВН/зрдн) за 1972 г. составил 3,8 (23 – в 1965 г.)³⁸.

Что же противопоставили ЗРВ ПВО Вьетнама изменившейся тактике СВН США? В организационном плане фактически ничего. Как пишут Малыгин А., Малыгин М., «зенитные ракетные дивизионы не были объединены в одну группировку ЗРВ с единым командным пунктом. Управление огнем дивизионов с учетом условий воздушной обстановки осуществлялось с КП полков ЗРВ, а в ряде случаев зрдн вели самостоятельные боевые действия (в том числе и из «засад»)». Боевые порядки полков, особенно в декабре 1972 г., были плотными, что нередко приводило к нерациональному обстрелу В-52 и даже к обстрелу самолетов ТА и ПА. Возможности, которые принципиально заложены в способе централизованного управления, не были реализованы организационно. Разумное сочетание централизованного управления с вышестоящего КП и самостоятельных действий зрдн всегда даст более высокий результат, чем только самостоятельные действия зрдн». Более того, «из-за несогласованных действий КП частей ИА и ЗРВ имело место 4 случая обстрела со стороны зрдн своих самолетов, при этом один истребитель МиГ-21 был сбит своим ЗРК»³⁹.

³⁷ Малыгин А., Малыгин М. Становление ПВО Вьетнама // ВКО. 2006. №3. С 52–59.

³⁸ Малыгин А., Малыгин М. Последний год войны во Вьетнаме // ВКО. 2006. №5.

³⁹ Трофимов С. Вьетнам: Разгар войны // ВКО. 2006. №4.

Следует заметить, что случаи поражения самолетов своими огневыми средствами имели место и в вооруженных конфликтах на Ближнем Востоке, в частности в Арабо-Израильской войне 1970 г.

Понятно, что сложные информационные системы и системы противовоздушной (противокосмической) обороны, способные отражать внезапные массированные удары воздушного противника, не создаются за год-полтора. Тем не менее, системный принцип их построения необходимо закладывать с самого начала, потому что наличие централизованных (системных) связей придает совокупности радиолокационных и огневых подразделений новое системное качество, которым не обладает ни одно автономное подразделение. Это системное или функциональное качество найдет свое проявление в особенностях радиолокационного поля и зон поражения зрнд, о существовании которых, как о единой структуре, можно говорить только лишь в случае централизованного сбора, обработки, отождествления, передачи и использования боевой информации. Оно же способно проявиться и в более высокой помехозащищенности, информационной способности, живучести и, следовательно, эффективности РЛ системы. Здесь, как и в предыдущем случае, системные законы выступают в качестве механизма реализации законов диалектики, имеющих всеобщий характер. Рассмотрим основные понятия и категории общей теории систем.

Функция элемента системы – внешнее проявление свойств элемента в данной системе отношений.

Функция системы – внешнее проявление свойств данной системы в отношениях с системами более высокого уровня (с надсистемами).

Функциональное качество системы – специфическое свойство системы, приобретаемое ею в результате реализации того или иного способа связи со средой; каким образом система взаимодействует со средой, таково ее функциональное качество. Помимо функционального качества, отражающего сущность системы, вводят понятие качества системы как количественной оценки степени проявления этой сущности.

Качество системы – обобщенная положительная характеристика системы, объединяющая некоторую совокупность показателей качества и выражающая степень ее полезности для надсистемы, исследователя или пользователя. *Показатель качества* – одно из важнейших положительных свойств системы.

Функциональная структура системы – совокупность взаимодействий, связанных непосредственно с функционированием каждого элемента в данной системе в направлении образования ее глобального эффекта. *Нормальная структура* – структура, остающаяся неизменной в данных условиях и на данном промежутке времени. *Динамическая структура* – изменяющаяся структура, в которой присутствует момент изменения количе-

ства и направления отношений между ее элементами, включая возможность изменения элементного состава самой системы.

Следует подчеркнуть, что между функцией и структурой существует диалектическая взаимосвязь, аналогичная взаимосвязи между философскими категориями «содержание» и «форма». Эта взаимосвязь исследуется в рамках функционально-структурного подхода, включающего следующие принципы:

- структура системы определяется совокупностью реализуемых этой системой функций;
- между реализуемыми функциями системы и ее структурой не существует взаимно-однозначного соответствия (то есть может быть несколько систем с одинаковыми функциями и разной структурой и наоборот);
- функционально-структурная организация системы адаптируется к изменяющимся условиям ее существования. Изменение условий существования системы (внешней среды) вызывает изменение ее функций и ведет соответственно к изменению ее структуры;
- процесс эволюции систем формирует различные типы систем, функционально-структурная организация которых в возрастающей мере соответствует потребностям и условиям существования этих систем. Это многоцикличный спиральный процесс.

Граница системы – определенность множества ее элементов, реально осуществляющих взаимодействие любого типа с элементами окружения.

Системное качество – качество (совокупность новых свойств), которое приобретает объект в рамках некоторой системы и которое не сводится к качеству отдельного объекта (элемента) системы.

Конкретное функциональное качество системы – оценка степени или меры достижения конкретно сформулированной цели в пределах функционирования конкретно выбранной системы.

Полное функциональное качество системы – соответствие полученного результата главной цели системы.

Эффект системы – конкретное состояние системы в некоторый момент ее функционирования, наступившее вследствие всей совокупности взаимодействий и изменений ее элементов к рассматриваемому моменту. Это состояние зависит только от собственных свойств системы и выбранного момента его фиксации при функционировании.

Результат функционирования системы – «совмещение» ее конкретного объективного состояния с субъективным восприятием его полезности для надсистемы на фиксированном промежутке времени. Результат может оцениваться через соотнесение параметров объективного состояния системы на момент фиксации и субъективного образа предполагаемого состоя-

ния. Эффект, в отличие от результата функционирования системы, не подлежит субъективной оценке – он есть состояние «в себе», независимо от сознания субъекта оценивания системы.

Системообразующий фактор – важнейший признак (свойство) системы, объединяющий некоторое множество элементов в целостность. *Внутренние* системообразующие факторы – факторы, которые порождаются объединяющимися в систему элементами, группами элементов или всем множеством. *Внешние* системообразующие факторы – факторы среды (надсистемы), которые способствуют возникновению и развитию данной системы. В технических системах системообразующим фактором является положительно оцениваемый результат ее функционирования. В социальных (целенаправленных) системах основным системообразующим фактором является цель (целевая функция) системы. «Цель как закон определяет способ и характер действий человека»⁴⁰.

Организация системы – свойство системы сохранять свое функциональное качество в течение некоторого времени. Если система достаточно устойчива и достаточно длительное время способна удовлетворять некоторым потребностям и если функционирование каждого ее элемента соответствует некоторым требованиям, правилам, методикам, инструкциям, нормированным в процессе ее формирования и отработки, то говорят о некоторой организации действующей системы как целостном интегративном образовании.

Состояние системы – упорядоченная совокупность значений внутренних и внешних параметров, определяющих ход процессов, происходящих в системе.

Упорядоченность системы – некоторая характеристика поведения элементов (подсистем) системы, отражающая степень соответствия их поведения общей тенденции функционирования и развития системы. Мерой неупорядоченности систем вблизи состояния равновесия принято считать энтропию⁴¹. Соответственно мерой упорядоченности поведения системы – негентропию. Упорядоченность системы относится к внешнему фактору, а организация – к внутреннему.

Поведение системы есть развернутая во времени последовательность реакций системы на внешние воздействия.

⁴⁰ Маркс К., Энгельс Ф. Соч. 2-е изд. Т. 23. С. 189.

⁴¹ Энтропия (греч. en – в и trope – поворот, превращение) – с точки зрения статистической физики отражает вероятность (меру неопределенности) состояния системы; возрастание энтропии означает переход системы от менее вероятных (более устойчивых) состояний к более вероятным (менее устойчивым) состояниям. Негентропийность указывает на управляемость и/или целенаправленность системы. Вторым вариантом охватывает социальные системы, специфической формой проявления которых являются Радиотехнические войска ВВС и ПВО.

Система, как некоторая целостность, обладает рядом специфических (системных) **свойств, наиболее общими из которых являются:**

1. *Целостность* – свойства целого (всей системы) принципиально не могут быть сведены к сумме свойств ее элементов; у системы есть собственные свойства, которых нет ни у одного из ее элементов; поведение и свойства элемента системы зависят от его места и функций в системе.

2. *Структурность* – поведение системы обусловлено *не столько свойствами ее элементов, сколько свойствами ее структуры, тем, как элементы расположены и взаимодействуют в системе.*

3. *Взаимозависимость* системы и среды – система вычленяется из среды, формируется и проявляет свои свойства во взаимодействии со средой.

4. *Автономность* – система существует и развивается согласно не только общим, но и ее собственным, только ей присущим законам; уникальность присуща и системам, и их онтогенезу, то есть индивидуальному развитию.

5. *Адаптивность* – система обладает определенной «живучестью», может приспособливаться к изменениям внешней среды.

6. *Иерархичность* – взаимодействие элементов системы может быть представлено в виде иерархии связей; характер и особенности связей элементов системы имеют не менее важное системообразующее значение, чем сами элементы. Каждый компонент системы, в свою очередь, может быть представлен как иерархическая система, а сама система – как компонент более крупной системы. Выделение системы из окружающей среды определяется задачами исследования и точкой зрения исследователя.

7. *Функциональность* – способность системы проявлять определенные свойства (функции) при взаимодействии с внешней средой. Здесь же проявляется (обнаруживается) цель (назначение) системы как желаемый конечный результат.

8. *Множественность описаний* – в силу принципиальной сложности каждой системы ее познание требует всестороннего рассмотрения, построения множества разных моделей, каждая из которых описывает лишь определенную сторону системы. Разработка единой вполне адекватной модели невозможна, так как полная модель для сложной системы (в силу теоремы Тьюринга) будет столь же сложной, как и сама система. Все прогнозы относительно поведения систем имеют вероятностный характер.

9. *Управляемость* – способность системы к формированию целостного (эффективного) поведения для поддержания режима деятельности (функционирования), реализации ее главной цели (функции).

Для системы любой физической природы характерна множественность состояний, которая может быть: а) конечной и известной, б) неизвестной, но поддающейся оценке (счетной), в) бесконечной и дискретной, г) бесконечной

и непрерывной. Соответственно этим состояниям выделяют: детерминированные S_1 , стохастические S_2 , хаотические S_3 и сложные S_0 системы.

Система является *сложной*, если обладает свойствами уникальности, слабопредсказуемости и негентропийности (целенаправленности). Сложные системы иногда называют неравновесными, диффузными или системами с плохой организацией.

В ряде работ по общей теории систем, наряду с понятием сложной системы, а иногда и вместо него, используется понятие «большая система». При этом само это понятие, как и объективность критерия «больше-меньше», не уточняется. Обычно, говоря о величине системы, подразумевают ее геометрические размеры. Но поскольку с точки зрения основного системного качества таковым является качество функциональное, постольку пространственная определенность системы отходит на второй план, оказывается несущественной. Как пишет в этой связи В.А. Карташов, «словосочетание «большая система» скорее отражает эмоциональное восприятие сверхсложных систем (огромная, невообразимая, неохватываемая разумом), но не имеет количественной основы и в этом смысле в лучшем случае некорректно. Поэтому, на наш взгляд, целесообразней было бы вообще отказаться от его применения»⁴².

Объективная характеристика сложности системы зависит от качественных и количественных различий компонентов (элементов) и связей системы, то есть от ее качественного и количественного разнообразия. Поэтому **сложные системы** – это системы, в которых имеет место действие многих разнородных факторов, существует большое число переменных, что предполагает большое количество элементов и их состояний. В то же время, сложность системы относительна: она зависит от разных условий и сторон ее существования.

Так, внутренне очень сложное функционирование системы получения разведывательной и боевой информации о средствах воздушного нападения противника в общей системе ПВО может выступать в виде менее сложного макроповедения РТВ, что длительное время считалось основанием для недооценки их вклада в глобальный эффект всей системы. В реальной войсковой практике эта недооценка проявлялась, например, в том, что командир радиотехнической бригады, какими бы высокими личностными и профессиональными качествами он ни обладал, в отличие от командира зенитно-ракетного или истребительно-авиационного полка (бригады), в принципе, не мог рассматриваться в качестве реальной кандидатуры на замещение должности начальника штаба или командира дивизии (корпуса) ПВО.

⁴² Карташов В.А. Система систем. Очерки общей теории и методологии. М. : Прогресс-Академия, 1995. С. 369.

Подобные дискриминационные явления имеют место и в системе аэронавигационного обеспечения ГА, где специалист системы РТОП по размеру заработной платы существенно проигрывает, например, диспетчеру управления воздушным движением (УВД), хотя находится у истоков РЛИ о воздушных объектах в обслуживаемой аэронавигационной зоне.

К наиболее общим свойствам сложных систем относятся⁴³:

1. *Уникальность* – неповторимость ряда свойств, качеств, элементов, вследствие чего каждая система такого класса не имеет полных аналогов поведения. Уникальность присуща не только системам, но и элементам систем; она проявляется по-разному: в одних случаях ею можно пренебречь, в других она решающим образом влияет на поведение системы. Чтобы принимать уникальность за пренебрежительно малую величину, нужны серьезные основания.

2. *Слабопредсказуемость*: никакое, сколь угодно подробное знание морфологии (устройства) и функций элементов (подсистем) не позволяет определить функции объекта, никакое, сколь угодно подробное и точное знание поведения объекта на интервале $(-T, 0]$ не позволяет точно предсказать его поведение на интервале $(0, \tau]$.

3. *Негентропийность*, или *целенаправленность*: система в состоянии в определенных пределах управлять своей энтропией (уменьшать ее, сохранять, тормозить увеличение) при случайном и неблагоприятном воздействии среды или (и) способна осуществлять поведение, преследующее достижение определенной цели. *Негентропия* – мера вероятности пребывания в данном состоянии. Она определяет «стремление» системы к основному процессу, способность устранять последствия внешних и внутренних случайных воздействий.

Как отмечалось выше, для любой сложной социальной системы характерна многокритериальность: как правило, каждая подсистема или их объединение имеет свои критериальные функции, отвечающие их назначению. Вследствие относительной автономности и качественной неоднородности подсистем эти критерии могут находиться в противоречивых отношениях. Поэтому, во-первых, *подсистемы таких систем не могут одновременно иметь экстремумы целевых функций*, так как достижение экстремальных значений переменных одной подсистемы выводит за допустимые пределы переменные другой подсистемы; во-вторых, *в сложной системе невозможно достичь глобального оптимума (то есть экс-*

⁴³ В этом параграфе речь идет о сложных системах, находящихся в устойчивом (равновесном) состоянии. Такие системы иногда называют линейными. Специфика нелинейных (неравновесных, или неустойчивых) сложных систем будет рассмотрена ниже в рамках так называемого синергетического подхода.

тремума целевой функции всей системы), так как это нарушает нормальное функционирование составляющих ее подсистем.

С этой точки зрения рассмотренный ранее пример оптимизации системы ПВО в соответствии с критерием «эффективность/стоимость» (рис. 1.1) носит весьма условный характер, поскольку одновременное повышение эффективности РТВ, ЗРВ и ИА в реальной практике военного строительства не приводит к достижению системой ПВО глобального эффекта. Поэтому *специфической проблемой оптимизации сложной, многоуровневой системы является не только согласование критериев подсистем между собой, но и согласование этих частных критериев с глобальным критерием всей системы*. При этом образуется некоторое «дерево целей», каждой из которых присваивается определенный приоритет (вес).

При практической реализации сложных социальных (в т. ч. эргатических) систем оказываются более рациональными и выгодными ситуации, в которых глобальный критерий ниже экстремального, а критерии подсистем различных уровней имеют близкие к оптимальным допустимые значения. Напомним, что разработка (изучение или исследование) такой системы относится к классу рассмотренных ранее многокритериальных оптимизационных задач исследования операций, связанных с поиском эффективных («паретовских») решений.

Отправные (исходные) положения общей теории систем могут быть выражены в постулатах *физичности, автономности, дополненности, действия, неопределенности, целенаправленности (управляемости), выбора, конкретности*.

Постулат физичности является исходным. В нем утверждается, что всякой сложной системе, независимо от ее природы, присущи физические законы (закономерности); в рамках этой системы возможны уникальные, определяющие внутренние причинно-следственные связи, специфическое существование и функционирование. Никаких других законов (кроме физических) для объяснения действия систем любой природы, включая живые, не требуется.

Из постулата физичности вытекает методологическое следствие в виде *принципа целостности*: сложная система должна рассматриваться как единое целое. Этот принцип базируется на специфическом общесистемном свойстве: для всех способов декомпозиции системы существует единственное множество системных свойств, зависящее только от системы и не зависящее от способа декомпозиции. При этом множество системных свойств всех подсистем не имеет ни одного общего элемента, то есть свойства системы сводятся к свойствам ее отдельных элементов или подсистем. Очевидно, что принцип целостности представляет собой системотехническую интерпретацию одного из принципов диалектического метода позна-

ния – *принципа объективности исследования*: в процессе изучения, познания того или иного фрагмента реальности необходимо исходить из самого явления (объекта познания), из законов его функционирования и развития, не привносить в него ничего от себя.

Сущность принципа целостности состоит в том, что композиция (объединение подсистем в систему) и декомпозиция (членение системы) должны осуществляться в направлении генерирования характеризующей систему информации более высокого качества. Он ориентирует идеолога, методолога или разработчика РЛ системы на рассмотрение ее как органично целостного объекта, который: а) состоит из определенной совокупности компонентов (элементов, подсистем), взаимосвязь и взаимодействие которых обуславливают его целостность как системного образования; б) обладает интегративным качеством, не присущим отдельным частям; в) обоснованно, то есть с учетом объективно существующих связей и отношений, а не произвольным образом, выделен из окружающей среды.

Выявление целостности радиолокационной системы требует учета всех взаимосвязей внутри системы, а также системы со средой. Здесь необходимо выявить системное свойство, его содержание, механизм образования, факторы, которые препятствуют его появлению или снижают потенциальный уровень. Важно понять, какие свойства подсистем подавляются общесистемным свойством, каков механизм этого подавления и в каких условиях он теряет силу. Применение принципа целостности к разработке (исследованию, изучению) РЛ системы состоит также в раскрытии и накоплении сведений о системных свойствах на всех этапах исследования, в обобщении их в некоторые понятия и математические выражения, а затем – в применении этих понятий и математических выражений к подсистемам при исследовании их порознь после декомпозиции. Рациональность декомпозиции оценивается на основании определения целостности: если декомпозиция оказалась неудачной, системные и надсистемные понятия и математические выражения невозможно увязать, между ними теряется преемственность, они неустойчивы и производят случайное впечатление. Можно радиолокационную систему расчленить по функциональным элементам (радиолокационным подразделениям), создающим сплошное радиолокационное поле, а можно, например, по остатку ресурса радиолокационного вооружения. Последнее вполне возможно и законно, но бесполезно, так как носит равновероятностный характер.

Таким образом, систему, существующую как целостность, должны связывать законы (закономерности), регламентирующие эту целостность. Эти законы отражаются постулатом автономности.

Постулат автономности: сложные системы имеют автономную пространственно-временную метрику (группу преобразований) и внутри-

системные законы сохранения, определяемые физическим содержанием и устройством системы и не зависящие от внешней среды. Этот постулат имеет два методологических следствия.

Первое следствие постулата автономности состоит в том, что в сложных системах существуют автономное расстояние (метрика) и автономное время. Сложная система находится в реальном геометрическом мире и взаимодействует с ним, но основное значение для ее свойств имеют процессы, которые протекают внутри системы. Познание системы требует, прежде всего, ее обозримого описания, и здесь выбор метрики может играть определяющую роль.

Введение метрики РЛ системы означает создание модели ее геометрии: чем ближе эта модель к истинной геометрии системы, тем проще представление системы. При системном описании приема и обработки радиолокационных сигналов, отраженных от воздушного объекта (в частности, при выводе уравнения радиолокации), целесообразно использовать геометрическую метрику. При описании системы «радиолокационная станция» вводится функциональная метрика, использующая некоторое автономное время (например, время включения РЛС, время обзора воздушного пространства, текущее время функционирования и др.) и электрические величины: ток, напряжение, мощность, частоту (несущую или частоту повторения зондирующих сигналов), фазу и др. Эффективность этой метрики проявится, если подсистемами будут радиоприемное и радиопередающее устройства РЛС, антенно-фидерный тракт, подсистема вращения (качания) антенны и др.

При описании РЛ системы в целом целесообразно применять пространственно-временную метрику, использующую: а) собственное автономное время (например, время перехода АНС Российской Федерации из режима мирного времени в повышенные степени боевой готовности, время запаздывания РЛИ, пропускная способность системы и т. д.); б) собственную метрику – основные параметры радиолокационного поля, характеризующие его геометрические размеры, форму и пространственную структуру (связи элементов) в реальном пространстве. Эффективность этой метрики проявится, если подсистемами будут конкретные позиции РЛС или радиотехнических подразделений.

Введение адекватной метрики означает открытие основного закона системы, который ограничивает возможные способы декомпозиции системы и предопределяет порядок ее исследования. Для РЛ системы таким системным законом является закон создания сплошного радиолокационного поля с заданными (и управляемыми) параметрами: максимальным и минимальным потолком обнаружения целей, коэффициентом перекрытия, точностью и вероятностными характеристиками радиолокационного наблюдения и др. Внутренняя же мера времени вводится, прежде всего,

как средство исследования, без которого невозможно обойтись при формализации описания системы. Затем устанавливается физическая реальность автономного времени, поскольку реальная система функционирует в реальном масштабе времени.

Следует подчеркнуть, что с точки зрения постулата целостности разноеобразие декомпозиций помогает выявлению системных свойств. С точки зрения постулата автономности большинство декомпозиций, а может быть и все, кроме одной, отпадут. Останется единственная декомпозиция, которая соответствует автономной метрике РЛ системы.

Второе методологическое следствие постулата автономности состоит в том, что он связан с наличием *внутрисистемных законов сохранения*. Системы любой физической природы характеризуются некоторыми величинами, не зависящими от выбора метрики и системы координат. Такие величины называют *инвариантами* системы. Если инварианты, или функции от них, не изменяются при взаимодействии систем, сохраняя свою величину постоянной и допуская только ее перераспределение между подсистемами, то говорят, что соответствующая физическая величина подчиняется закону сохранения. Инварианты определяются физическим содержанием, устройством и ресурсом⁴⁴ системы, а не ее целевой функцией.

Инвариантом радиолокационного сигнала можно считать объем тела неопределенности. Инвариантом РЛС – вектор технических параметров, включающий среднюю мощность передающего устройства, предельную чувствительность и полосу пропускания приемного устройства, направленные свойства антенны и т. д. Понятно, что тактические параметры РЛС инвариантами не являются, так как существенно зависят от ситуации (способов действия и поведения воздушных объектов). Что касается инвариантов самой РЛ системы, то ситуация с их выявлением оказывается значительно более сложной. Какие бы параметры не подвергались рассмотрению, касается ли это параметров радиолокационного поля как формы внешнего проявления РЛ системы или других характеристик системы (например, мобильности, живучести, пропускной или информационной способности) – все они в значительной степени зависят от складывающейся воздушной и помеховой обстановки. Даже закон сохранения энергоресурса, справедливый для множества сложных систем различной физической природы, применительно к РЛ системе оказывается не состоятельным по той же причине. С этим обстоятельством, по всей видимости, и связано отсутствие до настоящего времени более или менее развитой теории РЛ

⁴⁴ Следует иметь в виду, что взаимосвязь инварианта с ресурсом характерна только для бесконфликтных систем. Для конфликтных систем, включая РЛ системы РТВ, ресурс ее функционирования существенно зависит от состояния среды (от поведения СВН противника).

систем, способной адекватно описать и объяснить основные законы ее строения, функционирования и развития.

Можно предположить, что *инвариантом для РЛ системы является энергоинформативность*, понимаемая как отношение условной единицы полученной РЛ информации к условной единице энергетических затрат на ее получение. Прирост энергетических затрат компенсируется соответствующим приростом информации, вследствие чего энергоинформативность системы остается постоянной.

В условиях мирного времени этот инвариант отражает процессы оптимального функционирования РЛ системы, предотвращающие перерасход ее энергоресурса. В таком понимании он соответствует упомянутому закону сохранения энергоресурса, характерному для бесконфликтных систем. В военное время, характеризующееся широким применением воздушным противником различного рода радиопомех, полетом на малых и предельно малых высотах, стремлением к огневому поражению отдельных РЛС или радиолокационных подразделений и т. д., снижение помехоустойчивости, точности РЛ информации, информационной и пропускной способности РЛ системы компенсируется соответствующим повышением энергетических затрат на ее функционирование. Такое понимание инварианта РЛ системы вписывается в рассмотренное ранее технологическое движение вещества, энергии и информации (рис. 1.2), при котором энергия как объект технологического изменения (преобразования) органически включает в себя вещество, а информация – и энергию, и вещество.

На основании исследования инварианта выявляются законы сохранения. Поэтому можно утверждать, что в РЛ системе действует *закон сохранения энергоинформативности*. **Это основной закон, предотвращающий искажение целевой функции РЛ системы или ее возможный распад.** Очевидно, что он реально присущ РЛ системе и позволяет раскрыть многие важные свойства, идентифицировать и увязать протекающие здесь вещественно-энергетические и информационные процессы, познать систему на основе множества эмпирических фактов, слабоструктурируемых и труднообозримых. Следует, однако, иметь в виду, что автономные законы сохранения (в отличие от естественно-научных законов), носят *модельный* характер. Они действительно постольку, поскольку модель адекватна системе.

Постулат дополненности: сложные системы, находясь в различных ситуациях взаимодействия с внешней средой, могут проявлять различные системные свойства, в том числе альтернативные (то есть несовместимые ни в одной из ситуаций по отдельности). Постулат дополненности ориентирует исследователя на необходимость поиска в различных ситуациях соответствующих этим ситуациям проявлений сущности

РЛ системы. Его необходимость связана с ограниченностью средств познания и отображения реальности. Окружающая нас действительность едина, целостна, но отражение ее свойств в сознании субъекта неоднозначно, фрагментарно и ситуационно. Исследователь воспринимает одни грани сущности РЛ системы в одних условиях, а другие грани ее сущности – в других.

Постулат действия: реакция системы на внешнее воздействие имеет пороговый характер, то есть для изменения поведения системы требуется прирост воздействия, превосходящий некоторое пороговое значение. Изменение поведения сложной системы может быть связано с движением вещества, энергии и информации, которые, накапливаясь, проявляют свое воздействие скачкообразно, путем перехода из одного качественного состояния в другое. Следовательно, порог есть функция трех переменных: количества определенного вещества, количества энергии определенного вида, количества информации определенного качества. Для АНС Российской Федерации или ВВС и ПВО, как сложных систем более высокого порядка относительно радиолокационной системы, уровень вещественно-энергетического взаимодействия, в силу различного рода ограничений, включая финансовые, носит достаточно регламентированный характер. Поэтому именно **прирост информации**, для накопления которой и создана РЛ система, определяет основные направления и виды деятельности АНС Российской Федерации, а также ВВС и ПВО как надсистем. Очевидно, что в рамках этой надсистемы РЛ системе принадлежит важнейшая *информационная* функция, а сама эта система является *информационной*.

Важно подчеркнуть, что конструктивное значение постулата действия определяется покомпонентными порогами, значения которых регулируются системой. До определенного уровня действие среды компенсируется усилением одних и ослаблением других процессов, а начиная с некоторого уровня – требуется переустройство системы. Например, применение в боевых порядках СВН противника ограниченного числа источников активных помех парировалось применением в системе РТВ радиолокационных средств с двухканальными автокомпенсационными системами помехозащиты. Массированное же применение этих помех, в сочетании с мероприятиями по снижению радиолокационной заметности воздушных объектов, потребовали коренного переустройства всей РЛ системы РТВ, включая широкое использование пассивного приема и методов многопозиционной обработки РЛИ.

Постулат неопределенности: максимальная точность определения (измерения) свойств сложной системы зависит от присущей данной системе области неопределенности, внутри которой повышение точности определения (измерения) одного свойства влечет за собой снижение точности другого (других); одновременно измерить значение двух (или более) параметров

с точностью, превышающей определенный уровень, невозможно. В радиолокации точность одновременного измерения, например, дальности и скорости цели имеет предел, зависящий от вида сигнала. Этот предел характеризуется соответствующей функцией неопределенности и является одной из основных объектов системного подхода при проектировании РЛС. Физическая причина неопределенности состоит в том, что измеряемая величина (количественно выраженное свойство) влияет на внутрисистемный инвариант. В частности, при частотно-модулированном радиолокационном сигнале измеряется линейная функция от координаты и скорости. Точность оценки этой функции представляет собой системный инвариант (устойчивое свойство), который устанавливает предел точности определения координаты и скорости порознь – выигрывая в одном, неизбежно проигрывают в другом, иначе изменится инвариант, что физически невозможно для конкретного сигнала.

Постулат целенаправленности. Целенаправленной называют систему, имеющую тенденцию к сохранению (повышению) своей эффективности или к достижению некоторой ситуации, заданной надсистемой. Такая система оказывается способной противостоять внешнему воздействию, а также использовать среду и случайные события. Введение такого постулата позволяет упростить модель сложной системы. Для этого вводят объективную меру целенаправленности – *эффективность системы, представляющую собой обобщенную положительную характеристику (главный инвариант) действия (деятельности) системы на определенном интервале времени, учитывающую результат (эффект) отмеченного действия (деятельности) и затраченный ресурс*. Подобная мера определяет существование, перспективу и место системы в надсистеме и объединяет качество системы (степень ее полезности для надсистемы), расход ресурса и время действия.

Из определения эффективности вытекают следующие ее **свойства**: а) эффективность имеет количественную меру и выражается числом; б) мера эффективности является внешней по отношению к системе, то есть описание системы не может быть достаточным для введения этой меры; в) оценка эффективности учитывает определенные свойства надсистемы и, следовательно, касается как системы, так и надсистемы; г) нецеленаправленные системы эффективности не имеют.

Анализируя отмеченные свойства, несложно заметить, что понятию эффективности присуще некоторое диалектическое противоречие. С одной стороны, эффективность внутренне присуща системе как таковой, является ее атрибутом. С другой стороны, она связана со свойствами надсистемы и является внешним критерием по отношению к системе. Очевидно, что это противоречие стимулирует развитие понятия эффективности системы, но одновременно создает определенные трудности во взаимопонимании исследователей. Применительно к РЛ системе понятие эффективности

и проблема выбора критерия эффективности системы будут рассмотрены в подпараграфе 1.3.4.

Постулат выбора: сложные системы обладают областью выбора и способностью выбирать поведение, то есть реакцию на внешнее воздействие в зависимости от внутренних критериев целенаправленности; никакое априорное знание не позволяет ни надсистеме, ни самой системе однозначно предсказать этот выбор. Сложная система строит свое поведение в существенной, хотя и неоднозначной, связи с ситуацией, поэтому на ее поведение можно влиять (управлять им). Степень же неоднозначности зависит от ситуации, то есть от внешних связей и среды. Более того, в определенных условиях неоднозначность исчезает, что можно наблюдать на ряде социальных или технических систем. Однако полной однозначности зависимости выходной реакции системы на входное воздействие не достигается.

Постулат выбора отражает способность сложной системы (в соответствии с ее целенаправленностью) использовать редкие благоприятные ситуации или события, возникающие во взаимодействии со средой, и блокировать неблагоприятные для нее процессы и события.

Постулат конкретности утверждает, что не существует систем вообще, каждая система конкретна. Конкретность заключается в однозначности закона соответствия изменения состояний взаимодействующих элементов (при данной их норме существования и в данный момент времени) независимо от предшествующего процесса становления этих состояний. Другими словами, всякие изменения в окружении, относительно которых система обладает рецепторными свойствами (то есть свойствами воспринимать воздействия), всегда вызывают изменения в ней, и эти изменения определяются конкретными законами соответствия отношения системы и окружения.

1.3.2.2. Основные методы и принципы системного подхода

Системный подход, помимо рассмотренного теоретического основания в виде понятийно-категориального аппарата и исходных положений теории и их следствий (постулатов), включает методы *системного анализа*, *системного синтеза* и *системного моделирования*, а также некоторую совокупность нормативных правил системотехнической деятельности (принципов).

Системный анализ представляет собой комплекс взаимосвязанных приемов и процедур конструирования и/или исследования сложных и сверхсложных объектов и процессов. От формально-логического анализа он отличается своими исходными установками: стремлением с максимальной полнотой учесть все входные и выходные характеристики объекта, то есть стремлением к рассмотрению объекта как системы; ярко выраженным

междисциплинарным подходом к решению проблем познания или изучения; проблемно ориентированной, а не функциональной организацией работ, исследований или изучения.

Применяется в диалектическом единстве и взаимосвязи с **системным синтезом**, предусматривающим интеграцию системных представлений об одном и том же объекте, полученных при различных «срезах» с этого объекта.

Системный подход и системный анализ (в органическом единстве с системным синтезом) соотносятся между собой как методология (учение о методе) и собственно метод. Как любому научному или практико-ориентированному методу, системному анализу соответствует некоторая минимально необходимая нормативная база (совокупность принципов и этапов исследования).

Основными принципами системного подхода являются следующие.

Принцип классического детерминизма. Ориентирует исследователя на выявление необходимой обусловленности каждого свойства, отношения, открываемого у исследуемого объекта. Как важнейшее нормативное правило классического и неклассического типов научной рациональности, определяющее общий подход к исследованию линейных систем, он проявляется в двух аспектах: а) в виде *принципа причинной обусловленности* явлений реальности и б) в виде *принципа обусловленности качественных характеристик* (изменений) объекта *количественными*, формы – содержанием, функций элемента системы – ее структурой, структуры системы – природой элементов.

Принцип причинной обусловленности конкретизируется посредством некоторой системы требований к познающему субъекту, которая состоит в следующем: 1) при исследовании любого объекта необходимо вскрыть его причину – взаимодействие элементов, обусловивших его возникновение, функционирование и развитие; 2) при объяснении любого свойства исследуемого объекта необходимо выявить причину, вызвавшую его к жизни, – соответствующие взаимодействия элементов, составляющих этот объект, и взаимодействие последнего с другими объектами; 3) так как причина во времени всегда предшествует следствию, то при познании того или иного явления объяснение соответствующих изменений, причину, их обусловившую, следует искать во взаимодействии, предшествующем во времени этим явлениям, изменениям; 4) предсказание того или иного следствия предполагает знание определенных характеристик причин и закономерностей ее действия.

Принцип *обусловленности качественных характеристик* (изменений) объекта *количественными* имеет не менее сложную структуру и включает

следующие нормативные правила: 1) в процессе познания объекта, выявления моментов его содержания и устойчивой системы связей (структуры) необходимо учитывать взаимообусловленность содержания и формы, их взаимосвязь и взаимозависимость; 2) в процессе познания объекта необходимо объяснять его структуру, исходя из природы элементов, которые его образуют, а при объяснении качества элементов учитывать воздействие на них структуры – установившейся между ними системы связей; 3) в объекте необходимо учитывать взаимообусловленность структуры и функций, объяснять функции из специфики структуры, а структуры – из специфики функций (структура системы определяет ее функции, а изменение функций вызывает изменение структуры); 4) структура объекта играет определяющую роль – именно она превращает взаимодействующие образования в элементы системы; 5) в процессе познания объекта необходимо расчленить его на относительно самостоятельные элементы, выявить необходимую связь между ними и объяснить сущность целого, исходя из природы элементов и характера их взаимосвязи; при объяснении сущности элемента, входящего в определенную систему, необходимо учитывать его связи с другими элементами, а также природу системы, ее специфическую сущность; б) при объяснении сущности целого необходимо учитывать природу частей, его составляющих; при объяснении же специфики частей – природу целого, его сущность⁴⁵.

Принцип коммуникативности. Предусматривает, что в процессе разработки (исследования) сложной системы в первую очередь следует выявить и изучить ее коммуникации – внутренние и внешние связи, основными из которых являются: связи *взаимодействия* системы, ее сторон и свойств; связи *порождения*, раскрывающие генезис (возникновение, становление); связи *преобразования*; связи *строения* (структуры); связи *функционирования*; связи *развития*, которые вызывают и определяют существенные изменения в строении системы и формах ее существования (жизни); связи *управления*, которые предопределяют разновидности функциональных связей и связей развития. Этот принцип нацеливает исследователя на необходимость выделения из всей совокупности связей РЛ системы основной (системообразующей), которая совместно с соответствующими элементами порождает интегративное качество этой системы, ее специфику.

Принцип структурности. Отражает: а) структурную адекватность системы окружающей среде (первичность структуры среды и вторичность структуры отражающей ее системы) и б) зависимость эффективности функ-

⁴⁵ Шептулин А.П. Категории диалектики. М. : Высшая школа, 1971. 279 с.; Шептулин А.П. Диалектический метод познания. М. : Политиздат, 1983. С. 152–173 и др.

ционирования сложной системы от собственной структуры, то есть от характера связей ее элементов. Он ориентирует исследователя, методолога или идеолога РЛ системы на то важнейшее обстоятельство, что при разработке (исследовании) системы необходимо исходить, во-первых, из объективных законов ее становления, функционирования и развития, во-вторых – из рассмотрения способа установления связей и отношений между элементами самой РЛ системы как единства противоположностей. С одной стороны, структура должна придавать системе прочность, устойчивость, высокую степень сопряженности всех ее компонентов и, следовательно, способность противостоять воздействиям воздушного противника в качестве самостоятельного, не растворяющегося в надсистеме некоторого системного образования. С другой стороны, структура должна обладать свойством подвижности, гибкости, изменчивости и, следовательно, обеспечить возможность преобразования, развития РЛ системы и появления у нее нового интегративного (системного) качества. Этот принцип подчеркивает, что РЛ системе (как и любой сложной системе) присуще множество самых разнообразных связей и, следовательно, структур. Значит, ей присуща *многокачественность*.

Принцип системности. Предусматривает изучение исследуемого объекта или решаемой проблемы как системы, то есть с использованием компонентного, структурного, функционального (функционально-стоимостного), параметрического, генетического и атрибутивного (качественного) видов анализа. При этом комплекс применяемых методов должен быть максимально сбалансирован.

1. Компонентный анализ. Предполагает исследование объекта как сложной системы, каждый элемент которой представляет собой систему меньшего порядка (подсистему), а сам рассматриваемый объект – элемент системы более высокого порядка (надсистемы).

2. Структурный анализ. Предполагает определение (установление) видов связей между компонентами объекта.

3. Параметрический анализ. Предполагает установление пределов (физических, экономических и др.) качественного развития объекта. С этой целью выявляют ключевые (в т. ч. и технические) противоречия, препятствующие дальнейшему развитию объекта в целом. Затем ставится задача по устранению этих противоречий за счет новых решений. При проведении параметрического анализа используются данные об уровне выполнения главной и некоторых дополнительных функций объекта.

4. Генетический анализ. Предполагает исследование истории развития (генезиса) объекта (на всех стадиях жизненного цикла) от «идеи» до морального старения и физического распада.

5. Функциональный анализ. Предполагает рассмотрение объекта как комплекса выполняемых им функций (а не как материально-вещественных структур). Функциональный анализ исходит из того, что в анализируемом объекте полезным функциям всегда сопутствуют вредные и нейтральные функции.

6. Функционально-стоимостный анализ. Предусматривает комплексное технико-экономическое исследование функций и параметров объектов и выработку рекомендаций по минимизации затрат на стадиях проектирования, создания и использования системных объектов при сохранении или повышении ими качества исполнения своих функций. Выражается в упоминавшихся ранее показателях «эффективность/стоимость».

7. Атрибутивный (качественный) анализ. Предполагает исследование системы как совокупности свойств, внутренне ей присущих. Данный вид анализа выявляет качественную определенность системы, то есть позволяет выяснить, чем, какими свойствами одна система отличается от другой.

Принцип развития. Являясь междисциплинарной интерпретацией соответствующего принципа диалектики, он ориентирует исследователя на изучение движения (функционирования и развития) сложной системы как процесса количественных и качественных изменений, обуславливающих ее переход с одного уровня целостности к другому. Основным принципом этого движения является *диалектическое отрицание*, при котором очередное целостное состояние системы включает в себе остатки прошлого, настоящего, составляющее именно ее качественную специфику, и элементы будущего ее состояния.

Принцип функционального среза. Заключается в том, что при построении системы в нее должны входить только те материальные образования и только в таких взаимодействиях, которые существенны в создании глобального эффекта этой системы.

Принцип функционального эквивалента. Состоит в том, что в процессе формирования той или иной системы можно осуществлять замену или преобразование любого элемента этой системы при условии поддержания ее на заданном уровне или улучшении общего эффекта.

Принцип моделируемости. Сложная система представима конечным множеством моделей, каждая из которых отражает определенную грань ее сущности. При этом выявление новых свойств и сущностей необязательно должно сопровождаться построением обобщающих моделей, а может ограничиваться наращиванием уже существующих. Отображение сложной системы в целом обеспечивается взаимодействием упрощенных моделей.

Этот принцип дает возможность изучать (исследовать) определенное свойство или группу свойств РЛ системы при помощи одной или несколь-

ких упрощенных (узкоориентированных) моделей, поскольку модель, ориентированная на определенную группу свойств сложной системы, всегда проще самой системы. В то же время, создание полной модели для сложной системы бесполезно, так как такая модель будет столь же сложной, как и моделируемая система. Поэтому сложность модели РЛ системы должна соответствовать информации о закономерностях моделируемого объекта, а неправомерное усложнение модели, основанное лишь на соображениях умозрительного плана, а не на твердо установленных эмпирических данных и качественных законах, может привести к теоретическому произволу и ошибочным рекомендациям. Доказательство существования и стабильности сколь угодно узкоориентированных моделей РЛ системы основывается на постулате дополненности, а оценка пределов этой стабильности – на постулате неопределенности.

Что касается **этапов системного анализа**, то здесь среди специалистов нет единого мнения, и вся совокупность сложившихся подходов может быть разделена на два основных направления. Первое связано с анализом сложных проблемных ситуаций с использованием моделей, позволяющих определять показатели привлекательности альтернатив без моделирования операций (вариантов поведения или функционирования) систем. Второе основано на методах теории эффективности, применение которых предусматривает использование моделей операций сложных систем⁴⁶. Рассмотрим второе направление более подробно.

Системное моделирование.

Поскольку создать достаточно эффективную общую теорию систем до сих пор не удалось, постольку основным способом решения исследовательских проблем системотехники выступает *моделирование*. Являясь одновременно и методом, и методологическим средством, оно обеспечивает непосредственный выход на проблему разработки адекватной модели искомой системы, либо эффективной модели ее совершенствования и развития.

В свою очередь, методология системного подхода, как и общая теория систем, также находится в стадии становления. Здесь пока еще не выработан единый подход к процедурам и логике разработки системной модели объекта. Нет единства мнений и по количеству минимально необходимых этапов ее разработки. Тем не менее, ряд специальных научных исследований проблем системного моделирования позволяет выделить в качестве исходных некоторые принципы и обобщенные этапы разработки модели сложной системы.

⁴⁶ Подробнее см. : Коломоец Ф.Г. Системный анализ: методологический и содержательный аспект // Военная мысль. 2006. №4. С. 63–70.

К основным принципам моделирования относятся принципы конкретности, оптимальности и непрерывности. *Принцип конкретности* ориентирует исследователя на создание системной модели конкретного объекта. *Принцип оптимальности* предполагает, что создаваемая модель должна содержать исчерпывающую информацию об оптимальных путях и способах функционирования и развития объекта, а сам избранный вариант моделирования и способ его интерпретации (опредмечивания) должны быть оптимальными.

Принцип непрерывности обусловлен постоянной изменчивостью элементов, связей, структуры системы и внешних условий ее функционирования как своеобразного «живого» организма и, следовательно, невозможностью разработки абсолютно точного прогноза развития системы. Он ориентирует исследователя на получение максимально достоверной информации о моделируемом объекте и непрерывную корректировку модельных представлений в соответствии с полученной информацией. Основные этапы моделирования представлены на рис. 1.6.

В целом модель сложной системы строится на основании эмпирических или предположительных (гипотетических) данных, которые являются формальным представлением наблюдаемых или воображаемых событий. Модель позволяет увязать воедино многочисленные процессы и проследить влияние на эти процессы различных условий (входных данных). Аппарат модели – многократное воспроизведение взаимодействия процессов. Проверка адекватности модели осуществляется сравнением контрольных результатов с экспериментальными. При несовпадении модели с оригиналом происходит ее коррекция. Основными способами построения модели являются опыт, догадка, имитация и аналогия.

Одно из главных достоинств модели – возможность использования ее в качестве аппарата объединения и получения выводов при известных исходных закономерностях. Моделирование в этих условиях используется как средство упрощения, выявления разных граней или форм проявления сущности сложных систем. Использование такой многомодельности здесь вполне оправдано, поскольку полное описание любой достаточно сложной системы в рамках какого-то одного

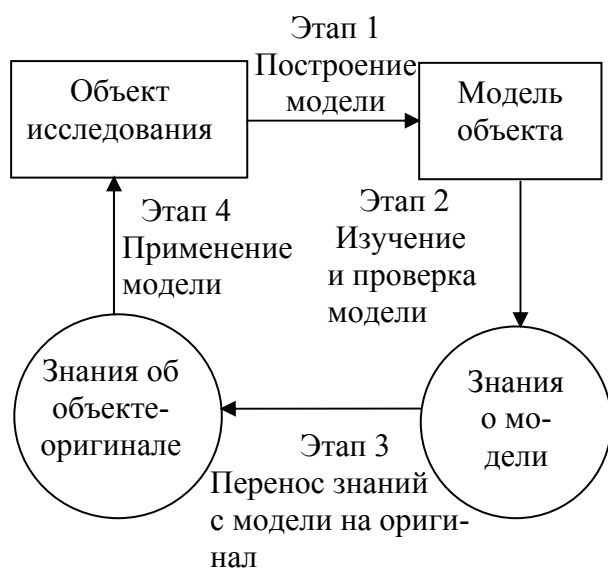


Рис. 1.6. Этапы моделирования системы

представления (контекста) является принципиально невозможным в силу ограниченной пропускной способности исследователя этой системы. Исследователь, пытаясь обработать всю эмпирическую информацию, связанную с этим описанием, неизбежно утопает в ней. Путь к пониманию бесконечного множества конкретных явлений, описываемых одной концепцией, оказывается слишком длинным и, следовательно, неконструктивным.

Как пишет в этой связи А.И. Яблонский, «сложная система описывается, как правило, при помощи набора сравнительно независимых контекстов, каждый из которых дает лишь частичное знание о системе в целом, но полное по отношению к данному контексту». Поэтому «представление о многоаспектном описании сложной системы является одним из основных методологических принципов современного научного мировоззрения»⁴⁷.

Такая модель воспроизводит (имитирует) сложную систему в определенном диапазоне условий и требований, при этом допустима в том числе несовместимость и противоречивость моделей, что отражает их эмпирическую и прагматическую сущность.

Следует подчеркнуть, что в ряде работ по общей теории систем предпринимаются попытки разработать методологию системного моделирования с привлечением аппарата термодинамики необратимых процессов или с привлечением аппарата теории множеств. В этом случае модель представляет собой некоторую абстракцию при отвлечении от природы составляющих ее объектов и их связей. По мнению авторов, такой подход призван «очистить» результат от наслоений, связанных с особенностями используемого предметного языка описания, и выявить нечто, присущее лишь самой теории систем, безотносительно к самому предметному языку. Вместе с тем применение такой методологии к построению моделей реальных сложных систем встречает значительные трудности либо из-за тривиальности основных следствий предельно абстрактной теории, либо из-за сложности «привязки» и интерпретации абстрактных выводов и рекомендаций к конкретным практическим задачам системного моделирования. Поэтому процесс моделирования того или иного аспекта поведения сложной системы всегда неформален и имеет феноменологическую (эмпирическую) основу.

В рассматриваемом случае объектом моделирования выступает некоторая радиолокационная система как целостное, открытое, управляемое и в то же время самоорганизующееся и саморазвивающееся явление социальной действительности, состоящее из комплекса взаимосвязанных с помощью некоторого системообразующего фактора элементов, в которой

⁴⁷ Яблонский А.И. Модели и методы исследования науки. М. : Эдиториал УРСС, 2001. С. 301.

протекает множество вещественно-энергетических и энергоинформационных процессов различного качества.

Субъектную роль в моделировании этой системы выполняют федеральные структуры различных уровней, штабы, научно-исследовательские институты, учебные заведения, органы государственной власти. Процесс формирования и реализации модельных представлений о радиолокационной системе можно характеризовать как целенаправленную и последовательную реализацию субъектом моделирования принципов системного, информационного, синергетического, ситуационного и деятельностного подходов по отображению в модели ее важнейших элементов, свойств, связей и отношений и использование созданной модели для повышения качества реально существующей радиолокационной системы.

В методологии системного подхода принято считать, что системная модель имеет тем более высокий уровень интеллектуальности, чем более развитые средства борьбы с неопределенностью используемой информации в ней предусмотрены. Поэтому обоснование модели РЛ системы связано с выбором оптимальной формы преодоления информационной (априорной) неопределенности относительно основных параметров объекта моделирования.

К настоящему времени наибольшее развитие применительно к задачам преодоления априорной неопределенности получил аппарат статистического синтеза динамических информационных систем, основанный на теории статистических решений. В заключительной главе монографии (как уже отмечалось) будут рассмотрены некоторые варианты применения этого подхода к разработке концептуальной модели радиолокационной системотехники и задачам статистического синтеза систем адаптивного обнаружения-измерения параметров радиолокационных сигналов в условиях априорной неопределенности относительно параметров обстановки. При введении некоторых ограничений этот аппарат может быть применен и для получения аналитического выражения, отражающего зависимость эффективности РЛ системы (как и соответствующей надсистемы) от ряда статистически заданных внутренних и внешних параметров (параметров самой РЛ системы и параметров того или иного варианта воздушной обстановки). С определенной долей условности эту аналитическую зависимость можно назвать математической моделью РЛ системы. Материал, отражающий рассматриваемые вопросы, размещен в заключительной части данной главы.

Вместе с тем применение аппарата теории статистических решений к задачам статистического синтеза сложных информационных систем оказывается возможным только потому, что удастся найти приемлемые варианты описания априорной неопределенности относительно законов распределения вероятностей для всех величин, ситуаций, процессов, относящихся к синтезируемой системе. При синтезе самой РЛ системы (по причине

наличия в ней субъективного компонента управляющей подсистемы) получить эти законы распределения пока не удастся. Поэтому процесс разработки такой модели носит преимущественно качественный характер.

Завершая описание системной методологии, укажем на одно немаловажное обстоятельство. В процессе обсуждения принципов, постулатов и методов системотехники может сложиться впечатление, что вся их совокупность лишена внутреннего единства и носит эклектический характер: принцип моделируемости противоречит постулату целостности, принцип физичности представляется несовместимым с принципом целенаправленности и т. д. Однако это не так. Если обратиться к структуре матрицы всеобщей технологии (рис. 1.2), несложно прийти к выводу, что исследование технологического движения вещества, энергии и информации в социальных системах должно сопровождаться одновременным исследованием физической, химической и биологической природы этого движения. Дело в том, что социальная форма движения материи органически включает в себя все предшествующие формы движения – физическую, химическую и биологическую – подобно тому, как технологическое движение информации органически включает в себя технологическое движение вещества и энергии. Понятно, что игнорировать эту всеобщую связь нельзя. В системе все взаимосвязано, что и предопределяет необходимость ее изучения с различных точек зрения.

1.3.3. Основы системно-информационного подхода

Как было показано выше, теория исследования операций и тесно переплетающийся с ней системный подход обеспечивают выбор решений и оптимизацию сложных систем в условиях стохастической (так называемой «доброкачественной») неопределенности. В этом случае показатель эффективности W (см. подпараграф 1.3.1) оказывается зависимым от всех трех групп факторов: $W = W(\vec{\alpha}, \vec{x}, \vec{\xi})$, а оптимизационная задача ставится следующим образом: *при заданных условиях $\vec{\alpha}$, с учетом неизвестных факторов вектора $\vec{\xi}$, найти такое решение $x \in X$, которое, по возможности, обеспечивает максимальное значение показателя эффективности W .* Поскольку неизвестные факторы $\vec{\xi}$ являются статистически устойчивыми, постольку задачи оптимизации могут быть решены с помощью обычных методов теории вероятностей. В то же время, такой подход справедлив только лишь для явлений массового порядка, протекающих в повторяющихся или подобных условиях. Это **первое** существенное ограничение теории исследования операций.

Второе ограничение связано с наличием четырех вариантов методологического понимания категории «вероятность»: а) частотного, отражающего

количественные закономерности массовых случайных явлений; б) логического, определяющего отношение одной гипотезы к другим возможным; в) диспозиционного, отражающего особые условия испытаний или особые свойства опытной ситуации; г) субъективного, отражающего меру доверия субъекта к вероятности события. Очевидно, что в многомерных и многофакторных задачах столь сложная структура категории «вероятность» может дополнительно усложнить процедуры оптимизации сложных систем.

Третье ограничение связано со спецификой РЛ систем, функционирующих преимущественно в условиях случайных возмущений. *Во-первых*, даже в функционально устойчивой РЛ системе ГА могут возникать (и возникают) особые случаи использования (нарушения правил использования) воздушного пространства, статистическое описание которых провести не представляется возможным. Наиболее ярким примером таких событий является террористический акт 11 сентября 2001 г. в США, когда национальная РЛ система оказалась неспособной обнаружить и устойчиво сопровождать самолеты ГА, захваченные террористами. Поскольку речь идет о РЛ системе двойного назначения, мирные условия работы которой являются важной, но не единственной (и не главной) формой ее существования, возникает весьма широкий круг специфических задач, решение которых не всегда поддается статистическим методам анализа и синтеза. Достаточно сказать, что, несмотря на произошедшие за последние 40 лет несколько десятков локальных военных конфликтов с применением средств воздушного нападения, вывести какие-либо устойчивые законы распределения случайных событий и построить более или менее адекватную статистическую теорию воздушных боевых действий и операций до сих пор не удалось. С этой точки зрения весьма показательными являются выводы А.А. Ноговицына и В.В. Барвиненко, сделанные ими на основе анализа опыта современных локальных войн. «Анализ способов действий СВН в локальных войнах последнего времени, – пишут авторы, – показывает, что их невозможно отнести к какой-либо традиционной форме военных действий. С одной стороны, это не боевые действия, так как они были тесно увязаны общей целью, задачами и способами их выполнения, а с другой – это и не классическая операция, для которой характерны заблаговременное планирование объектов ударов и распределение по ним сил и средств, а также определенный срок ее проведения... **В данном же случае осуществлялся переход от действий по заранее осуществленному плану к действиям, когда выбор объекта ударов и распределение по ним конкретных сил и средств проводятся непосредственно перед ударом**»⁴⁸. Понятно, что спрогнозировать такие удары обороняющейся стороной доста-

⁴⁸ Ноговицин А.А., Барвиненко В.В. Развитие способов и форм боевых действий: информационный аспект // Военная мысль. 2004. №2. С.2–7.

точно сложно. Во-вторых, РЛ системы относятся к классу информационных конфликтных систем, для которых характерна неопределенность либо относительно состояния системы, либо относительно содержания складывающегося конфликта. В таких системах стохастическая неопределенность принимает форму информационной неопределенности, относительно которой вероятностный подход не имеет канонизированных форм и меры.

Речь идет о нестохастической (так называемой «дурной») неопределенности, проявляющейся в случаях, когда: а) распределение вероятностей для параметров $\vec{\xi}$ существует, но к моменту принятия решения оно не может быть получено; б) распределение вероятностей для параметров $\vec{\xi}$ не существует, то есть эти параметры нельзя считать случайными.

В рамках рассмотренной выше теории исследования операций предпринимались попытки удовлетворительного решения такой проблемы. В частности, в первом случае рекомендуется адаптивный алгоритм оптимизации. В этом алгоритме некоторые элементы решения x остаются свободными, изменяемыми. В исходном состоянии выбирают некоторый вариант решения, не обязательно наилучший, и пускают систему в ход. По мере накопления опыта, целенаправленно изменяя свободные параметры решения, добиваются роста эффективности без предварительного знания статистики событий.

Во втором случае выбирают не решение x , оптимальное для каких-то условий $\vec{\xi}$, подобно детерминированной ситуации, а некоторое *компромиссное* из альтернативных решение, которое не будучи оптимальным ни для каких условий, будет все же приемлемым в целом их диапазоне (метод «крайнего пессимизма»: при принятии решения всегда рассчитывают на худший исход и принимают то решение, которое дает максимальный эффект в наихудших условиях). Если в этих условиях будет получен выигрыш $W = \bar{W}$, то можно гарантировать, что в любых других он будет не меньше. Такой принцип выбора решения называют принципом *гарантированного результата*. Область его применения в основном связана с конфликтными ситуациями, в которых условия зависят от разумно действующего противника, отвечающего на действия противостоящей стороны наихудшим для нее способом.

Еще одним методом сведения задачи с дурной неопределенностью к стохастической задаче является метод экспертных оценок, результаты которого подвергаются обработке методами математической статистики. В целом такая оптимизационная задача опирается на некоторую область «приемлемых» решений, которые оказываются несущественно хуже других, какой бы точки зрения тот или иной эксперт не придерживался. В пределах этой области и должны приниматься окончательные решения.

В то же время даже поверхностный анализ изложенных вариантов оптимизации в условиях «дурной» неопределенности указывает на их низкую эффективность. Адаптивный метод требует значительного ресурса времени, которым системы в условиях конфликта обычно не располагают. При применении метода гарантированного результата приходится учитывать, что это хоть и гарантированный, но заведомо плохой результат (лучший из худших). Что касается метода экспертных оценок, то и он требует определенного ресурса времени и стационарности анализируемой ситуации. К тому же в такой технологии принятия решений присутствует изрядная доля субъективизма.

В этом случае на первое место выступает информационный (системно-кибернетический) подход, который в ряде случаев существенно дополняет системологию и теорию исследования операций в задачах анализа состояния сложных систем и условий среды. Если первые два подхода относительно ситуации «дурной» неопределенности не имеют канонизированных форм и нормы, то информационный подход оперирует такими категориями, как *информационная неопределенность* и ее мера (энтропия), *информация* и ее мера (количество, плотность, значение, смысл и ценность), а также *мера сложности* (организации) системы.

Энтропия как мера информационной неопределенности в задачах оптимизации сложных систем характеризуется рядом известных свойств, одновременно предопределяющих и ее практическую значимость.

Первое свойство – в случаях, когда одно из состояний системы достоверно, а другие невозможны, ее энтропия стремится к нулю. Применительно к практике анализа систем в условиях информационной неопределенности это свойство указывает на необходимость сосредоточения усилий на достоверном состоянии, направлении, временном интервале или других достоверных событиях, наличие которых принципиально возможно. Проведя количественную оценку энтропии $H(x)$ для состояния данной системы или ситуации, можно одновременно оценить объем информации $I(x)$, требуемый для устранения возникшей информационной неопределенности в интересах принятия обоснованного решения. Объем такой информации, в соответствии с принципом гарантированного результата, не должен быть меньше уровня энтропии, то есть $I(x) \geq H(x)$. Достоверность принятых решений будет тем выше, чем ниже уровень неопределенности в момент принятия этих решений. В обратной задаче (в задаче информационного противодействия) поток энтропии (поток информационной неопределенности), создаваемый системой в интересах скрытия своего состояния и целевой функции, должен превышать объем информации, накопленной о ней противостоящей системой, то есть $H(x) > I(x)$. Очевидно, что степень выживаемости системы в этих усло-

виях тем выше, чем выше плотность потока энтропии, создаваемой ею в адрес противника.

Второе свойство – аддитивность, то есть возможность оценивать N подсистем в рамках единой системы с оценкой суммы энтропий элементов системы. Дело в том, что важнейшей структурной особенностью среды является возможность ее разложения на относительно независимые подсистемы. При этом параметры, которые считались связанными, могут быть преобразованы в относительно независимые, что позволяет путем декомпозиции разделить совокупность параметров на сравнительно независимые группы и свести многомерную задачу к набору (сумме) задач меньшей размерности. Например, если в зоне РЛ системы находится некоторый поток целей неопределенного класса, а координаты, скорости и интенсивности отраженных от них сигналов неизвестны, то энтропия РЛ информации $H(x)_{\Sigma}$ относительно общей воздушной обстановки

$$H(x)_{\Sigma} = H_1(x_1) + H_2(x_2) + H_3(x_3) + H_4(x_4),$$

где $H_1(x_1)$ – неопределенность в оценке класса целей; $H_2(x_2)$ – неопределенность в оценке координат целей; $H_3(x_3)$ – неопределенность в оценке скоростей целей; $H_4(x_4)$ – неопределенность в интенсивности отраженных сигналов.

Свойство аддитивности существенно упрощает процедуру оценки степени информационной неопределенности сложной системы. При этом для оценки данных уровней неопределенностей используются статистические значения параметров x_1, x_2, x_3, x_4 , ожидаемых при планировании РЛ системы либо непосредственно получаемых в ходе воздушного удара. Свойство аддитивности энтропии будет задействовано авторами в процессе синтеза измерителей параметров сигналов на фоне внешних помех, при котором оценка неизвестных параметров помех (адаптация к помеховой обстановке) и оценка неизвестных неинформативных параметров сигнала (адаптация измерителя к неинформативным параметрам сигнала) осуществляется отдельно, что позволяет существенно упростить процедуру синтеза и структуру измерителя.

Третье свойство состоит в том, что энтропия выступает не только в качестве меры информационной неопределенности, но и меры сложности системы. Как известно, в теории информации мера системной организации (мера сложности или избыточности) сообщений определяется соотношением Шеннона $R = 1 - H / H_{\max}$, где $H = -\sum p_i \ln p_i$ – энтропия данного множества сообщений; p_i – вероятность состояния i -го сообщения; H_{\max} – максимально возможная энтропия, характеризующая в определенном

смысле «бесструктурное» множество данной совокупности сообщений. Впоследствии выяснилось, что это соотношение имеет более широкую интерпретацию, которая позволяет выйти за рамки чисто информационных представлений и использовать подобную меру в задачах структурного анализа сложных систем разной природы. В частности, представляя собой меру структурной организации (меру избыточности сложных систем), это соотношение удовлетворяет естественным физическим требованиям, которым должна удовлетворять подобная мера. В случае максимального порядка (энтропия системы минимальна, то есть $H = 0$) эта мера равна единице. В случае максимального беспорядка (энтропия системы максимальна, то есть $H = H_{\max}$) эта мера равна нулю независимо от «абсолютной» меры беспорядка H_{\max} . Относительный же характер меры позволяет сравнивать по степени организации системы с разными значениями максимальной энтропии, что было бы невозможно, например, при измерении структуры абсолютными значениями энтропии или ей противоположными значениями негэнтропии. Введение понятия сложности средств или систем, обеспечивающих возможность получения и обработки максимального объема информации $I(x)_{\max}$ для заданных условий, позволяет также решать и обратную задачу – по величине требуемой $I(x)_{\max}$ определять потенциальное значение $H(x)_{\max}$, при котором эти средства и системы могут функционировать в условиях максимального уровня неопределенности.

Методы оценки различных уровней $H_i(x_i)$ известны, и их применение позволяет качественный термин «информационная неопределенность» заменить количественной мерой и перевести оптимизационные процессы на уровень количественных оценок⁴⁹. Применительно к задачам оптимизации РЛ систем известное из литературы описание неопределенности можно распределить по нескольким уровням.

Четвертый (максимальный) уровень. Возможен на этапе подготовки к отражению воздушного удара или в процессе самого удара в условиях массированного применения противником средств радиоэлектронного противодействия (РЭП), малоразмерных целей и высокоточного оружия. Если рассматривать некоторое сечение радиолокационного поля (РЛП) локальной группировки радиусом r и площадью $S = \pi r^2$ (объектовая оборона), то оценка неопределенности в этом случае определится как энтропия равновероятного распределения информационного параметра (например, плотности потока целей n), то есть $H(n) = \log_2(2\pi r)$. В пределах РЛП как некоторой полусферы $H(n) = \log_2\left(\frac{2}{3}\pi r^3\right)$.

⁴⁹ Бурмистров С.К., Мацюк В.В. Информационный подход в решении военных задач // Военная мысль. 2004. №12. С. 30–34.

Третий уровень. Характерен для ситуации отражения локального воздушного удара на ограниченном интервале времени. В этом случае оценка уровня неопределенности рассчитывается как энтропия равновероятного распределения в пределах телесного угла $d\Omega = \cos \varepsilon d\varepsilon d\beta$ РЛП группировки:

$$H(n) = \log_2(d\Omega),$$

где $d\varepsilon$, $d\beta$ – угловые размеры $d\Omega$ соответственно в угломестной и азимутальной плоскостях; ε – угловое положение биссектрисы $d\Omega$ относительно линии горизонта при заданном значении азимута.

Второй уровень. При известном значении математического ожидания m_n уровень информационной неопределенности соответствует энтропии экспоненциального распределения, отвечающего условиям спада (наращивания) усилий противника (в рассматриваемом случае – плотности потока целей n в пределах РЛП группировки):

$$H(n) = \log_2 [m_n] \log_2 e,$$

где e – основание натурального логарифма.

Первый уровень. При действии воздушного противника в пределах некоторого телесного угла $d\Omega$ и при наличии среднеквадратичной ошибки в оценке этих действий σ_n уровень информационной неопределенности рассчитывается как энтропия нормального закона распределения:

$$H(n) = \log_2 \left(\sigma_n \sqrt{2\pi e} \right).$$

Таким образом, информационный подход к задачам оптимизации сложных систем позволяет: а) перевести понятие «неопределенность» с качественного на количественный уровень с обоснованием объема требуемой информации для устранения неопределенности в рассматриваемой ситуации; б) количественно оценить достоверность (оптимальность) принимаемых решений; в) информационно описать средства и системы различного назначения; г) обосновать новые свойства при создании, совершенствовании и развитии систем, такие как *информативность*, которая обеспечивает обоснованность принятия решения, *информационную избыточность* (недостаточность), *информационную надежность* (устойчивость), *пропускную способность* и др.

В целом информационный подход представляет собой важный компонент междисциплинарной методологии и его применение в совокупности с системным, вероятностным и другими подходами способно обеспе-

чить более эффективное решение задач оптимизации сложных систем. Один из вариантов применения этого подхода будет изложен ниже на примере обоснования информационной модели РЛ системы.

1.3.4. Синергетика как теория и методология неравновесных систем

1.3.4.1. Краткая характеристика проблемной ситуации в синергетике

Как было показано выше, многие объекты субъективной и объективной реальности могут рассматриваться как системы, состоящие из множества частей, взаимодействующих друг с другом более или менее сложным образом. В процессе этого взаимодействия, посредством кооперации отдельных частей, у системы появляются новые качества, не сводимые к качеству отдельных ее элементов. При этом некоторые из новых качеств явным или неявным образом проявляют эффекты самоорганизации. Для сложных систем, находящихся в устойчивом состоянии, эффекты самоорганизации сводятся к сохранению своей «индивидуальности» и поддержанию устойчивости посредством петли отрицательной обратной связи.

Идеальной формой отражения сущности такого вида систем является общая теория систем. Впоследствии выяснилось, что по-настоящему сложные системы возникают и самоподдерживаются на тонкой границе между хаосом и порядком и для их удовлетворительного теоретического описания арсенала методологических средств классического системного подхода уже недостаточно. Существенные теоретические трудности возникли и при объяснении фактов самоорганизации с позиций информационного подхода и энтропии.

В этой связи, в рамках постнеклассической научной рациональности, наряду с общей теорией систем и кибернетикой, возникла и стала успешно развиваться новая отрасль научного знания – синергетика, которую ее основатель Герман Хакен определил как общую теорию коллективных пространственных, временных или функциональных макроструктур⁵⁰. Отражая процессы развития и самоорганизации сложных систем произвольной природы,

⁵⁰ Haken H. Synergetics – An Intorduktion; Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organisation in Physics, Chemistry and Biology. Springer-Verlag, 1977. (Русский перевод: Хакен Г. Синергетика. М., 1980); его же: Haken H. Advanced Synergetics: Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices. Springer-Verlag, 1993. По оценкам некоторых экспертов, достижения синергетики к настоящему времени представлены в серии монографий издательства Springer, насчитывающей более 100 томов.

синергетика унаследовала и стала развивать универсальные, междисциплинарные подходы своих предшественниц: тектологии А.И. Богданова, теории систем Л. фон Берталанфи, кибернетики Н. Винера. И хотя генезис этих отраслей науки несколько отличается (биология и кибернетика в случае ОТС, теоретическая физика в случае синергетики), однако между их предметными областями существует некоторое пересечение. В рамках синергетики приоритет отдается изучению существенно нелинейных, в том числе быстро развивающихся, процессов, которые при определенных условиях флуктуации (внутренней или внешней) могут привести систему к качественным изменениям – простому распаду или к фазовому переходу, то есть формированию новых относительно устойчивых структур. Не случайно центральными вопросами этой отрасли научного знания применительно к сложным системам, проявляющим свойство нелинейности, самоорганизации и диффузности, являются вопросы: *в каких условиях и по каким причинам в этих системах порядок уступает место хаосу? Каким образом из хаоса может вновь возникнуть порядок?* Поэтому синергетика оказалась не только полезным, но и весьма своевременным дополнением к междисциплинарной методологии, занимающейся изучением и объяснением общих свойств и признаков сложных систем, находящихся вдали от состояния равновесия.

Главной спецификой познания сложных систем, находящихся на грани устойчивости, является обилие информации, которую требуется переработать для их детального описания. И если сжатие информации до приемлемых размеров в рамках системного и кибернетического подходов сопровождается, как правило, ее частичной потерей, то при синергетическом подходе сжатие информации происходит без каких либо потерь за счет перехода от параметров состояния системы к параметрам порядка на основе так называемого принципа подчинения.

В научной литературе выделяют три научные школы, теоретические разработки которых оказались базовыми для синергетики: российская школа нелинейной динамики (Л.И. Мандельштам, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий); бельгийская школа диссипативных (лат. *dissipatio* – рассеяние) процессов И. Пригожина; немецкая школа лазерной физики Г. Хакена. Как и в случае с соотношением теории исследования операций и ОТС, место синергетики в «методологической сетке» общенаучной методологии до сих пор однозначно не определено, что вызывает научные дискуссии. К настоящему времени стало преобладать представление о синергетике как о междисциплинарной методологии, пытающейся «в сетевых образцах ассоциировать методологию всех предшествующих течений»⁵¹, либо как об отрасли научного знания, которая

⁵¹ Аршинов В.И., Буданов В.Г. Когнитивные основания синергетики // Синергетическая парадигма. М. : Прогресс-Традиция, 2002. С. 76.

«решительно преодолевая междисциплинарный статус, быстро превращается в ответственного носителя новой парадигмы»⁵².

Подобные представления усиливаются по мере осознания научным сообществом того обстоятельства, что рассмотренные ранее гомеостатические процессы, протекающие в сложных системах, охватываются синергетикой как частный случай их эволюции. Тем не менее, в реальной научной практике теоретическое и методологическое самоопределение синергетики все еще продолжается, сопровождаясь, с одной стороны, весьма внушительным и стремительно нарастающим количеством статей, обзоров, монографий и учебных пособий различного уровня теоретического обобщения и формализации, а с другой – не прекращающейся критикой ее претензий на междисциплинарный статус со стороны определенной части научной общественности.

Здесь, как и в самом системном движении, присутствуют различные, нередко противоречивые, интерпретации, комментарии и трактовки основных идей синергетики, некогда сформулированных ее основателями. И хотя состояние дел несколько отличается в лучшую сторону от положения, сложившегося в свое время вокруг диалектического метода К. Маркса, при котором вариантов его интерпретации оказалось едва ли не столько, сколько и самих философов-интерпретаторов⁵³, разброс мнений относительно основного содержания синергетики и ее методологического статуса в научно-дисциплинарном комплексе все еще весьма значителен.

Вот как эти проблемы характеризует В.Г. Буданов: «Тот факт, что модели синергетики эффективны в естествознании ни у кого не вызывает сомнений... Открытым остается вопрос, так ли они адекватны в гуманитарных и междисциплинарных задачах...? Сами синергетики верят в успех проекта, и небезосновательно. Еще в 80-х годах прошлого века... Сергей Павлович Курдюмов поражал коллег-математиков заявлением, что в XXI веке большинство задач математического моделирования будут связаны с экономикой и социогуманитарной сферой, междисциплинарными проектами. Сегодня эта тенденция очевидна всем... Тем не менее, все еще

⁵² Баранцев Р.Г. Синергетика в современном естествознании. М. : Едиториал УРСС, 2003. С. 109.

⁵³ Как известно, К. Маркс, реализовав диалектический метод в социально-экономической теории капитализма, не нашел времени изложить его сущность в отдельной статье. Позднее он заметил: «Если бы когда-нибудь снова нашлось время для таких работ, я с большим удовольствием изложил бы на двух или трех печатных листах в доступной здравому человеческому рассудку форме то *рациональное*, что есть в методе, который Гегель открыл, но в то же время и мистифицировал» [Маркс К., Энгельс Ф. Соч. 2-е изд. Т. 29. С. 212]. Поэтому его последователи вынуждены были выявлять содержание метода, анализируя труды классика. В настоящее время имеется около десятка основных версий диалектического метода, в чем-то схожих, но и во многом отличных, и представитель конкретной научной дисциплины, в случае необходимости, оказывается перед непростой проблемой выбора той или иной версии метода и варианта его интерпретации.

слышны окрики: нельзя применять синергетические модели в социогуманитарном знании; не существует никакой междисциплинарной методологии; а исследования в этих сферах лишь отвлекают людей от занятий «нормальной» дисциплинарной наукой, обнадеживают пустыми обещаниями, ...пора объявить синергетику лженаукой и т. д. ...Так было в середине 1990-х, в 2000-х, эта компания продолжается и сейчас...»⁵⁴.

В этом взаимоисключающем многообразии мнений и состоит основная сложность исследования синергетики не только с точки зрения определения ее места в научно-дисциплинарном комплексе, но и с точки зрения удовлетворительного описания основного содержания, до сих пор представленного несколькими вариантами понятийно-категориального аппарата и разноуровневым набором методологических принципов. Поэтому при рассмотрении синергетики, как и в случае с системным подходом, мы не ставим в качестве самостоятельной задачу всестороннего и глубокого исследования этой формирующейся отрасли научного знания, ограничиваясь выявлением некоторого системно-синергетического инварианта (своеобразного методологического ядра), полезного с точки зрения повышения эффективности проектной деятельности в области РЛ систем. Это ограничение исходит из предположения, что читатель уже некоторым образом знаком с понятийным аппаратом и основными идеями синергетики.

Обзор научной литературы, посвященной рассматриваемой проблеме, показывает, что все многообразие теоретических представлений о синергетике с определенной долей условности можно разделить на два относительно самостоятельных и вместе с тем пересекающихся и подвижных уровня: а) формализованный уровень, базирующийся на строгом математическом аппарате теории Марковских процессов; б) качественный уровень, базирующийся на полустечественном-полунаучном языке и удачно названный В.Г. Будановым **метафорической синергетикой**.

Основой формализованной синергетики считается физическая теория лазера, все концепции которой можно конкретно сформулировать и проверить на достоверность строгими аналитическими методами. Понятно, что применение подобных формализмов ограничено кругом научных задач естествознания, в частности, теоретической физики. Здесь находит свое проявление *принцип несовместимости*, согласно которому высокая точность теоретического описания несовместима с большой сложностью. Что касается качественного варианта, то речь идет о метафорическом переносе понятийного аппарата аналитической синергетики в методологию социально-гуманитарных научных

⁵⁴ Сайт С.П. Курдюмова «Синергетика»: spkurdyumov.narod.ru. Одновременно заметим, что сам исследователь функционирование синергетики рассматривает в трех аспектах: а) синергетика как картина мира (и мировоззрение); б) синергетика как междисциплинарная методология; в) синергетика как наука.

дисциплин, объекты которых хотя и не могут быть строго формализованы, но в которых уже возникла острая необходимость нахождения адекватных ответов на глобальные цивилизационные вызовы кризисного мира.

Очевидно, что метафорическая интерпретация синергетики создает благоприятный мотивационный фон для применения строгой конструктивной синергетической методологии в междисциплинарных исследованиях и проектах, поскольку научная метафора в современной картине мира является не только одной из важнейших форм научного знания, не только одним из мощных средств творческой деятельности, но и одним из эффективных каналов междисциплинарной коммуникации, то есть каналов переноса теоретических моделей из одной отрасли научного знания в другую.

Однако эта интерпретация содержит в себе и негативную тенденцию, связанную с опасностью неоправданного упрощения (своего рода «зашумления») междисциплинарных взаимодействий псевдосинергетическими ассоциациями и околonaучными понятиями, поскольку такой переход представляет собой лишь первый эвристический шаг, явно недостаточный для серьезных научных выводов. Поэтому очень важно, чтобы в процессе применения методологических и эвристических возможностей синергетики к задачам качественного анализа сложных систем вторая тенденция не возоблудала над первой. В этой связи представляется целесообразным в рамках основных идей и принципов синергетики выделить ее некоторый качественный инвариант, справедливый как для строгих естественно-научных задач, так и для качественных задач социально-гуманитарной практики.

1.3.4.2. Общая характеристика онтологических оснований синергетики

Пусть обсуждению подлежат системы, которые могут формировать пространственные, временные или функциональные структуры непосредственно самими системами в следующих случаях: а) без какого-либо целенаправленного вмешательства извне, б) под влиянием некоторого внешнего воздействия, носящего целенаправленный характер. В первом случае речь идет о биологических системах (растения и животные) и системах неживой природы, во втором – о социальных системах, включая системы «человек – техника – среда». Будем также полагать, что исследование происходит в таких ситуациях, при которых изменения (флуктуации) на микроуровне приводят к качественным изменениям систем в макроскопическом масштабе.

Исходной точкой для всех исследований в области синергетики является *адекватное описание состояния системы на разных уровнях*. Например, для микроскопического уровня РЛ системы описанию подлежит «поведение» (функционирование) отдельной РЛС. На мезоскопическом

уровне можно выделить некоторую совокупность РЛС определенной радиотехнической позиции. Наконец, на макроуровне в качестве объекта исследования выступает целостная РЛ система, ее поведение в тех или иных условиях внешней среды и ее качественные изменения в зависимости от характера изменений, происходящих в системе на микроуровне. При этом описание поведения системы на различных уровнях выполняется с помощью некоторой совокупности параметров, составляющих так называемый *вектор состояний* системы.

Поскольку исследованию подлежат сложные открытые системы, то есть системы, каждый элемент которой (а не только пограничные) обменивается с внешней средой (надсистемой) веществом, энергией и информацией, постольку для отражения взаимодействия системы со средой помимо вектора состояния вводится и вектор *управляющих параметров* (параметров управления), количество которых фиксировано. Эти параметры налагаются на систему извне и не меняются по мере изменения системы. Если структура сохраняется при изменении условий среды, то есть управляющих параметров, то система называется *структурно устойчивой*. Если же эта структура изменяется, принято говорить об *относительной неустойчивости* системы.

Синергетика рассматривает преимущественно те ситуации, в которых поведение системы претерпевает качественные изменения при изменении управляющих параметров. Если в условиях нового управляющего параметра система сама создает специфические структуры, принято считать, что такая система обладает свойством **самоорганизации**, а сама система называется *самоорганизующейся*. При этом строгим аналитическим методом было доказано, что во многих случаях поведение системы, близкое к точкам неустойчивости, может зависеть от характера изменения всего лишь нескольких переменных, называемых *параметрами порядка*. Более того, поведение отдельных частей системы детерминировано этими немногими факторами. В то же время эти параметры могут детерминировать не только порядок, но и представлять беспорядочные, хаотические состояния или управлять ими.

По утверждению Г. Хакена, параметры порядка играют доминирующую роль в концепции синергетики. Они «подчиняют» отдельные части, то есть определяют поведение этих частей. Поэтому *связь между параметрами порядка и отдельными частями системы* он отразил в виде **закона подчинения**. С определением параметров порядка практически завершается описание поведения системы. При этом вместо того, чтобы описывать поведение системы посредством многомерного описания отдельных ее частей, оказывается достаточным описать поведение только параметров порядка, чем достигается эффект огромного *информационного сжатия*.

В свою очередь, между параметрами порядка и частями системы существует обратная (необходимая и устойчивая) связь, заключающаяся в том, что отдельные части своим коллективным поведением сами генерируют параметр порядка. Эти устойчивые, повторяющиеся и необходимые связи явлений самоорганизации получили название **закона круговой причинной связи**. В технических системах такая круговая причинная связь известна как обратная связь. Параметр порядка в таких системах фиксирован ее разработчиком с самого начала, например, в форме задающего устройства или устройства управления. Однако в синергетических системах (включая системы «человек – техника – среда»), в отличие от устойчивых технических систем, параметры порядка могут создаваться отдельными частями самой системы. При этом между поведением параметров порядка и подчиненных им частей системы с течением времени существует фундаментальное различие: *параметры порядка реагируют на возмущения извне медленно, а части – быстро*; можно даже сказать, что в своей поведенческой динамике параметры порядка системы «живут» дольше, чем ее части.

Поскольку от параметров порядка исходят типичные виды поведения систем, рассмотрим характер поведения этих параметров несколько подробнее. Герман Хакен демонстрирует это поведение на примере изменения позиции абстрактного шарика на некоторой поверхности различной кривизны применительно к одному, двум и трем параметрам порядка.

Один параметр порядка. Состояние одного параметра порядка отражается в символической форме позицией шарика на холмистой поверхности. Когда шарик находится на дне ямки, имеется только одно состояние параметра порядка. Это состояние устойчиво. После каждого возмущения шар возвращается в позицию равновесия. При изменении управляющего параметра поверхность может искажаться, делая более плоской нижнюю часть углубления. Так как параметр порядка подвержен колебаниям, флуктуации могут при широком плоском дне ямки отодвинуть шарик далеко от первоначальной точки равновесия. Это явление называется *критическими колебаниями*. В то же время шарик все-таки возвращается к позиции равновесия, только очень медленно. Это явление называется *критическим замедлением*. Когда значение управляющего параметра превзойдет критическое, может появиться новый ландшафт – с двумя минимумами (ямками). Вышеупомянутая позиция шарика станет непостоянной, шарик теперь может скатиться в любой из двух минимумов (то есть имеет место нарушение симметрии). В этой ситуации маленькое колебание решит, в каком направлении будет двигаться шарик. Система может спуститься только в левый или правый минимум, что должно нарушить симметрию.

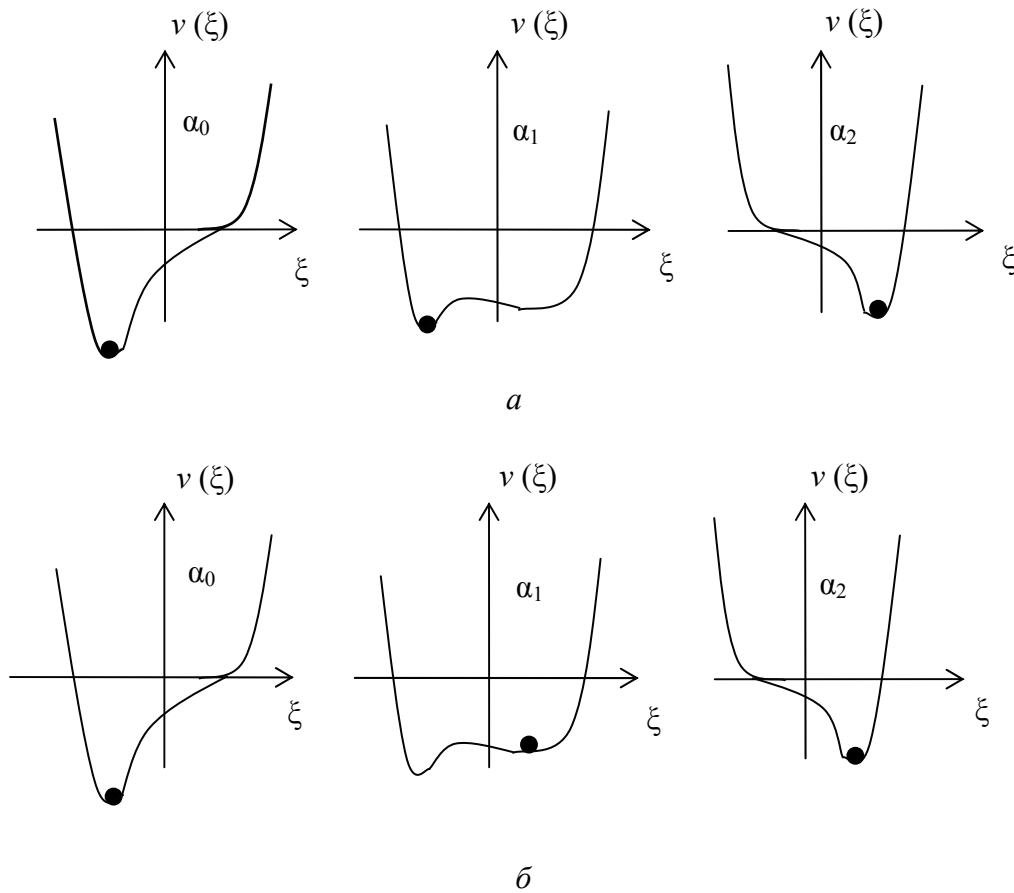


Рис. 1.7. Визуализация эффекта гистерезиса

Два параметра порядка. Значение некоторого управляющего параметра в случае двух параметров порядка представлено в форме ландшафта, изображенного на рис. 1.7. Если посмотреть на ряд рисунков 1.7,*а*, в левой части видно, что шарик, представляющий состояние параметра порядка, находится в самой низкой ямке. Средняя часть показывает, как с изменением значения управляющего параметра ландшафт искажается, но шарик все еще находится в старой позиции.

Наконец, по мере дальнейшего увеличения параметра управления, ландшафт приобретает «правую» форму. В правой части ряда изображено, как шарик занял новую позицию, указывающую, что параметр порядка и таким образом система в целом изменили свое состояние.

Если же изменить управляющий параметр в противоположном направлении (рис.1.7,*б*), то при одном и том же значении управляющего параметра, что и на рис. 1.7,*а*, шарик окажется в другой позиции (см. среднюю часть рисунка 1.7).

И хотя состояние системы фиксировалось при одних и тех же (трех) значениях управляющего параметра, однако последовательность, в кото-

рой задавались эти значения, сыграла различную роль в состоянии системы. Это значит, что: а) состояние системы *зависит от ее истории*, то есть от тех предыдущих состояний, из которых она пришла к настоящему состоянию, б) *для одного и того же значения управляющего параметра существуют два возможных состояния системы*. Двойственность перспектив развития системы и задержка, инерционность в ее переходе к качественно другому состоянию называется **гистерезисом**. Явление гистерезиса появляется потому, что существуют два, а не один параметр порядка. Другим примером неоднозначности поведения системы при наличии двух параметров порядка являются колебания поведения системы в пределах некоторых значений, называемые *ограниченными циклами*.

Три параметра порядка. В этом случае ситуация может быть подобна ситуации с двумя параметрами порядка, то есть возможно существование фиксированных точек, но могут появиться и ограниченные циклы. В то же время три параметра порядка могут демонстрировать и совершенно неправильное движение, называемое *детерминированным хаосом*. В этом случае говорят о чувствительности системы к начальным условиям, выдвигая на первый план проблему *предсказуемости* системы.

В качестве механического примера демонстрации чувствительности нелинейной системы к начальным условиям Г. Хакен использует небольшой стальной шар, который скатывается по почти вертикальному лезвию бритвы. В зависимости от позиции центра тяжести стального шара и наклона лезвия бритвы траектории движения шарика от опыта к опыту будут совершенно разными. В одном случае траектория будет идти влево, в другом случае – направо. Если визуализировать механизм, по которому стальной шар скатывается снова и снова, можно обнаружить ряд траекторий, которые в каждом случае принимают разную форму (известный аттрактор Лоренца). Это механическое изображение служит только для визуализации. Однако само хаотическое поведение параметров порядка базируется на строгих математических (абстрактных) соотношениях.

Таким образом, синергетика как междисциплинарное научное направление, исследующее универсальные закономерности процессов самоорганизации, эволюции и кооперации в сложных системах, базируется на серьезной научной традиции и солидном методологическом базисе в виде общей теории систем и кибернетики. Однако если для этих отраслей научного знания центральной категорией является информация, то для синергетики в том же качестве выступают категории «организация» и «самоорганизация». Если в кибернетике и классическом системном подходе оценивается количество информации в контексте оптимизации способов ее передачи, оценки скорости прохождения, полноты, достоверности, соот-

ветствия объема пропускной способности информационных подсистем соответствующих систем, а также в контексте поддержания в этих системах гомеостаза с помощью обратной связи, то синергетику интересует качественная сторона информации с точки зрения достижения (недостижения) системой нового устойчивого состояния. При этом синергетические модели, указывая общие ориентиры, не столько дают конкретное описание развития событий, сколько устанавливают некоторые эволюционные правила запрета, показывая, какие сценарии будущего состояния системы, в принципе, не реализуемы или не жизнеспособны в данной среде.

1.3.4.3. Стиль синергетического мышления

Характеристика стиля мышления.

Как известно, каждой исторической эпохе соответствуют: а) свой *тип научной рациональности*, отражающий степень достоверности эмпирических фактов, уровень развития научных теорий, методы науки, ее цели и ценностные установки; б) свой *стиль научного мышления*, характеризующийся соответствующей системой понятий и категорий, с одной стороны, и фундаментальными взглядами, идеями, утверждениями (постулатами теории) и методологическими принципами – с другой.

Академик В.С. Степин, исходя из специфики отношений между объектом и субъектом, а также уровня (глубины) научной рефлексии, выделяет классическую, неклассическую и постнеклассическую типы научной рациональности. *Классическая научная рациональность* рассматривает сущность и формы существования простых систем. В центре ее внимания находится собственно объект; при теоретическом объяснении исключается все, что относится к субъекту, средствам и операциям деятельности, и это считается необходимым условием получения объективно-истинного знания. *Неклассическая научная рациональность* исследует саморегулирующиеся системы. Однако она учитывает связи между знаниями об объекте и характере средств и операций деятельности субъекта, а выявление этих связей рассматривает в качестве условий объективно-истинного описания и объяснения мира. Известно, например, что в теории относительности метры и секунды **свои** для каждого движущегося наблюдателя и то, что одновременно для одного не одновременно для другого. В квантовой механике, измеряя точно одну величину, исследователь обречен на неведение относительно точности измерения многих других. В теории радиолокации при выборе модели зондирующего сигнала можно достичь высокой разрешающей способности радиолокатора по одной координате и полностью утратить эту способность – по другой. В синергетике то, что было хаосом с позиций макроуровня, превращается в структуру при переходе к масшта-

бам микроуровня, а сами понятия порядка и хаоса оказываются относительными к масштабу-окну наблюдений и т. д. Наконец, *постнеклассическая научная рациональность* фокус своего внимания переносит на саморазвивающиеся системы, учитывая соотнесенность получаемых знаний об объекте не только с особенностью средств и операций деятельности, но и с ценностно-целевыми структурами общества.

Синергетический стиль мышления представляет собой *современный этап развития системного мышления с учетом нелинейности и открытости реальных природных и социальных систем*. По мнению ряда авторов, подобные представления призваны подчеркнуть парадигмальный (междисциплинарный) статус синергетики как стиля мышления современной (постнеклассической) науки.

В известной степени с этими можно согласиться. Синергетика критикует основанные на образцах линейного мышления и линейной экстраполяции (движение от наличного состояния) научные модели и методы познания сложной реальности как существенные ее упрощения. В таких моделях недооцениваются неоднозначность будущего и фактор детерминации эволюционных процессов из будущего, а также конструктивность хаоса и роль быстрых процессов в развитии структур. Кроме того (что ранее уже отмечалось), в стремлении принять во внимание как можно большее число параметров состояния исследуемой системы такой подход часто неоправданно усложняет создаваемую модель. На этом основании некоторые исследователи считают, что синергетика «по своему содержанию близка к основным идеям постмодернизма и постструктурализма, отрицающих линейное мышление, существование единственной истины о мире и человеке, эффективность аналитических методов познания реальности»⁵⁵.

Однако существует и другая точка зрения, базирующаяся на негативном восприятии философии постмодерна, называемого некоторыми авторами постмодернистским трепом⁵⁶. Как пишет в этой связи А.Н. Окара «... даже если синергетика и порождена постмодерном (точнее, если она созвучна постмодерну – отсутствием четкого деления на объекты и субъекты, а также отсутствием абсолютизации социального «порядка»), в любом случае она является «могильщиком» постмодерна. В ее рамках возможен переход на новый уровень реальности, в котором происходит реонтологизация (возврат утраченной постмодерном «подлинности» бытия)»⁵⁷.

⁵⁵ Баксанский О.Е., Кучер Е.Н. Когнитивные науки: от познания к действию. М. : Ком-Книга, 2005. С. 65.

⁵⁶ Гобозов И.А. Куда катится философия? От поиска истины к постмодернистскому трепу (Философский очерк). М., 2005. 200 с.

⁵⁷ Окара А.Н. Синергетика как «лекарство» от постмодерна // Методологические основы синергетики и ее социальные приложения. Вып.1. М. : Научный эксперт, 2010. С. 45.

В то же время между развиваемыми синергетикой компонентами научного и методологического знания все еще отсутствует четкая разграничительная линия. Вследствие этого тому или иному теоретическому утверждению (постулату) синергетики, отражающему онтологический (сущностный) аспект неравновесной сложной системы, часто приписывается нормативная функция, а тот или иной принцип синергетики, призванный регулировать исследовательскую или проектную деятельность субъекта, трактуется как некоторое теоретическое положение.

Так, В.Б. Тарасова (со ссылками на ряд известных авторитетов в области синергетики, включая Пригожина, Хакена и Моисеева) к главным принципам синергетического подхода в современной науке относит принципы неаддитивности, целостности, дополнительности Н. Бора, спонтанного возникновения И. Пригожина, а также принципы несовместимости Л. Заде, управления неопределенностями, незнания, множественности НЕ-факторов, соответствия, разнообразия путей развития, единства и взаимопереходов порядка и хаоса, принцип колебательной (пульсирующей) эволюции⁵⁸. При этом анализ содержания перечисленных принципов показывает, что некоторые из них (в частности, принципы 1–4, 10–12) отражают объективные свойства нелинейной системы и, следовательно, относятся не к принципам в строгом их понимании, а к утверждениям синергетической теории (постулатам синергетики). Остальные принципы в той или иной степени все же содержат в себе некоторые нормативные требования к субъекту познания и деятельности и с этой точки зрения могут быть включены в систему принципов синергетического подхода. Однако с методологической точки зрения понятно, что эта совокупность принципов представляет две различные по содержанию и практической направленности нормативные системы синергетики.

С подобной ситуацией мы сталкиваемся и при анализе системы синергетических принципов в версии О.Е. Баксанского и Е.Н. Кучер. В качестве основных признаков, которые отражают свойства нелинейных сложных систем, авторы выделяют *неравновесность*, наличие *обратных связей* и *переходных явлений*, а также «нацеленность» системы на *эволюцию*. В качестве основных характеристик синергетической модели сложной системы они выделяют нелинейность, открытость и диссипативность. Что касается принципов синергетики, то они разделены авторами на четыре направления: а) принципы, отражающие специфику нового детерминизма; б) принципы, фиксирующие роль хаоса в образовании новых структур; в) принципы холизма (целостности) нелинейных систем; г) принципы

⁵⁸ Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М. : Эдиториал УРСС, 2002. С. 29–31.

управления сложными нелинейными системами. При этом первый и третий принципы по своему содержанию относятся к базовым положениям теории синергетики. Второй принцип, наряду с содержательным компонентом, включает в свой состав некоторые нормативные начала. И только четвертый принцип, конкретизированный четырьмя следствиями, содержит в себе нормативные требования к субъекту деятельности, то есть является методологическим принципом синергетики⁵⁹.

Несколько иной подход к определению основных признаков сложных открытых систем и принципов синергетики предложен В.И. Аршиновым и В.Г. Будановым. В качестве принципов синергетики авторы выделяют два структурных принципа Бытия (гомеостатичность и иерархичность, характеризующие фазу стабильного функционирования систем), три порождающих принципа Становления (нелинейность, незамкнутость, неустойчивость) и два Конструктивных принципа (динамическая иерархичность, или эмерджентность, и наблюдаемость)⁶⁰. С нашей точки зрения такая субординация принципов представляет несомненный интерес, поскольку позволяет охватить поведение сложной системы как в неравновесном (неустойчивом), так и в равновесном (устойчивом) состоянии, что согласуется с междисциплинарным статусом синергетики. В то же время, с точки зрения доминирующего в науковедении представления о методологическом принципе как о некотором нормативном правиле (требовании), регулирующем ту или иную деятельность субъекта, к собственно методологическим принципам синергетики здесь следует отнести только два последних принципа. Остальные могут рассматриваться либо как объективные свойства сложной неравновесной системы, либо как исходное положительное знание, отражающее эти свойства, то есть как соответствующие постулаты синергетики.

К этой системе принципов мы еще вернемся. Здесь же необходимо подчеркнуть, что ситуация нерасчлененности теоретического и методологического знания встречалась нами ранее при рассмотрении основ системного подхода. Она является закономерным следствием смешения как в методологии системного, так и в методологии синергетического подходов двух принципиально различных уровней научной рефлексии и соответствующих им нормативных систем – научно-теоретической, критерием которой является истинность научного знания, и научно-методологической, критерием которой является эффективность деятельности. Если эти две принципиально различные нормативные системы не расчленяются, исследователя на пути его движения к результату поджидают всевозможные ме-

⁵⁹ Баксанский О.Е., Кучер Е.Н. Когнитивные науки: от познания к действию. М. : Ком-Книга, 2005. С. 69–76.

⁶⁰ Аршинов В.И., Буданов В.Г. Когнитивные основания синергетики // Синергетическая парадигма. Нелинейное мышление в науке и искусстве. М. : Прогресс-Традиция, 2002. С. 78–79.

тодологические ловушки в форме гносеологических синдромов и логических парадоксов.

Применительно к синергетическому подходу одним из таких парадоксов является парадокс кольцевой причинности (классический логический круг): содержание одного принципа синергетики определяется через содержание второго, а содержание второго входит в содержание первого. Другой возможный парадокс носит мировоззренческий характер. Поскольку в основе теории синергетики лежат явления самоорганизации объектов неживой природы, постольку придание тому или иному ее теоретическому положению статуса методологического принципа наводит на мысль, что за всеми этими процессами самоорганизации стоит некоторое субъективное Начало, что неоправданно мистифицирует объективные процессы в природе. Если же эти нормативные системы рассматриваются отдельно, то появляется возможность вначале зафиксировать некоторые научные факты синергетики, подтвердив их опытом, а затем, на основе полученных фактов (в предельном случае – фундаментальных теоретических положений, идей или постулатов), сформулировать соответствующие регулятивные нормы (методологические принципы) синергетического мышления.

В целом **структура синергетического мышления** включает основные понятия и категории (научный язык) синергетики, фундаментальные теоретические положения (научные синергетические идеи или постулаты), отражающие сущность процессов самоорганизации сложных нелинейных систем, а также некоторую совокупность базовых принципов, сформулированных на основе этих теоретических положений.

Основные понятия и категории синергетики.

Переходя к краткой характеристике понятийно-категориального аппарата синергетики, необходимо заметить, что ее научный язык процессуально ориентирован, то есть свободен от прежних полярных образцов типа «монизм – дуализм», «холизм – элементаризм» и др. Это язык структур-процессов, которые возникают, усложняются и деградируют. И поскольку такие структуры-процессы существуют не только в естествознании, но в технике, технологии и социально-гуманитарной сфере, то он может рассматриваться уже не как узкоспециализированный язык нелинейного математического описания, но как язык новой междисциплинарной методологии.

Однако это не единственная особенность языка синергетики. В силу наличия сразу трех относительно самостоятельных научных синергетических школ (русской школы нелинейной динамики, бельгийской школы диссипативных процессов и немецкой школы лазерной физики, отличающихся не только названиями, но и степенью общности вводимых категорий и акцентами в научных интересах), а также в силу наличия «горизонталь-

ных» (междисциплинарных) взаимодействий и взаимопереходов (переносов синергетических смыслов в смежные отрасли научного знания и обратно) язык синергетики все еще остается весьма неоднозначным. Бурные темпы развития новой области не оставляют времени на унификацию понятий и приведение в стройную систему всей суммы накопленных фактов. Поэтому еще рано говорить о сложившейся категориальной схеме и о целостности концепции синергетики, а целесообразно выделить некоторый понятийно-категориальный инвариант, который с теми или иными оговорками признаётся большинством субъектов системного движения в качестве фундаментальных понятий и категорий синергетики. Одновременно остается надеяться на то, что их унификация и приведение в стройную систему всей суммы накопленных фактов когда-нибудь произойдет и синергетику, с появлением *очередной* более универсальной, уникальной и более спасительной междисциплинарной методологии, не постигнет участь рассмотренного ранее системного подхода, все еще переживающего весьма трудоемкую и с этой точки зрения не столь привлекательную для ряда исследователей стадию концептуализации.

Анализ соответствующей научной литературы показывает, что среди существующих категорий синергетики, с определенной долей условности, можно выделить две группы: а) категории, отражающие состояние структур-процессов и их эволюцию, и б) категории, отражающие методологию и теорию познания этих структур-процессов. Категории первой группы, в свою очередь, могут быть представлены тремя относительно самостоятельными подуровнями: 1) подуровень категорий, отражающий состояние структуры («*сложность*», «*открытость*», «*нелинейность*», «*диссипативность*», «*неравновесность*»), 2) подуровень категорий, отражающий состояние процессов («*хаос*», «*порядок*», «*самоорганизация*», «*флуктуация*»), 3) подуровень категорий, отражающий эволюцию структур-процессов («*бифуркация*», «*аттрактор*»). К категориям второй группы целесообразно отнести такие подуровни категорий, как «*модель синергетики*», «*новый (синергетический) детерминизм*», «*холизм*», «*элементализм*», «*синергетический стиль мышления*», «*универсальный эволюционизм*» и ряд других.

Рассмотрим некоторые из этих подуровней категорий более подробно.

Сложность. В общей теории систем понятие сложности открытой системы связывают со свойствами уникальности, слабопредсказуемости и негентропийности (целенаправленности, см. подпараграф 1.3.2). Уникальность предполагает неповторимость ряда свойств, качеств, элементов, вследствие чего каждая система такого класса не имеет полных аналогов поведения – даже в статистически устойчивых ситуациях она проявляет себя по-разному, становится слабопредсказуемой. В то же время такая система при случайном и неблагоприятном воздействии среды в состоянии

в определенных пределах управлять своей энтропией, осуществлять поведение, преследующее достижение определенной цели. Такое представление о сложности системы соответствует ее стремлению к сохранению своей индивидуальности и устойчивого состояния относительно собственных начальных параметров за счет соответствующих обратных связей.

Синергетика, не отрицая подобного представления о сложности открытых систем, находящихся в относительно устойчивом состоянии, изучает преимущественно противоположные процессы: пути к сложному, рождение и развитие сложного, формирование усложняющихся структур (морфогенезис), поскольку по-настоящему сложные системы возникают и самоподдерживаются на тонкой грани хаоса и порядка: выше порогового значения система становится неустойчивой и любое случайное микроскопическое движение (флуктуация) может вызвать быстрый лавинообразный процесс нарастающих изменений с последующим формированием новой макроструктуры или простым распадом. Такие системы иногда называют диффузными, или системами с плохой организацией. При этом процессы хаотизации и упрощения исследуют как необходимые этапы эволюции сложного и рассматривают с эволюционной точки зрения (то есть в процессе развития). Поэтому в качестве **основных признаков сложности** здесь дополнительно выделяют *неравновесность* (неустойчивость), наличие *переходных явлений* (процессов и состояний), *эволюционный характер* системы, наличие *обратных связей особого свойства*.

В то же время неравновесность (качество системы, находящейся вдали от устойчивого состояния) означает случайное движение структур-процессов *внутри вполне определенной области параметров*. Исследование именно неравновесных состояний привело теорию динамических систем к открытию новых фундаментальных свойств вещества в условиях сильного отклонения от равновесия. Эти фундаментальные свойства заключаются в том, что *при прохождении точек неустойчивости в самых различных по своей природе исследуемых средах обнаруживается свойство перехода к так называемому состоянию сложности*, то есть в этих средах при определенных условиях могут возникать макроскопические явления самоорганизации. Исследованию были подвергнуты явления, происходящие в точке неустойчивости, с целью определения той новой структуры, которая возникает за порогом неустойчивости. На этой основе удалось установить универсальные и глубокие аналогии, которые проявляются между различными системами при прохождении ими точек возникновения неустойчивости, а сложность в рамках синергетики стала рассматриваться не как исключение, а как общее правило. *Поэтому под сложностью в синергетике понимают способность открытой системы к самопроизвольной самоорганизации, усложнению своей пространственно-временной*

структуры на макроскопическом уровне под действием происходящих на микроуровне изменений.

Здесь важно подчеркнуть, что фундаментальным критерием сложности выступают не показатели статического характера, как это имеет место в равновесных системах, а показатель сугубо динамический, то есть наличие внутреннего потенциала самоорганизации. По оценке Г. Николса и И. Пригожина, если центральным предметом анализа синергетики является «рождение сложного», то критерием сложности для нее выступает то, что в исследуемой системе «при определенных условиях могут возникать макроскопические явления самоорганизации»⁶¹. Иными словами, с точки зрения синергетики сложность объектов (как природных, так и социальных) рассматривается не как исключение, а как общее правило. На основе этого утверждения формулируется основополагающий принцип синергетики, заключающийся в том, что *на всех уровнях структурной организации бытия именно неравновесность выступает условием и источником возникновения «порядка» из хаоса.* По этой причине предметом синергетики как формирующейся отрасли научного знания выступают процессы зарождения *упорядоченности* и самопроизвольной организации материи, которые возможны только в неравновесных системах.

Необходимо также отметить, что в силу динамического характера фундаментального критерия сложности, движение и преобразование структур-процессов сопровождается некоторыми ***переходными явлениями*** и носит ***эволюционный*** характер: неустойчивость хотя и предполагает случайность этого движения, однако та или иная тенденция реализуется в рамках четко ограниченной сферы возможностей (внутри вполне определенной области параметров). Принципиальным образом изменяется и характер обратной связи. Это уже не классическая обратная связь, поддерживающая устойчивое состояние системы по разности параметров между текущим и заданным ее состоянием, а структурная реализация принципа круговой причинности – ***обратная связь между возникающими в результате трансформаций на микроуровне макроструктурами и процессами микроскопического порядка*** (с одной стороны, элементы оказываются «поработанными» параметрами порядка, а с другой – элементы определяют параметры порядка). Вследствие этой обратной связи макроскопические структуры, возникающие из микроскопических событий, вызывают, в свою очередь, определенные изменения в микроскопических механизмах. Отсюда следует еще один важнейший принцип синергетики – ***принцип фундаментального единства микро- и макромира.*** Другой вариант об-

⁶¹ Можейко М.А. Синергетика // Новейший философский словарь. 2-е изд. Мн. : Интерпрессервис; Книжный Дом, 2001. С. 902–913.

ратной связи (вариант нелинейной положительной обратной связи) находит свое проявление в процессах самоорганизации структур-процессов.

Самоорганизация (самопроизвольное возникновение порядка из хаоса) представляет собой *процесс или совокупность процессов, происходящих в системе, способствующих поддержанию оптимального ее функционирования путем самодостраивания, самовосстановления и самоизменения организационной структуры и/или функций этой системы*. Поскольку явление самоорганизации связано с падением уровня энтропии в тех или иных фрагментах среды, постольку очевидно, что процессы подобной локальной упорядоченности осуществляются за счет притока вещества, энергии и информации извне. Поэтому необходимым условием возникновения процессов самоупорядочения (самоорганизации) неравновесной системы является ее **открытость**, обусловленная наличием у системы коммуникационных каналов с внешней средой для обмена веществом, энергией, информацией. Не случайно Г. Николис и И. Пригожин отмечают, что неравновесные состояния «связаны с неисчезающими потоками между системой и внешней средой».

Подобная форма взаимодействия приводит к тому, что специфика возникающих структур оказывается зависимой от особенностей параметров среды: в неравновесном состоянии система начинает реагировать на факторы, которые в равновесном ее состоянии выступают по отношению к ней как индифферентные. В результате перехода системы в неравновесное состояние у нее появляется возможность отбора возникающих структур, и при варьируемых условиях одна и та же система способна *демонстрировать существенно различные формы самоорганизации*, подчеркивая то обстоятельство, что изменение параметров среды может в корне изменить пути и механизмы самоорганизационных процессов в неравновесных средах.

Поскольку самоорганизация представляет собой возникновение порядка из хаоса (хаос как фактор самоструктурирования нелинейной среды), постольку категория «**хаос**» выступает в качестве одной из фундаментальных категорий синергетики. Дело в том, что функционирование сложных нелинейных систем происходит неравномерно. Устойчивые периоды сменяются напряженными критическими состояниями, когда решается, каким будет дальнейший путь развития. В такие моменты определяющую роль играет не порядок, а хаос. Без этой неупорядоченной, неконтролируемой, случайной компоненты были бы невозможными качественные изменения, переходы в существенно новое состояние. В точках **бифуркации** (ветвления вероятных путей эволюции открытой нелинейной системы) траектория развития разветвляется. В законе движения нет указания на то, по какой ветви следовать. Есть лишь спектр возможностей. Выбор ветви зависит от **флук-**

туаций (случайных отклонений величин, характеризующих систему, от их средних значений, ведущих при определенных условиях к образованию новой структуры и нового системного качества) и от факторов локального масштаба. Соответственно, флуктуации играют важную роль в процессах самоорганизации. Речь идет как о действующих на систему внешних флуктуациях, так и о самопроизвольных возмущениях внутри системы.

Принципиально важным является то, что феномен флуктуации играет в процессах самоорганизации двоякую роль. С одной стороны, флуктуация инспирирует этот процесс, приводя систему в состояние неустойчивости, с другой – флуктуация содержательно определяет результат самоорганизационного изменения системы. В непосредственной близости от точек бифуркации в соответствующей системе наблюдается значительное число флуктуаций. В этом случае небольшая флуктуация может послужить началом эволюции в совершенно новом направлении, которое резко изменит все поведение макроскопической системы (*порядок через флуктуацию*).

Через малые блуждания система попадает в область притяжения одной из траекторий дальнейшего движения – **аттрактора** – относительно устойчивого конечного состояния, к которому в данный момент времени стремится «траектория» эволюции нелинейной системы. Аттракторы иногда называют «целями» эволюции, так как именно на один из них система выходит в развитой стадии развертывания процесса. Хаос сначала обеспечивает возможность схода с прежней траектории при потере устойчивости в зоне кризиса (физическое обеспечение неравновесности), а затем помогает подключиться к новому аттрактору, преодолевая помехи на этом пути. Следовательно, хаос на микроуровне – это не фактор разрушения, а сила, выводящая некоторую нелинейную среду на тенденцию самоструктурирования. Так проявляется конструктивная роль хаоса как фактора самоорганизации.

Наличие у системы множества вариантов и возможных путей развития (включая альтернативные), а также способов реакций системы на воздействия извне (поливариантность самоорганизационных процессов) связана с таким фундаментальным свойством неравновесной системы, как **нелинейность**. В синергетическом понимании нелинейности предполагается, что направленность процессов интерпретируется не в качестве строго детерминированного причинно-следственного вектора, а как *результат случайного пересечения (взаимоналожения) внутренне не связанных друг с другом событийных потоков*. В соответствии с этим переход системы из состояния, соответствующего моменту T_n , в состояние, соответствующее моменту T_{n+1} , рассматривается не как результат однозначно причинного следования, а как интегральный итог пересечения различных тенденций, конкретные конфигурации которого в момент T_n зависят не только от ис-

ходного состояния системы (состояния в момент T_{n-1}), но и от случайных факторов, возникающих в контексте взаимоналожения указанных тенденций, а потому оказываются *принципиально непредсказуемыми*.

Важно, что альтернативные версии развития не даны изначально, но возникают в ходе самого процесса эволюции систем: в одной и той же среде без изменения ее параметров могут возникать разные структуры, разные пути ее эволюции. При этом это происходит не при изменении констант среды, а как результат саморазвития процессов в ней.

Соответственно этому и феномен *случайности* приобретает новый статус. Если в рамках линейных представлений случайные факторы могли интерпретироваться в качестве внешних и несущественных помех реализации определяющего направления эволюции системы, которыми можно было пренебречь, то в рамках анализа нелинейных систем именно случайные малые флуктуации, понимаемые в качестве внутренних по отношению к рассматриваемой системе, оказываются одним из решающих факторов эволюции. Поэтому *многовариантность, альтернативность и необратимость путей эволюции, а также приспособляемость к изменениям параметров внешней среды и пластичность поведения* – важнейшие свойства нелинейных динамических систем. При этом если в линейных системах результат действия двух различных факторов равен суперпозиции каждого из них взятого отдельно, то в нелинейных системах некоторое внешнее воздействие может привести к очень сильным эффектам, не соизмеримым по амплитуде с исходным воздействием (малые причины порождают большие следствия). И наоборот, внешнее воздействие большой интенсивности может и не побудить систему к отклику ожидаемой интенсивности или ожидаемого характера.

Вместе с тем процессы самоорганизации отнюдь не носят индетерминистский характер. Движение от хаоса к порядку через флуктуацию хотя и не подчиняется закону линейной причинности, однако оно не произвольно. Напротив, причины усиления малых событий до уровня глобальных могут быть вполне «законным» предметом рационального анализа. В частности, Е.Н. Князева и С.П. Курдюмов, рассматривая так называемый режим с обострением (сверхбыстрое нарастание процессов в открытых нелинейных средах, при которых характерные величины, например, температура или энергия, неограниченно возрастают за конечное время), пришли к выводу, что механизм, лежащий в основе этого явления, – «широкий класс нелинейных положительных обратных связей».

Согласно этому подходу как сила, так и механизм воздействия флуктуации на развитие системы зависит от переживаемой системой фазы режима с обострением. В медленной фазе режима с обострением (квазистационарное состояние системы) флуктуация, даже возникшая в «центре» системы, ниве-

лируется (сглаживается). В собственно же стадии с обострением возможны два варианта: если возмущение имеет место «на периферии» системы, то в силу предельно высокой скорости протекания процессов в режиме с обострением «система может не успеть почувствовать это возмущение».

Если же флуктуация имеет место «в центре» системы, то ее воздействие на эволюцию последней оказывается «колоссальным», производя радикальные качественные изменения ее состояния в близкий к точечному период времени. Но так или иначе, именно флуктуации определяют глобальный исход эволюции системы. Поэтому в процессах самоорганизации существенной в отношении вновь возникающих структур оказывается не любая случайность, но лишь имеющая место в условиях режима развития с обострением при наличии нелинейной положительной обратной связи (результат реакции действует на процесс, вызывая нарастающий резонансный эффект). Результатом подобных процессов выступают так называемые **диссипативные** (рассеивающие энергию⁶²) **структуры** как форма самоорганизации нелинейной системы.

Диссипация (рассеяние) обусловлена единичным событием, случайным образом отдавшим предпочтение одному из возможных исходов. После того, как выбор произведен, «в дело вступает» резонансный (в терминологии химических реакций – автокаталитический) процесс образования диссипативных структур, которые по аналогии с кристаллической решеткой линейной (равновесной) системы являются своеобразной диссипативной решеткой (структурой) нелинейной (неравновесной) системы. Эта фундаментальная категория синергетики отражает тесную и на первый взгляд парадоксальную взаимосвязь, существующую, с одной стороны, между структурой и порядком, а с другой – между диссипацией, или потерями. Как отмечают в этой связи И. Пригожин и И. Стенгерс, «в классической термодинамике тепловой поток считался источником потерь. В ячейке Бенара (ячейка конвекционной неустойчивости в подогреваемой жидкости – прим. авторов) тепловой поток становится источником порядка». При этом категория «диссипативная структура» указывает на конструктивную роль процессов диссипации в их образовании, что находит свое отражение и в фундаментальном синергетическом тезисе «*порядок из хаоса*».

⁶² Анализируемый вариант концепции синергетики затрагивает физические, химические и биологические системы, протекание процессов в которых связано с движением вещества и энергии. В радиолокационной системе, относящейся к классу целенаправленных (социальных) информационных систем, процессы диссипации связаны с технологическим движением информации, которое (в соответствии с матрицей всеобщей технологии – рис. 1.2) органически включает в себя технологическое движение и вещества, и энергии. Поэтому новые самоорганизующиеся (диссипативные) структуры РЛ систем будут носить информационную природу, отражая сущность самоорганизующегося глобального информационного поля в рамках создаваемой ВКО.

По оценке А. Баблюянца, «диссипативные структуры появляются всякий раз, когда система, способная к самоорганизации за счет своих кооперативных свойств, измеряет время и организует пространство для того, чтобы «выжить» при различных воздействиях, оказанных на нее, или для того, чтобы лучше использовать окружающую среду»⁶³.

По оценкам М.А. Можейко, в рамках сложившейся интегративной концепции синергетики диссипативные структуры характеризуются следующими особенностями: 1) они возникают в случаях неравновесного состояния системы как результат ее самоорганизации; 2) в своем появлении они инспирированы случайной флуктуацией того или иного параметра развития системы; 3) они являются принципиально открытыми, то есть формирующимися только при условии постоянного энергообмена самоорганизующейся системы с внешней средой; 4) в основе их образования лежит механизм обратных связей, предполагающих осуществление как автокаталитических, так и кросскаталитических процессов; 5) они реализуют кооперативные взаимодействия на микроуровне, и именно от последних зависят макроскопические свойства диссипативных структур, не редуцируемых к свойствам своих элементов; 6) диссипативные структуры не являются инвариантными относительно времени, а процесс их формирования характеризуется необратимостью по отношению к его течению; 7) адекватное описание диссипативных структур возможно только посредством нелинейных уравнений.

Таким образом, диссипативные структуры неравновесных (нелинейных) систем, в отличие от консервативных структур равновесных систем, представляют собой локализованный в определенных участках среды процесс, имеющий определенную пространственную форму и способный перестраиваться в этой среде, поэтому сама определенность такого процесса обусловлена его непрерывной *подвижностью, изменчивостью*.

Термином, фиксирующим специфику диссипативных структур, выступает понятие «аттрактор». Оно отражает режим (состояние), к которому тяготеет система. С этой точки зрения аттрактор предстает как **аттрактор-состояние**, который выступает в качестве искомой и достигаемой (финальной в конкретной системе отсчета) фазы эволюции системы. И если система попадает в поле притяжения определенного аттрактор-состояния, то она неизбежно эволюционирует к этому относительно устойчивому состоянию (структуре).

Важнейшим является и то обстоятельство, что состояние, к которому эволюционирует система, выступает не только как мысленно зафиксированная перспектива ее развития, но и как реально действующий фактор

⁶³ Здесь и ранее цитаты, приведены из статьи М.А. Можейко. Синергетика // Новейший философский словарь. 2-е изд. Мн. : Интерпрессервис; Книжный Дом, 2001. С. 902–913.

данного процесса. Фактически аттрактор-состояние может рассматриваться в качестве фактора (параметра) порядка для системы, находящейся в процессе самоорганизации.

Базовые постулаты синергетики.

Представленные выше варианты систематизации синергетических принципов, часть из которых в большей степени относятся к ее фундаментальным теоретическим положениям (постулатам), далеко не исчерпывают существующего в соответствующей научной литературе их многообразия. Это обстоятельство существенно усложняет выбор приемлемого варианта или процесса построения внутренне непротиворечивой системы исходных теоретических положений и нормативных правил синергетического подхода, которые могли бы стать надежной основой в прикладных исследованиях.

Гносеологические корни этой проблемы связаны с глубиной проникновения познания в сущность нелинейных структур-процессов, которое может быть осуществлено на уровне формальной, реальной и полной основы. На уровне формальной основы происходит выявление внешних, поверхностных свойств, связей и отношений рассматриваемых структур-процессов. На уровне реальной основы удастся проникнуть вглубь процессов и выявить несколько относительно равноценных сторон, их связей и отношений, определяющих функционирование всех других сторон рассматриваемого системного образования. И только на уровне полной основы удастся найти основную сторону (связь или отношение), которая определяет формы взаимодействия всех других сторон в их естественной взаимосвязи и взаимозависимости, то есть сущность данного системного объекта.

Современный уровень развития теории синергетики позволяет отразить сущность нелинейных систем на уровне реальной основы, то есть на уровне нескольких относительно самостоятельных концепций. Отсюда и упомянутое разнообразие постулатов и принципов, связанное с тем, какую из выявленных сторон структур-процессов исследователь выбрал в качестве основной, исходной. Не случайно современное системное движение включает три относительно самостоятельные синергетические школы, не считая многочисленных методологических ответвлений, методических версий и частно-научных интерпретаций. Поэтому в качестве системы постулатов современной синергетики целесообразно выбрать некоторый логически непротиворечивый инвариант, являющийся результатом синтеза ее наиболее устоявшихся теоретических положений.

Ранее в качестве основных признаков сложности открытой системы нами были выделены неравновесность (неустойчивость), наличие переходных явлений, эволюционный характер системы, а также наличие в ней

положительных обратных связей. На основании этих фундаментальных свойств сложной системы можно сформулировать **первый и основной постулат синергетики – постулат нелинейности и открытости**: *практически все существующие сложные системы являются нелинейными и открытыми*. Эти системы, в зависимости от характера действующих на них внутренних и внешних возмущений и их реакции на эти возмущения, могут находиться в одном из двух состояний: а) в состоянии относительной устойчивости (равновесности), б) в состоянии неустойчивости (неравновесности).

Как отмечалось ранее, сложные открытые системы считаются **асимптотически устойчивыми** (линейными), если действующие на них возмущения либо затухают во времени, либо носят стационарный характер, позволяющий сохранять им состояние гомеостаза. Это свойство сложных открытых систем нашло свое отражение в упоминавшихся *постулатах Бытия* (постулатах гомеостатичности и иерархичности) В.И. Аршинова и В.Г. Буданова. Известным и определяющим признаком линейных систем является **свойство суперпозиции**: *результат суммарного воздействия на систему равен сумме результатов отдельных воздействий*. В таких системах *отклик прямо пропорционален воздействию*. Рассмотрим это состояние сложной открытой системы и связанные с ним постулаты Бытия более подробно.

Как отмечалось при рассмотрении классического системного подхода, *гомеостаз* в биологических системах и системах неживой природы связан с поддержанием устойчивого состояния системы и/или с сохранением ее индивидуальности. В социальных (целенаправленных) системах гомеостаз связан с поддержанием некоторой программы функционирования, обеспечивающей достижение системой некоторой цели-эталона, цели-идеала. В случае отклонения реально достигаемого состояния (цели) от некоторого устойчивого состояния (от цели-эталона или цели-идеала), связанного с воздействием среды или внутренних флуктуаций, в системе возникает отрицательная обратная связь, подавляющая возникшие возмущения, и система возвращается в устойчивое состояние (возвращается к программе достижения заданной цели-идеала). С точки зрения синергетики, в открытых диссипативных системах (системах, рассеивающих энергию, вещество и информацию), находящихся в состоянии гомеостаза, в качестве цели-эталона или цели-программы выступает аттрактор («притягиватель» состояния системы). Он описывает только стационарное (устойчивое) поведение системы, которое обычно намного проще переходного процесса.

Стационарность поведения системы находит свое проявление и в специфике ее структуры, которая характеризуется относительно устойчивой иерархичностью. *Структурная иерархичность* системы отражает состав-

ную природу вышестоящих уровней относительно нижестоящих. При этом то, что для низшего уровня является структурой-порядком, для высшего выступает в качестве бесструктурного элемента хаоса, своеобразного «строительного материала». Именно на этом основании справедливо, например, утверждение, что нуклоны образованы кварками, ядра – нуклонами, атомы – ядрами и электронами, молекулы – атомами, общество – людьми, а та или иная РЛ система – отдельными радиолокационными станциями. В соответствии со свойством системности (целостности) элементы, связываясь в структуру, «передают» ей часть своих функций, степеней свободы, которые далее проявляются во вне «от лица» всей системы. Эти «коллективные» (системные) переменные и выступают в качестве рассмотренных ранее параметров порядка. Они «живут» на более высоком иерархическом уровне, нежели элементы системы, и именно они описывают в сжатой форме состояние, поведение и цели-аттракторы системы.

Описанная природа параметров порядка отражает сущность закона подчинения и в целом явления самоорганизации (для равновесных систем – явления взаимосогласованного сосуществования), когда изменение этих параметров «управляет» синхронным поведением множества элементов низшего уровня, образующих систему. Это же описание отражает и сущность закона круговой причинности в явлениях самоорганизации, а также взаимную обусловленность поведения элементов любых двух соседних уровней: одни «управляют», «организуют» согласованное поведение и порядок, другие «подчиняются», «передавая» первым часть своих степеней свободы и тем самым участвуя в «создании» некоторого порядка (замыкая причинный круг).

Как утверждают В.И. Аршинов и В.Г. Буданов, каждый уровень иерархической структуры имеет внутренний предел сложности описания, превысить который не удастся на языке данного уровня, то есть *свойства-структуры более сложных иерархических уровней не сводятся к языку описания (параметрам порядка) более простых уровней системы*. Этим объясняется наличие не только иерархии уровней структуры, но и иерархии соответствующих языков описания. По этой причине невозможно свести, например, все феномены жизни и психики к законам физики элементарных частиц, а свойства РЛ системы – к принципам построения и функционирования отдельной радиолокационной станции лишь на том основании, что из них соответствующие системы состоят.

Необходимо подчеркнуть, что синергетический закон подчинения Г. Хакена сформулирован относительно временной иерархии. Поэтому важную роль в иерархии систем играет время и именно в рамках системного времени (временной иерархии) справедливо утверждение, что параметры порядка – это *долгоживущие* коллективные переменные, задающие

язык описания и специфику среднего (макро) уровня. Эти долгоживущие переменные образованы и управляют быстрыми, *короткоживущими*, массовыми переменными, задающими язык описания и форму существования нижележащего (микро) уровня. В то же время быстрые переменные микроуровня ассоциируются для макроуровня с бесструктурным «тепловым» хаотическим движением, неразличимым в деталях на уровне языка описания и параметров порядка последнего. В свою очередь, вышележащий (мега) уровень образован сверхмедленными *«вечными»* переменными, которые выполняют для макроуровня роль параметров порядка. В рамках рассматриваемой триады уровней их принято называть управляющими, или контрольными, параметрами, плавно меняя которые можно менять состояние и характер поведения нижележащих уровней. Поэтому утверждение закона подчинения о том, что *долгоживущие переменные управляют короткоживущими, а вышележащий уровень – нижележащим* справедлив лишь для сложной открытой системы, находящейся в равновесном состоянии. На этом основании несложно прийти к выводу, что введенный В.И. Аршиновым и В.Г. Будановым обобщенный постулат Бытия (раскрывающийся через постулаты гомеостатичности и структурной иерархичности) справедлив только для равновесного состояния сложной открытой системы и с этой точки зрения носит относительно ограниченный характер. В то же время, именно этот постулат, объединяющий многие идеи кибернетики, системного анализа и собственно синергетики, придает последней междисциплинарный научный статус.

Рассмотрим специфику постулата нелинейности и открытости применительно к сложной системе, находящейся в неустойчивом (неравновесном) состоянии. Сложные открытые системы считаются **асимптотически неустойчивыми** (неравновесными, нелинейными), то есть имеющими тенденцию к экспоненциальной дивергенции своего исходного состояния относительно собственных начальных параметров, если в условиях действия на них внешних возмущений или внутренних флуктуаций, в том числе и нестационарного (во времени и по интенсивности) характера, они выходят за пределы параметров гомеостаза. Именно такие системы находятся на тонкой границе между хаосом и порядком, сохраняя два потенциально возможных исхода: а) переход к новому относительно устойчивому состоянию (к новой цели-аттрактору), б) простой распад исходной структуры, свидетельствующий о том, что иерархичность не может быть раз и навсегда установлена.

При рассмотрении нелинейных систем постулаты Бытия (порядка) уступают место механизмам эволюции, основанным на положительных обратных связях, которые усиливают внешние возмущения и внутренние флуктуации нелинейной системы. Этот механизм находит отражение

в упоминавшемся ранее обобщенном постулате *Становления порядка через беспорядок* (хаос), который В.И. Аршинов и В.Г. Буданов конкретизируют посредством постулатов (в их терминологии – эпистемологических принципов) нелинейности, незамкнутости (открытости), неустойчивости.

По мнению авторов, выполнение этих постулатов является необходимым и достаточным условием возникновения в нелинейной системе нового качества. Дело в том, что любая граница целостности объекта, его разрушения, разделения, поглощения предполагает *нелинейные* эффекты. В то же время невозможно пренебречь взаимодействием системы со своим окружением, поскольку в замкнутых системах (в соответствии со вторым законом термодинамики) энтропия (мера хаоса) со временем может лишь возрастать и порядок будет обречен на исчезновение. Именно открытость позволяет системам эволюционировать от простого к сложному. Последнее означает, что иерархический уровень может развиваться, усложняться только при обмене веществом, энергией и информацией с другими уровнями. На языке этих уровней постулат открытости фиксирует два важных обстоятельства: а) возможность явлений самоорганизации бытия системы в форме существования стабильных неравновесных структур макроуровня (открытость макроуровня к микроуровню при фиксированных управляющих параметрах), б) возможность самоорганизации процесса становления, то есть возможность смены типа неравновесной структуры и типа аттрактора (открытость макроуровня к мегауровню, меняющему управляющие параметры системы). Оказывается, что при переходе от одного гомеостаза к другому, качественно отличному от предыдущего (то есть при прохождении точек неустойчивости), даже закрытая сложная система *обязательно становится открытой*.

При определенных условиях нелинейность и незамкнутость позволяют системе покинуть область гомеостаза и перейти в неустойчивое состояние (попасть в одну из точек в пространстве управляющих параметров, то есть параметров мегауровня, называемую точкой бифуркации). Именно в таких точках, за счет сколь угодно слабого воздействия, возможно *изменение* состояния (поведения) системы. Возможность такого изменения отражает обобщенный постулат *Конструктивности*, который, по мнению В.И. Аршинова и В.Г. Буданова, включает *постулаты динамической иерархичности* (эмергентности) и *наблюдаемости*.

Постулат динамической иерархичности является обобщением закона подчинения применительно к процессам становления системы – рождения параметров порядка при взаимодействии ее уровней. Сам процесс становления есть процесс исчезновения, а затем рождения одного из этих уровней как результат взаимодействия не менее трех иерархических уровней

системы. В отличие от фазы бытия, переменные параметра порядка оказываются в этом случае самыми быстрыми, неустойчивыми переменными среди конкурирующих макрофлуктуаций. Постулат справедлив для случая возникновения нового качества системы по горизонтали, то есть на одном иерархическом уровне, когда медленное изменение управляющих параметров мегауровня приводит к неустойчивости системы на макроуровне и перестройке его структуры. В этой перестройке и заключается смысл самоорганизации системы, рождения параметров порядка, структур из хаоса микроуровня: *управляющие сверхмедленные параметры верхнего мегауровня совместно с короткоживущими переменными низшего микроуровня образуют параметры порядка, структурообразующие долгоживущие коллективные переменные нового макроуровня*. Сами же эти структуры, в отличие от относительно стационарных структур линейной (равновесной) сложной системы, носят динамический характер как во времени, так и в пространстве, то есть становятся структурами-процессами, выражая диалектическую сущность нелинейных систем посредством единства противоположностей – порядка и хаоса.

Таким образом, для самоорганизующихся систем важное значение имеют не только устойчивость и необходимость, но и неустойчивость, и случайность, так как процесс самоорганизации происходит в результате взаимодействия случайности и необходимости и всегда связан с переходом от неустойчивости к устойчивости. Хотя устойчивость, стабильность, равновесие представляют собой необходимые условия для существования и функционирования вполне определенной, конкретной системы, тем не менее, переход к новой системе и развитие в целом невозможны без ликвидации равновесия, устойчивости и однородности. Новый порядок и динамическая структура возникают благодаря усилению флуктуации. Соответственно замкнутость системы способна порождать такой тип устойчивости, который может препятствовать ее развитию или даже привести к эволюционному тупику.

Что касается постулата наблюдаемости, то он носит явно выраженный нормативный характер, подчеркивая ограниченность и относительность наших представлений о системе в конечном эксперименте. С этой точки зрения он выступает в качестве методологического принципа синергетики, ориентирующего исследователя в выборе средств и методов проведения этого эксперимента. Поэтому данный принцип, который очень тесно коррелируется с принципом диалогичности, целесообразно включить в систему методологических принципов синергетики, изложенную ниже.

Обобщенный постулат нелинейности и открытости дополняется постулатами *нового детерминизма, конструктивности хаоса и холизма*, сформулированными О.Е. Баксанским и Е.Н. Кучер. Авторы традиционно

относят эти постулаты к принципам синергетического подхода. Однако, как и в предыдущих случаях, признак долженствования, придающий этим фундаментальным положениям синергетики нормативную функцию, здесь отсутствует, что является признаком «знаниевого» характера сформулированных О.Е. Баксанским и Е.Н. Кучером положений. Рассмотрим их более подробно.

Постулат нового детерминизма. Основное содержание этого постулата О.Е. Баксанский и Е.Н. Кучер усматривают в том, что *в открытых нелинейных системах на развитых (асимптотических) стадиях их эволюции потенциально возможно формирование спектра структур (форм организации)*. Далее авторы раскрывают это утверждение следующими тремя тезисами: 1) даже в относительно простой нелинейной среде потенциально возможно множество типов структур или путей эволюции: чем выше нелинейность системы, тем выше разнообразие доступных ей структур, выше их сложность; 2) для нелинейных систем в их развитии существуют своего рода *эволюционные правила запрета*: в среде могут возникать и самоподдерживаться только те структуры, которые соответствуют ее собственным тенденциям развития, все остальные структуры нестабильны и нежизнеспособны; 3) скрытый в нелинейной среде дискретный спектр структур-аттракторов предстает как спектр целей эволюции (целенаправленного преобразования), поэтому настоящее системы строится фактически из будущего. В то же время это будущее предопределено лишь отчасти. Оно проявляется в форме структуры-аттрактора, принципиально заложенного в природе структуры самой системы. Открытость и неопределенность будущего состояния системы связаны с тем, что выбор одного из возможных аттракторов совершается непосредственно в момент данной неустойчивости и определяется случайностью – флуктуациями на микроуровне.

Постулат конструктивности хаоса: 1) *хаос в нелинейных системах выступает в качестве конструктивного начала*: выход системы на новый аттрактор в точке бифуркации происходит за счет того, что определенные микрофлуктуации разрастаются и преобразуют макроструктуру системы, обеспечивая условия для «выбора» путей развития; 2) *хаос в нелинейных системах выступает в качестве интегративного начала, объединяющего простые структуры в более сложные*: именно хаос на микроуровне, проявляющийся в разного рода процессах рассеяния вещества, энергии и информации (диссипативных процессах) приводит к выравниванию темпов развития частей объединяющейся системы. Таким образом, хаос в эволюции нелинейных систем выполняет двойную роль. С одной стороны, он разрушителен, так как хаотические малые флуктуации в определенных условиях приводят к разрушению сложных систем; с другой – он созидателен, так как лежит в основе механизма объединения простых структур

в сложные, согласования темпов их эволюции, вывода системы на аттрактор. Разрушая, хаос строит, а строя, он приводит к разрушению, чтобы на следующем витке эволюционного развития строить вновь.

Постулат синергетического холизма: *в единую структуру могут быть объединены не какие угодно элементы и не как угодно.* Топологически правильное объединение предполагает объединение структур в соответствии с собственными функциями (свойствами или тенденциями развития) среды, в рамках которых относительно устойчивыми являются только отдельные структуры из дискретного набора, обусловленного собственными свойствами данной среды. Возможно также объединение в единую структуру систем различной степени развитости. Однако для этого, помимо конфигурационно правильного объединения частей, требуется создание единого темпомира (согласование темпа протекания процессов). Сформированная таким образом сложная структура будет представлять собой суперпозицию ряда структур различного возраста и уровня развития, области локализации которых перекрыты строго определенным образом. Именно в случае правильной топологии (пространственно-временной организации) сложная структура оказывается жизнеспособной. Более того, объединенная структура оказывается способной развиваться значительно быстрее, чем самая быстрая из ее подсистем до объединения. Темп развития каждой из частей сложной структуры также повышается. Одновременно с этим в системе существует возможность изменения доступного ей спектра структур-аттракторов путем изменения параметров среды, в том числе и за счет повышения ее нелинейности⁶⁴.

Очевидно, что на основе рассмотренных выше категорий и постулатов могут быть сформулированы принципы синергетического подхода. Кратко рассмотрим основные из них.

Принципы синергетического подхода.

Приступая к исследованию (систематизации) принципов синергетического подхода, будем учитывать следующие представления о принципах, сложившиеся в современной методологии науки и науковедении.

Любой фрагмент объективной или субъективной реальности может одновременно выступать в качестве объекта научно-исследовательской, предметно-преобразующей (проектной) или управленческой деятельности. В первом случае речь идет о выявлении сущности соответствующих объектов (сложных нелинейных систем) и отражении этой сущности в соответствующем научном знании. Во втором – о проектировании нового или

⁶⁴ Баксанский О.Е., Кучер Е.Н. Когнитивные науки: от познания к действию. М. : Ком-Книга, 2005. С. 73–74.

преобразовании, перестройке некоторого существующего объекта (системы). В третьем случае речь идет об управлении функционированием и развитием сложной целенаправленной (социальной) системы, включая систему «человек – техника – среда».

Очевидно, что этим видам деятельности соответствуют свои, относительно самостоятельные, нормативные подсистемы: а) совокупность принципов эмпирического и теоретического исследования сложных систем, а также принципов системной организации полученного научного знания (эпистемологические принципы); б) совокупность принципов проектирования сложных систем (методологические принципы проектной деятельности); в) совокупность принципов управления состоянием и поведением сложных целенаправленных систем (принципы управления нелинейными системами или принципы нелинейного управления). Результатом применения первой нормативной подсистемы является новое научное знание (включая рассмотренные выше постулаты синергетики), отражающее сущность нелинейных систем. Критерием научности этой нормативной системы является истинность этого знания. Именно оно представляет собой теоретический (знаниевый) базис для выработки принципов оставшихся нормативных подсистем, критерием научности которых выступает эффективность соответственно проектной и управленческой деятельности.

В то же время формирующаяся синергетика, с точки зрения современного ее понимания многими сторонниками системного движения, представляет собой не просто дополнительный раздел общей теории систем или даже не просто новую отрасль междисциплинарного научного знания. Она выступает в качестве современной научной парадигмы, стиля мышления новой (постнеклассической) научной рациональности. Как уже неоднократно отмечалось, такое понимание ее научного статуса все еще остается весьма дискуссионным. Тем не менее, нелинейный, неустойчивый, неравновесный и диссипативный характер структур-процессов сложных систем, подлежащих рассмотрению в рамках синергетики, предполагает пересмотр базовых принципов классического системного подхода или, по крайней мере, их дополнения некоторыми принципами, отражающими специфику синергетического взгляда на нелинейные системы. В первую очередь это касается принципа классического детерминизма, который применительно к классу нелинейных систем оказывается несостоятельным.

В этой связи логично предположить, что сформулированные ниже принципы синергетического подхода как раз и составляют основное содержание нового (постнеклассического) детерминизма. В их основу положим совокупность принципов в версиях В.Б. Тарасова, О.Е. Баксанского, Е.Н. Кучер, В.И. Аршинова и В.Г. Буданова, в той или иной степени рассмотренные ранее.

А. Эпистемологические принципы.

Принцип дополнительности Н. Бора. При выявлении сущности сложных открытых систем необходимо сочетание различных, ранее считавшихся несовместимыми моделей и методов описания и объяснения, поскольку эти модели и методы взаимодополняют друг друга. Соответственно хаотическое поведение на микроуровне не является неприятной помехой, ведущей к нарушению строгого описания классических моделей. Более того, хаос не только не должен исключаться из рассмотрения, но и подлежит изучению с особой тщательностью, поскольку именно благодаря хаотическому разнообразию на микроуровне, постоянному присутствию микрофлуктуаций возможно изменение систем в точках неустойчивости.

Принцип несовместимости Л. Заде. При возрастании сложности системы уменьшается возможность точного ее описания вплоть до некоторого порога, за которым точность и релевантность информации становятся несовместимыми, взаимоисключающими характеристиками.

Принцип ограниченности знания. Знания о сложных системах принципиально неполны, неточны и диалектически противоречивы: они, как правило, формируются не на основе логически строгих понятий и суждений, а исходя из индивидуальных мнений и коллективных идей. Поэтому в подобных системах важную роль играет моделирование частичного знания и незнания.

Принцип соответствия. Язык описания сложной системы должен соответствовать характеру располагаемой о ней информации (уровню знаний или информационной неопределенности). Точные логико-математические и синтаксические модели не являются универсальным языком. Также важны нестрогие, качественные, приближенные, семиотические модели и неформальные методы. Один и тот же объект может описываться семейством научных языков различной логической строгости (жесткости).

Принцип множественности интерпретации. Рассуждения о сложных системах могут интерпретироваться в различных «возможных мирах», то есть сложность предполагает объединение различных (и даже противоположных) логик. Переход от одной логики к другой отражает процесс становления системы, причем вид конкретной логики зависит от этапа эволюции системы и складывающейся ситуации. Это не значит, что надо отказаться от стандарта линейного мышления. В сложных открытых системах все значительно сложнее. Линейные и нелинейные процессы здесь находятся в диалектической взаимосвязи. Поэтому в подобной взаимосвязи должны находиться и стандарты линейного и нелинейного мышления, отражающие эти процессы. Важно лишь знать область приложений

и границы применимости каждого из них, поскольку применение стандартов нелинейного мышления к описанию линейных процессов связано с методологическим излишеством, а применение стандартов линейного мышления к описанию нелинейных процессов чревато ошибочными результатами.

Принцип круговой (циклической) причинности определяет возможность обратимого сжатия информации за счет перехода от многочисленных переменных или параметров состояния к малочисленным параметрам порядка, которые, в свою очередь, являются функциями параметров состояния. Это позволяет, минуя детали, описывать и понимать эмерджентные (вновь возникающие свойства) и самоорганизацию целого. Рассматриваемый принцип также описывает отношение между параметрами порядка и элементами системы, поведение которых подчинено этим параметрам: отдельные элементы системы порождают параметры порядка, которые, в свою очередь, определяют поведение элементов. Таким образом, немногие параметры порядка и немногие возможности, которые они имеют в принятии их индивидуальных состояний, отражают тот факт, что в сложных системах возможны только немногие определенные структуры, которые «согласованы» с поведением элементов. Иными словами, даже если некоторые конфигурации генерированы искусственно, извне, только некоторые из них действительно жизнеспособны. Очевидно, что сказанное особенно важно для случая проектирования сложных социальных (целенаправленных) систем.

Принцип наблюдаемости. Заимствован нами из совокупности принципов Становления, сформулированных В.И. Аршиновым и В.Г. Будановым. По мнению этих авторов, именно принцип наблюдаемости и рассмотренный выше принцип (в используемой нами терминологии – постулат) динамической иерархичности «включают принципы дополнительности и ответственности, кольцевой коммуникативности и относительности к средствам наблюдения, запуская процесс диалога внутреннего наблюдателя и метанаблюдателя»⁶⁵. Как видим, принцип наблюдаемости носит комплексный характер и подчеркивает ограниченность и относительность наших представлений о сложной системе в конечном эксперименте. Рассмотрим перечисленные компоненты принципа наблюдаемости более подробно.

Принцип дополнительности Н. Бора изложен нами ранее. *Принцип соответствия* предполагает применение для описания того или иного иерархического уровня сложной системы соответствующего этому уровню языка описания. *Принцип относительности к средствам наблюдения* фик-

⁶⁵ Аршинов В.И., Буданов В.Г. Когнитивные основания синергетики // Синергетическая парадигма. Нелинейное мышление в науке и искусстве. М. : Прогресс-Традиция, 2002. С. 79.

сирует относительность субъективных интерпретаций к масштабу наблюдений и изначально ожидаемому результату: то, что было хаосом с позиций макроуровня, превращается в структуру при переходе к масштабам микроуровня и наоборот, а сами понятия порядка и хаоса, Бытия и Становления являются относительными к масштабу-окну наблюдений. Поэтому целостное и адекватное описание иерархической системы должно складываться из диалога между наблюдателями разных иерархических уровней (*принцип кольцевой коммуникативности, или диалогичности*), подобно диалогу, складывающемуся между наблюдателями разных инерциальных систем отсчета в теории относительности.

Б. Методологические принципы проектной деятельности.

Принцип множественности НЕ-факторов. При разработке сложных систем, наряду с линейными НЕ-факторами (неопределенность, неточность, неполнота, недоопределенность и др.), необходимо принимать во внимание и синергетические НЕ-факторы: нелинейность, неустойчивость, неравновесность, незамкнутость (открытость), необратимость, непредсказуемость.

Принцип нелинейного (синергетического, или постнеклассического) детерминизма. Синергетический детерминизм предполагает отказ от представлений о последовательном (линейном) и кумулятивном характере развития сложных систем. Поэтому в рамках проектной деятельности соответствующий субъект обязан учитывать следующее: а) процесс развития сложных систем сочетает в себе как дивергентные тенденции (повышение разнообразия), так и конвергентные тенденции (свертывание разнообразия, повышение избирательности); б) всякое даже достаточно стабильное состояние системы представляет собой определенную эволюционную стадию процесса ее становления и развития, а сам этот процесс характеризуется принципиальной многовариантностью, альтернативностью и необратимостью как в перспективе, так и в ретроспективе: нелинейные системы, проходя через состояние неустойчивости (точку бифуркации), «выбирают» один из доступных им путей-аттракторов развития. При этом «отвергнутые» в точке бифуркации аттракторы «закрываются» – становятся в дальнейшем недоступными системе; в) существует вероятность того, что так называемые тупиковые ветви эволюции (маргиналии, девиации, архаика) сложной системы в определенном отношении могут оказаться совершеннее текущего ее состояния; г) настоящее системы определяется не только ее прошлым, но формируется также из будущего, «притягиваясь» аттракторами эволюции; ж) хаос разрушителен и конструктивен одновременно: в развитых (асимптотических) состояниях сложные системы становятся чувствительными к малым хаотическим флуктуациям

на микроуровне, в то же время хаос является механизмом вывода систем на относительно стабильные структуры-аттракторы.

В рамках практической апробации и совершенствования уже сложившейся нелинейной системы ее идеологи, методологи и разработчики должны быть готовы к неожиданному разрастанию незначительных флуктуаций микроструктур до уровня макроструктуры, к быстрому, нелинейному росту структур-процессов, к внезапному переходу этой системы в новое качественное состояние, которое может быть в некоторых отношениях даже менее совершенным предыдущего. Одновременно упомянутые субъекты проектной деятельности должны учитывать следующее: а) макроуровень сложной системы не является независимым от нижележащих уровней организации: при определенных условиях (состоянии неустойчивости) микрофлуктуации могут прорываться на макроуровень и определять макрокартину процесса; б) некоторое внешнее воздействие на сложную систему *может привести к очень сильным эффектам*, не соизмеримым по амплитуде с исходным воздействием («малые» причины способны породить «большие» следствия). И наоборот, внешнее воздействие большой интенсивности *может и не побудить систему к отклику ожидаемой интенсивности* или ожидаемого характера. Следовательно, свойства сложной системы не сводятся к сумме свойств ее элементов, а результат суммы воздействий на систему не равен сумме результатов воздействий на элементы этой системы (результат действия на нелинейную систему независимых причин нельзя складывать); в) развитие сложной системы происходит через неустойчивость, усложнение же системы приводит к повышению ее неустойчивости. Наибольшая устойчивость системы достигается за счет своевременной и адекватной смены (чередования) состояний, происходящих в периоды ее неустойчивости.

В. Принципы управления нелинейными системами.

Несмотря на кажущуюся неуправляемость сложных систем – их высокую внутреннюю неустойчивость, неопределенность и хаотизированность – управление такими системами возможно. Важнейший вывод, к которому пришла современная теория управления, состоит в следующем: «неэффективное управление природой, когнитивной или социальной системой заключается в навязывании системе некоторой формы организации, ей не свойственной, чуждой»⁶⁶. Отсюда и несколько достаточно очевидных принципов управления сложными системами:

1. Нелинейную систему нельзя «заставить» находиться в каком угодно желаемом состоянии – структуры, не соответствующие спектру допус-

⁶⁶ Баксанский О.Е., Кучер Е.Н. Когнитивные науки: от познания к действию. М. : Ком-Книга, 2005. С. 75.

тимых аттракторов системы, нежизнеспособны и размываются диссипативными процессами.

2. Будущее состояние (поведение) нелинейной системы не является однозначно определенным – система имеет несколько возможных сценариев развития, знание которых позволяет развернуть в ней один из наиболее благоприятных вариантов эволюции.

3. Оказывая на нелинейную систему определенные воздействия, можно повысить вероятность ее выхода на желаемый аттрактор.

4. Существует возможность целенаправленного (управляемого) возбуждения определенных структур из доступного системе спектра, что сокращает время «естественного отбора» вариантов поведения или состояния. Возбуждение необходимых структур достигается путем резонансного возбуждения среды с помощью малых, но топологически правильно подобранных воздействий, соответствующих пространственно-временной организации нелинейной системы.

Очевидно, что все вышесказанное, с незначительными поправками на специфику процессов, справедливо и для современного состояния РЛ системы РТВ, определившейся с наиболее приемлемой траекторией развития в форме ЕАРЛС России.

1.3.4.4. Особенности синергетического подхода к проблемам построения, функционирования и развития РЛ систем

Как уже отмечалось ранее, даже самые передовые научные теории мало интересны обществу, если они не детерминированы практикой. Речь идет об особой (технической) деятельности, направленной на формирование технических теорий и их применение при создании технических систем и технологических процессов. Поэтому, рассматривая возможные варианты преломления синергетического стиля мышления к проблемам разработки, проектирования и развития РЛ системы как важнейшей разновидности нелинейных систем вообще, целесообразно говорить об особой разновидности стиля мышления – *инженерного стиля мышления постнеклассической научной рациональности*. Этот стиль мышления представляет собой устойчивую в рамках существующей исторической эпохи систему норм, правил, принципов и синергетических идей, регулирующих техническую деятельность, направленную на выявление и теоретическое осмысление природы и специфики нелинейных структур-процессов, а также на проектирование, разработку, совершенствование, развитие и оптимизацию сложных открытых технических систем. Он представляет собой современный этап развития системотехнического стиля мышления, в котором принципы классического (линейного) детерминизма диалектически взаимосвязаны с принци-

пами нелинейного (синергетического) детерминизма, а в качестве основного его объекта выступают нелинейность и открытость реальных технических систем и технологий. Основное содержание рассматриваемого стиля инженерного мышления связано не только с поиском компромиссов и разумным применением противоречий, когда в одном и том же техническом объекте или системе сочетаются и реализуются совершенно противоположные требования, но и с поиском той тонкой границы между хаосом и порядком, на которой по настоящему сложные системы могут возникать и самоподдерживать свое относительно устойчивое состояние. Поэтому такой стиль мышления охватывает не отдельные разделы технических наук, а всю совокупность научно-технических знаний, переосмысливая их в информационном плане и интегрируя в единую систему на основе нового методологического принципа – принципа нелинейного (постнеклассического) детерминизма.

ЕАРЛС, в силу своей потенциальной или реально существующей военно-функциональной (конфликтной) специфики, обменивается с внешней средой (то есть с компонентами надсистемы и воздушными объектами) не только веществом, энергией и информацией, как это характерно для большинства сложных открытых систем, но, в первую очередь, **потоками энтропии** (потоками информационной неопределенности). Очевидно, что детерминированность ее структуры и линейность протекающих в ней процессов носят относительный характер и далеко не исчерпывают весь спектр возможных состояний. Подобным системам, наряду с внутренней сложностью, присущи, с одной стороны, непредсказуемость поведения и функциональная или структурная неустойчивость (неравновесность), а с другой – способность к самоорганизации и саморазвитию, что характерно для нелинейных систем. Поэтому такие системы гораздо более чувствительны к изменениям внешней среды, чем равновесные, для которых переход от одной структуры к другой требует сильных возмущений или изменения граничных условий. В них нельзя четко выделить отдельные явления, нельзя установить непроницаемые перегородки, разграничивающие действие переменных различной физической природы; входы и выходы в таких системах не являются фиксированными, они меняются местами; функции системы зависят от внешнего окружения и нежестко привязаны к ее статическим структурам.

Например, в РЛ системе активной локации внешние активные (преднамеренные или взаимные) помехи способны существенно затруднить или вовсе исключить эффективный прием и обработку эхо-сигналов от нешумящих целей. В то же время, этот помеховый сигнал может быть использован в качестве полезного в задачах пеленгации местоположения источника или наведения на него ракеты с головкой самонаведения в случае

преднамеренной природы этого сигнала. То, что мешало работе РЛ системы в активном режиме, стало основой выполнения ею своей системной функции в режиме пассивной локации – помеха и сигнал в радиоинформационном взаимодействии поменялись функциями. Существенно, что функциональная перестройка произошла не за счет изменения параметров состояния соответствующей технической подсистемы, что принято называть адаптацией, а за счет (в т. ч. и автоматического) изменения структуры самой системы (то есть за счет ее самоорганизации).

Понятно, что адекватное теоретическое описание и эффективное проектирование таких систем уже не вписывается в узкие рамки теории и методологии линейных систем, базирующихся на принципах классического детерминизма, а предполагает последовательное применение всего арсенала теоретико-методологических средств нелинейного (синергетического) стиля мышления, рассмотренных выше.

Так, чтобы более или менее полно описать РЛ систему на микроуровне, вектор состояния системы должен включать в себя совокупность параметров каждой конкретной РЛС (КСА): тип РЛС, диапазон рабочих частот, ее техническое состояние, остаточный ресурс, размер и форму создаваемой зоны обнаружения, информационные возможности, пропускную способность, мобилизационные показатели и т. д. Понятно, что с учетом всех образцов РЭТ и их взаимосвязей этот вектор состояния оказывается необозримым. Ситуация коренным образом изменяется с введением параметров порядка, описывающих РЛ систему на макроуровне. Таковыми параметрами являются параметры совокупного РЛП: высота верхней и нижней границ, его точностные характеристики, коэффициент перекрытия, помехоустойчивость, плотность потока обслуживаемых целей и некоторые другие. Помимо очевидного информационного сжатия при описании рассматриваемой системы, эти не столь многочисленные параметры порядка управляют состоянием и взаимосвязями всех ее элементов, демонстрируя рассмотренный ранее принцип подчинения.

В то же время даже самые «долгоживущие» параметры порядка не остаются постоянными. Они конкурируют между собой в стремлении наиболее информационно сжато и адекватно отразить состояние эволюционирующей системы. Например, длительное время к основным функциональным показателям качества РЛ системы было принято относить полноту и достоверность отображения воздушной обстановки, точность отображения трасс, условные показатели качества соответствующей некоординатной информации и др.

Эти показатели определялись заданной моделью воздушной обстановки: в пространстве наблюдения $\Omega_{\text{РЛП}}$ фиксировалось M_0 трасс $r_i(t)$ воздушных объектов, где $i = 1, \dots, M_0$ их характеристики и параметры внешней

среды (электромагнитной или помеховой обстановки). Среднестатистические же показатели качества РЛ системы определялись в процессе моделирования на ЭВМ наиболее типичных или вероятных вариантов воздушной обстановки. При этом стремились определить математическое ожидание числа отображаемых трасс $\langle M \rangle$, числа ложных трасс $M_{\text{ЛГ}}$ и среднеквадратические ошибки σ определения координат, а одновременно и следующие показатели:

$$\mu = \frac{\langle M \rangle}{M_0}; \quad \chi = \frac{M_{\text{ЛГ}}}{M_0}; \quad \sigma_{xy} = \left(M^{-1} \sum_{i=1}^M \sigma_{xyi}^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

характеризующие соответственно ожидаемую полноту, достоверность и точность отображения данной модели воздушной обстановки.

Варьируя варианты построения РЛ системы при заданной модели воздушной обстановки либо меняя модели воздушной обстановки для одной и той же РЛ системы, можно было с той или иной степенью достоверности обосновать предпочтительный вариант построения РЛ системы, предъявить обоснованные требования к тактико-техническим характеристикам РЛС, оценить ожидаемую эффективность РЛ системы в целом.

В то же время с помощью этого параметрического критерия было достаточно сложно проводить количественный многофакторный анализ, позволяющий оценить не только информационные возможности РЛ системы, но и вещественно-энергетические (включая материальные и финансовые) затраты государства на ее создание и поддержание в функционально устойчивом состоянии, так как он рассчитан только лишь на известный вариант воздушной обстановки. За пределами этого параметрического критерия оставался и достоверный анализ важнейшей характеристики взаимодействия РЛ системы с элементами реальной воздушной обстановки – интенсивности и специфики обмена между ними *потоками энтропии* (уровнями информационной неопределенности относительно собственного состояния и поведения). Отсутствие же адекватной параметрической модели РЛ системы и среды ее функционирования не позволяли осуществлять разработку научно обоснованных рекомендаций по ее устойчивому функционированию, успешному совершенствованию и развитию. Поэтому многомерный параметрический критерий $\{\mu, \chi, \sigma_{xy}\}$ уступил место энтропийному критерию, который является более общим по отношению к дисперсии σ_{xy} , так как зависит в явном виде только от вероятности случайных исходов, а не от распределения значений случайной величины (функции исходов) в случае с дисперсией.

В свою очередь, поведение элементов системы относительно параметров порядка РЛ системы не остается пассивным. С количественным или качественным изменением этих элементов могут изменяться и сами параметры порядка. Подобное явление можно наблюдать на примере РЛ системы РТВ. После необоснованного сокращения более 50 % боевого состава радиотехнических подразделений в ходе либеральных реформ Вооруженных сил России в 90-х годах XX века среди перечисленных выше параметров порядка стал доминировать лишь один – параметр, характеризующий структуру (целостность) РЛП страны (коэффициент перекрытия зон обнаружения конкретных РЛС на всех участках поля не менее единицы). Именно этот параметр порядка и предопределил ныне весьма актуальную задачу объединения РЛ системы РТВ с РЛ системой ЕС ОрВД, демонстрируя рассмотренный ранее принцип круговой причинной связи.

Особое значение в решении этих интеграционных задач приобретают рассмотренные ранее эволюционные правила запрета, указывающие на принципиально не реализуемые в данной среде сценарии будущего состояния РЛ системы. Дело в том, что речь идет не просто об объединении двух относительно самостоятельных РЛ подсистем в ЕА РЛС с целью оптимизации затрат на ее содержание и повышение информационной эффективности, а о создании глобального информационного пространства страны в воздушно-космической сфере. Ошибок здесь быть не может ни с точки зрения интересов национальной обороны, ни с точки зрения финансовых затрат государства, беспрецедентных по своим масштабам.

В наибольшей степени нелинейность РЛ системы проявляется в создаваемом ею РЛП. Очевидно, что стабильность структуры этого поля носит весьма условный характер. Даже в стационарном режиме функционирования, предопределенном детерминированным характером воздушной обстановки, параметры этого поля не остаются постоянными из-за влияния рельефа местности, атмосферных явлений, технических неисправностей конкретных радиоэлектронных средств и т. д. В условиях же реального информационного конфликта структура РЛП примет явно выраженный нелинейный характер. Это будет уже не просто некоторая энергоинформационная структура с заданными пространственно-временными и информационными параметрами, а структура-процесс, состояние, пространственная конфигурация и выходные параметры которой постоянно изменяются и, следовательно, достоверно не известны. Понятно, что при оценке состояния такой системы и выборе соответствующих управленческих решений линейный стиль мышления классического системного подхода должен уступить место нелинейному (постнеклассическому) стилю синергетического подхода, содержание которого изложено выше.

1.4. Междисциплинарный подход и философская методология

Проблема соотношения междисциплинарного подхода и философской методологии возникает всякий раз, как только речь заходит о выборе средств и инструментария исследования сложных систем. Дело в том, что многие сторонники системного и синергетического подходов, рассматривая окружающий мир как систему систем, пытаются придать им всеобщий (философский) характер, ошибочно противопоставляя эти подходы философской научной методологии («системный подход сам себе философия»). Между тем общая теория систем и одна из форм ее дальнейшего развития – синергетическая парадигма, эффективно решая обширный круг научных и прикладных задач междисциплинарного характера, оказывается не в состоянии отразить глубинную сущность того или иного объекта действительности, поскольку проблема сущности и различных форм ее существования относится к компетенции философской методологии, в первую очередь, диалектического метода и диалектической логики как теории этого метода. Поэтому область применения междисциплинарной методологии (включая системный подход) в отрыве от философской методологии носит ограниченный характер.

Так, само понятие «система» наделено признаком всеобщности и, следовательно, представляет собой философскую категорию. Именно этим обстоятельством объясняется трудность ее определения с позиции междисциплинарного подхода. В то же время из диалектической логики известен факт, что не только системная методология без философской методологии не способна выявить сущность того или иного фрагмента реальности (объекта), но и философская методология в выявлении сущности без опоры на системную методологию сталкивается со значительными методологическими трудностями. Это явление в методологии науки получило название гносеологического круга (гносеологического парадокса): с одной стороны, чтобы вскрыть сущность некоторого объекта, необходимо выявить его полную основу, то есть найти те основные стороны или отношения этого объекта, которые определяют все остальные его стороны, отношения и связи; с другой – необходимо знать сущность объекта, чтобы выявить его полную основу.

Выход из гносеологического круга обеспечивается системным подходом. В этом случае исследуемый объект рассматривается как функциональный элемент надсистемы и в рамках парных категорий «система и элемент», «структура и функция», «структура и элемент» появляется возможность выявления полной основы рассматриваемого объекта с по-

следующим выходом на его сущность (то есть на совокупность всех необходимых (закономерных) сторон и связей этого объекта, взятых в их естественной взаимосвязи и взаимозависимости). Однако гносеологическим кругом проблемы взаимодействия междисциплинарного подхода и философской методологии не исчерпываются.

Ранее отмечалось, что одной из фундаментальных категорий в системном подходе является категория «взаимодействие». Система как единое целое существует именно благодаря наличию связей между ее элементами, а виды связи (виды взаимодействий) выражают законы функционирования системы. Поэтому в системном подходе (как и в теории технологии) категория «взаимодействие» занимает одно из центральных мест. В то же время, категория «взаимодействие» носит всеобщий (философский) характер и требует своего предварительного исследования в рамках философской методологии. Философское определение категории «взаимодействие» включает в себя *объективную и универсальную динамическую связь, сопровождающуюся взаимным отражением объектами свойств друг друга.* Здесь отражение как всеобщее свойство материи проявляется в способности объектов относительно устойчиво сохранять структуры в процессах взаимодействия. Особенности структур, в свою очередь, определяются *природой* взаимодействующих систем, *предметом* взаимодействия и *видом* преобразования предмета взаимодействия (рис. 1.1), что в системном подходе находит свое отражение в принципе соответствия структуры системы структуре внешней среды.

При распространении же этих представлений на категорию «радиолокационное взаимодействие» сразу возникает противоречие, которое, в отличие от рассмотренного ранее, носит не методологический, а онтологический (сущностный) характер. С одной стороны, РЛ система в своем строении и функционировании задействует модифицированные объекты природы или преобразованные природные процессы (объективный фактор РЛ системы) и в этом своем качестве подчиняется физической причинности. С другой стороны, она представляет собой разновидность социальной системы (субъективный фактор РЛ системы), то есть строится в соответствии с законами человеческой деятельности. В этом своем качестве РЛ система подчиняется технологической причинности. Противоречие снимается в надсистеме, в рамках которой и объективный, и субъективный факторы РЛ системы подчинены информационной причинности, так как основной функцией любой РЛ системы в соответствующей надсистеме является информационная функция.

При этом информационное взаимодействие может протекать в одной из трех форм: согласованное, индифферентное, конфликтное. *Согласованное* взаимодействие подразумевает согласованность мотивов и единство

целей, возникающих при функционировании системы и объектов взаимодействия. Оно характеризуется наличием достаточно полных сведений об условиях, параметрах и характеристиках системы и надсистемы, наличием физических каналов передачи информации, а также сведений о распространяемых в них сигналах, способах кодирования передаваемой информации и т. д. На уровне информационных средств РЛ системы такая ситуация характерна для подсистем радиосвязи и радиоуправления. На уровне надсистемы такая ситуация соответствует обмену радионавигационной информацией со своими воздушными объектами.

Индиifferentное информационное взаимодействие реализуется в ситуации «безразличия» участвующих в нем объектов по отношению к процессу получения информации. При этом уровень априорной неопределенности относительно характера взаимодействия (по сравнению с предыдущим случаем) возрастает. Индиifferentность типична для РЛ системы гражданской авиации (системы РТОП), условия функционирования которой не предполагают целенаправленных мешающих воздействий внешней среды.

Конфликтное информационное взаимодействие отличается наличием антагонизма целей сторон – участников взаимодействия, стремящихся достигнуть несовместимых относительно друг друга состояний. Конфликтный характер взаимодействия сопровождается высоким уровнем априорной неопределенности относительно состояния и намерения сторон, параметров и характеристик имеющихся каналов передачи информации, а также используемых в них носителей информации (сигналов). Это связано с реализацией одной из сторон или обеими сторонами специальных мероприятий по скрытию или искажению информации, призванных затруднить работу другой стороны.

С точки зрения синергетики речь идет об обмене конфликтующими сторонами потоками энтропии (потоками информационной неопределенности относительно намерений и состояний друг друга) с целью перевода противодействующей стороны в состояние неустойчивости (состояние хаоса), находясь в котором она способна к распаду даже после незначительного (вещественно-энергетического или информационного) воздействия со стороны противостоящей системы. Именно такая ситуация на уровне надсистем характерна для взаимодействия ВВС и ПВО или АНС Российской Федерации режима военного времени с СВН противника в ходе отражения воздушного удара, а на уровне систем более низкого порядка – для взаимодействия РЛ системы РТВ со средствами РЭП и радиотехнической разведки (РТР) воздушного противника, относящихся к классам радиоэлектронных средств извлечения и разрушения информации.

Очевидно, что в конфликтные взаимоотношения по отражению воздушного удара вовлекаются не отдельные средства, а целостные сложные

системы, решающие согласованный ряд задач в интересах достижения поставленных целей. Отдельные элементы таких систем не являются независимыми, а дополняют и взаимно «помогают» друг другу, вследствие чего конфликтное взаимодействие противостоящих сторон приобретает все характерные черты сложного коалиционного конфликта – столкновения двух коалиций, каждая из которых представлена совокупностью элементов, стремящихся к упреждающему решению поставленных перед ними задач, в том числе и путем прямого информационного или вещественно-энергетического (огневого) вмешательства в процесс функционирования элементов противостоящей стороны. Но поскольку особенности взаимодействующих структур определяются *природой* взаимодействующих систем, *предметом* взаимодействия, *видом* преобразования предмета взаимодействия и конфликтным характером этого взаимодействия, что в системном подходе находит свое отражение в упоминавшемся ранее принципе соответствия структуры системы структуре внешней среды, постольку *облик каждой из конфликтующих систем и реализуемые в ней способы функционирования определяются характером протекающего между ними информационного конфликта.*

Как известно, часть научной общественности и, в особенности, представители точных наук, воспринимают диалектическую логику неоднозначно, обвиняя ее в пустопорожности рассуждений. С появлением синергетической парадигмы ситуация принципиально изменилась. Как пишет в этой связи Д.С. Чернавский, «сейчас, опираясь на синергетику, можно сказать, что областью применения диалектической логики являются все развивающиеся системы, в том числе и в особенности живые». И далее: «Подводя итог, можно сказать, что современная синергетика является математической основой диалектического материализма»⁶⁷. Так это или нет, время покажет. Однако такой творческий союз философской и междисциплинарной методологии с точки зрения успешности решения ряда актуальных проблем и задач радиолокационной системотехники можно только приветствовать.

Таким образом, эвристический потенциал рассмотренного ранее **системного гомеостаза методов** междисциплинарной методологии может быть существенно усилен, если в практике синтеза и анализа сложных нелинейных систем он будет применяться в диалектическом единстве с методами дисциплинарной и всеобщей (философской) методологии.

⁶⁷ Чернавский Д.С. О методологических аспектах синергетики // Синергетическая парадигма. М. : Прогресс–Традиция, 2002. С. 55.

Глава 2. ЕДИНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА СТРАНЫ КАК НОВЫЙ ЭТАП В РАЗВИТИИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

2.1. Вводные замечания

Научное познание и основанная на нем проектная деятельность обычно подчинены некоторой схеме метода (определенной совокупности идеалов и норм исследования или принципов системотехнической деятельности). Исходным пунктом здесь выступает некоторое противоречие в форме проблемной ситуации, когда новые научные факты либо вновь возникшие методы системотехнической деятельности не находят адекватного описания и объяснения в рамках существующей теории или методологии. Теоретической формой представления этого противоречия выступает научная проблема, которая предопределяет направление поиска, способствует выдвижению научных гипотез, конструктивных идей и фиксирует полученный научный результат по степени разрешения исходного противоречия. Однако и описание проблемной ситуации в форме научной проблемы, и выдвижение научных гипотез и идей по ее разрешению не происходят произвольно, а базируются на некоторых теоретических представлениях об исследуемом фрагменте реальности. Здесь на первое место выступает вопрос о предпосылках, которые определяют отправные точки и направления исследовательской или проектной деятельности.

Идеальным вариантом таких предпосылок является научная теория. Однако существует множество ситуаций, когда наука начинает исследовать соответствующую предметную область, не имея средств и возможностей создать конкретные теоретические схемы для ее объяснения. В таких ситуациях наука изучает свою область эмпирическими методами, а теоретические предпосылки черпает из соответствующей научной картины мира, реализуя так называемый здравый смысл науки. В этом случае «принципы картины мира ставят задачи исследованию, целенаправляют наблюдения и эксперименты и дают им объяснения»⁶⁸. Предпринятое нами теоретическое описание РЛ систем подпадает именно под такую методологическую схему.

В самом общем виде *под научной (в рассматриваемом случае – системной) картиной мира* принято понимать исторически обусловленную совокупность образно-модельных представлений о соответствующем

⁶⁸ Степин В.С. Теоретическое знание. М. : Прогресс-Традиция, 2003. С. 294.

фрагменте реальности, выработанную научным познанием и выраженную в некоторой системе категорий, принципов, законов и гипотез, имеющих междисциплинарный или метадисциплинарный статус.

Изложенные ранее теоретические основания РЛ систем и принципы междисциплинарной методологии можно принять в качестве основных компонентов системотехнической картины мира, позволяющих перейти к анализу проблем становления и развития ЕАРЛС. В то же время сама эта система имеет некоторые специфические предпосылки и собственную предысторию. Рассмотрим их.

2.2. Предпосылки создания ЕАРЛС страны

В отечественной практике контроль воздушного пространства и управление воздушным движением длительное время осуществлялись двумя относительно независимыми РЛ системами военного и гражданского (народно-хозяйственного) назначения. Военный сектор включал РЛ систему РТВ войск ПВО и частично – достаточно разобщенные подразделения радиотехнического обеспечения Военно-воздушных сил (ВВС), радиотехнических частей и соединений войсковой ПВО, средства РЛ разведки, навигации и связи Военно-Морского флота (ВМФ) – радиотехнические части, надводные корабли РЛ дозора, средства РЛ разведки береговой системы наблюдения, а также авиационные комплексы РЛ дозора и наведения. Гражданский сектор был в основном представлен средствами радиолокации, радионавигации и связи Министерства ГА, развернутыми на аэродромах и воздушных трассах.

В 1973 году Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР №130-49 от 16.02.1973 г. эти две относительно самостоятельные подсистемы были объединены в Единую систему организации воздушного движения и использования воздушного пространства – ЕС ОВД и ИВП (рис. 2.1). Она создавалась преимущественно на базе службы аэронавигационной информации (АИ) Министерства гражданской авиации (МГА) СССР как стратегическая совмещенная (военно-гражданская) система обеспечения безопасного и эффективного ИВП страны в интересах решения народно-хозяйственных и оборонных задач в условиях мирного и военного времени. Ее информационная подсистема строилась преимущественно на базе обзорных трассовых и аэродромных РЛС первичного и вторичного радиолокационного поля, а также средств связи, радионавигации и посадки, выполняя преимущественно задачи радиолокационного и радионавигационного обеспечения полетов гражданской авиации.

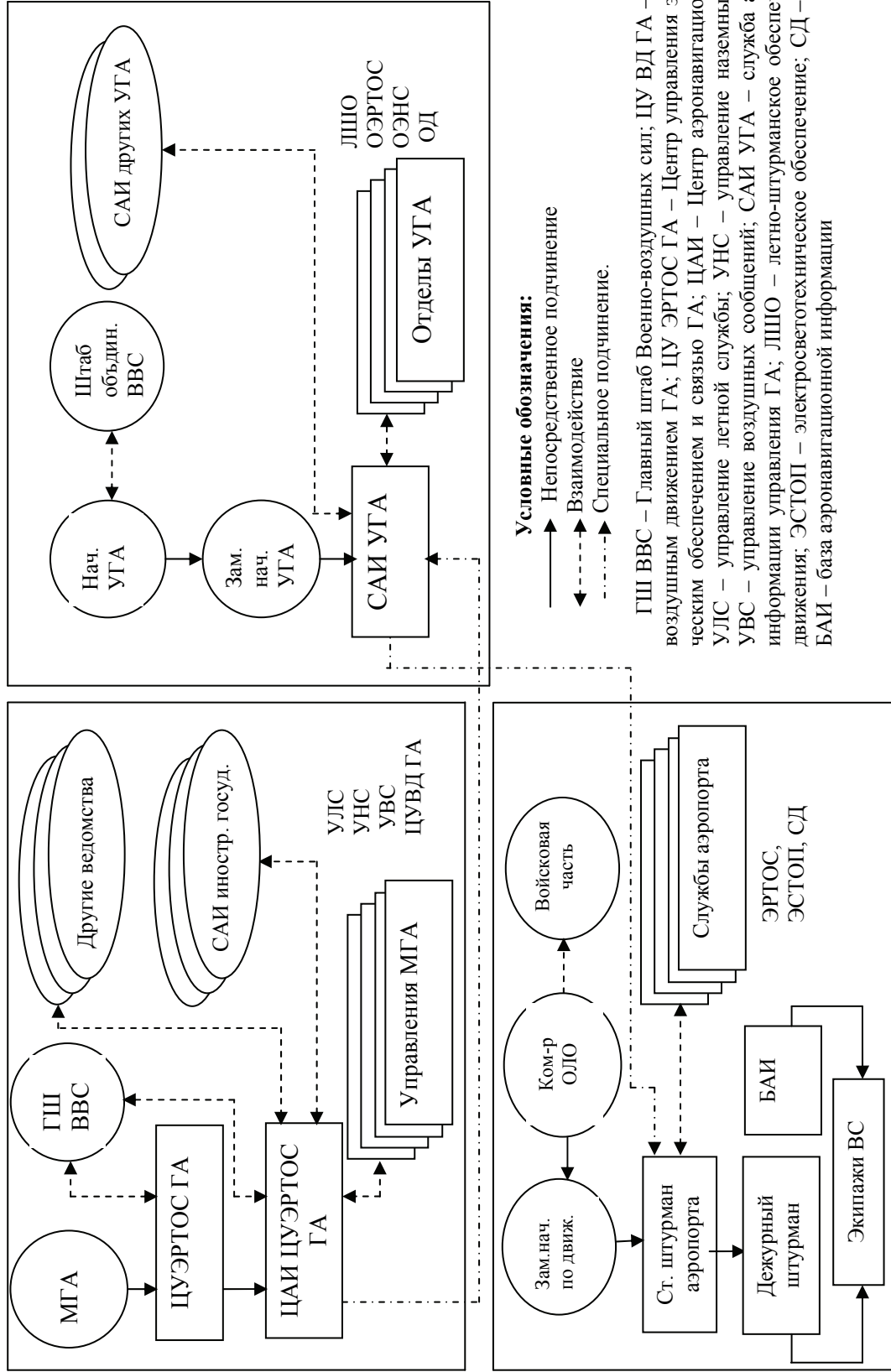


Рис. 2.1. Структура службы аэронавигационной информации МГА СССР

К 1983 году, усилиями Правительства и ряда министерств, работа по созданию ЕС ОВД и ИВП была завершена⁶⁹.

В эти же годы были введены в эксплуатацию первые автоматизированные системы управления воздушным движением (УВД): «Старт» в аэропорту Пулково (г. Ленинград), импортные системы «ТЕРКАС» в Московской зоне, в аэропортах гг. Киев и Минеральные воды и еще в семи аэропортах. Созданная единая система на основе частичной автоматизации позволила повысить уровень безопасности полетов воздушных судов (ВС) и способствовала более рациональному использованию воздушного пространства (ВП).

Основным недостатком созданной системы оказался ведомственный подход к организации УВД, в рамках которого военный и гражданский секторы (рис. 2.2) функционировали автономно и подчинялись различным ведомствам (соответственно МГА и Министерства обороны – МО). Это сопровождалось нерациональным использованием технических средств, распылением капитальных вложений и замедлением развития, что, в свою очередь, не способствовало дальнейшему повышению эффективности и безопасности полетов.

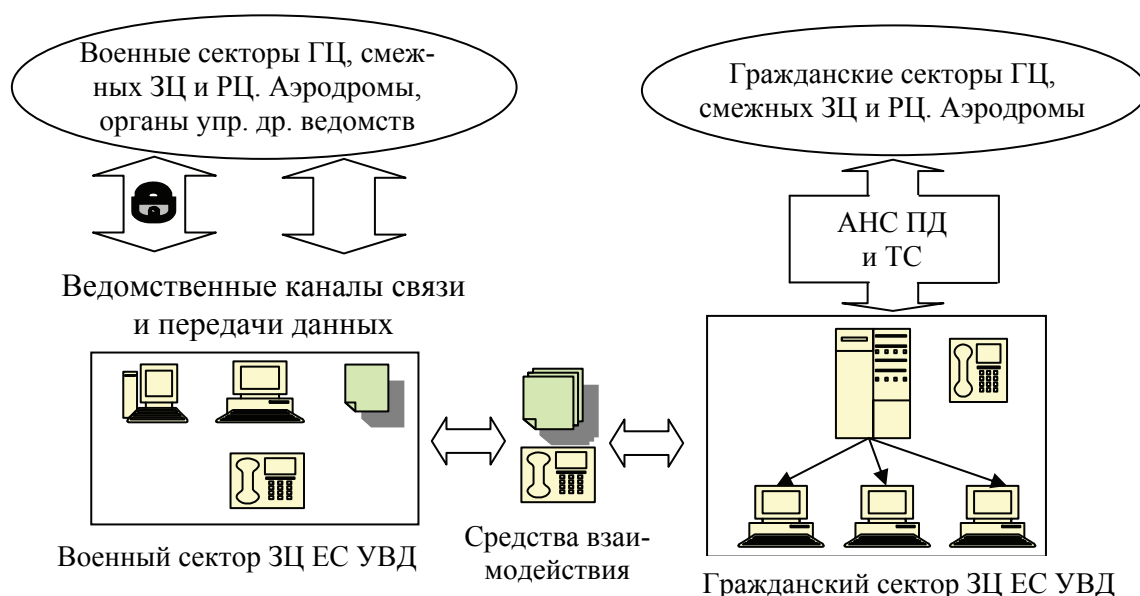


Рис. 2.2. Схема взаимодействия военных и гражданских секторов центров ЕС УВД СССР на примере зонального центра: ГЦ – главный центр; ЗЦ – зональный центр; РЦ – районный центр; АНС ПД и ТС – аппаратура наземной связи, передачи данных и таблиц сообщений

⁶⁹ Позднее система «ЕС ОВД и ИВП» получила название «ЕС ОрВД», как это первоначально указано в 1-й главе. Ниже мы будем придерживаться второго варианта обозначения системы.

По мере развития авиационного комплекса страны и усложнения задач оборонного характера в воздушно-космической сфере не только упомянутое ранее глобальное движение вещества и энергии, но и технологическое движение информации стало носить явные признаки *технологической формы движения материи*. Становилось все более очевидным, что дальнейшее содержание функционально подобных информационных систем без их объединения в некоторую информационную структуру более высокого уровня организации противоречит основополагающим законам этого движения. К тому же параллельное содержание функционально подобных систем все в большей степени ложилось на государство непосильным финансовым бременем.

Кроме того, примерно в этот же период времени в общей теории науки происходило становление теории и методологии системного подхода, в рамках которого приобретение некоторой целостностью системного (сверхсуммарного) качества, превосходящего суммарное качество входивших в нее частей, воспринималось уже как научный факт. Поэтому к специалистам военного и гражданского ведомств постепенно пришло понимание очевидного с точки зрения системного подхода обстоятельства, что раздельное проектирование, создание и практическое применение информационных систем военного и гражданского назначения сопровождается не только потерей информационного качества (качества наблюдения), но и неоправданным увеличением расходов материально-технических и финансовых ресурсов государства. Объединение же этих систем позволяет нарастить единое РЛП страны в условиях ограниченности финансовых ресурсов за счет взаимного использования информации от унифицированных радиолокационных средств, которые, в свою очередь, могут быть разработаны на единых технических принципах с использованием информации от всех источников наблюдения за ВД.

Подобный подход стал постепенно утверждаться и относительно средств автоматизации процесса сбора, обработки, отображения и передачи РЛИ, которые также стали проектироваться на единой технической основе для обеспечения совместимости и унификации. Возможность сопряжения систем военного и гражданского назначения была обусловлена их технологическим подобием, поскольку РЛ система РТВ, как и РЛ система ЕС ОрВД, решает свои целевые задачи на основе взаимодействия технических средств наблюдения за воздушным движением, навигации и единого времени, средств наземной и воздушной связи, автоматизации сбора, обработки и отображения информации, идентификации воздушных объектов, планирования полетов государственной авиации.

В этой связи Правительством СССР (Постановление № 430 от 30.04.1990 г.) была образована вневедомственная Государственная комиссия по ИВП и УВД при Совете Министров СССР (Госаэронавигация

СССР), на которую было возложено решение организационных задач по переходу от ведомственных принципов формирования и функционирования ЕС ОрВД к вневедомственным (государственным), а в последующем (с 01.04. 1992 г.) – обеспечение практического руководства указанной системой и полная ответственность за ее функционирование. Председателем Госаэронавигации СССР был назначен маршал авиации дважды Герой Советского Союза Главком ВВС А.Н. Ефимов.

С распадом союзного государства технические и организационные мероприятия по созданию Госаэронавигации оказались не реализованными и в ведение России перешла ЕС ОрВД функционирующая на основе старых ведомственных принципов. Страна встала не только перед необходимостью адаптации российской части ЕС ОрВД к задачам аэронавигационного обеспечения отечественной авиации, но и преобразования ее в государственную информационную систему.

В сентябре 1992 года Указом Президента Российской Федерации № 1148 от 30.09 была создана комиссия по регулированию воздушного движения (Росаэронавигация) в виде самостоятельного подразделения центрального аппарата Минтранса Российской Федерации. Принято считать, что с этого момента системы безопасности движения ВС вошли в ведение Минтранса России. Этим же указом была образована Межведомственная комиссия по ИВП и УВД (МВК ИВП и УВД), определены ее состав и решаемые задачи. В состав комиссии вошли 14 представителей Минобороны, 9 представителей Минтранса, 5 представителей ФСК и МВД, 3 представителя от общественных организаций. Были также утверждены Положение о ЕС ОрВД России и Положение о МВК. Председателем МВК ИВП и УВД был назначен главком ВВС.

Для выполнения комплекса организационно-технических мероприятий по модернизации ЕС ОрВД Распоряжением Правительства Российской Федерации №217-р от 26.11.92 г. была образована Межведомственная координационная комиссия по модернизации ЕС ОрВД под председательством министра транспорта В.Б. Ефимова. На Минтранс и Минобороны России (в части выполнения специальных требований) были возложены функции государственного заказчика по модернизации ЕС ОрВД, а для руководства работами, связанными с выполнением этих функций, Минтрансу России предписывалось создать специальную Генеральную дирекцию с участием откомандированных из Минобороны в Минтранс России 12 специалистов из числа офицерского состава. Одновременно было предусмотрено создание головной государственной организации от оборонной промышленности по выполнению работ, связанных с модернизацией ЕС ОрВД. В декабре 1992 года Генеральная дирекция Минтранса России была сформирована. Ее руководителем – заместителем министра транспорта – был назначен А.Н. Коротоношко. Первым замести-

телем Генерального директора по вопросам Минобороны России был назначен прикомандированный из Войск ПВО Начальник Радиотехнических войск ПВО генерал-лейтенант Г.К. Дубров. Для работы в дирекции от Минобороны были одновременно привлечены и ведущие специалисты РТВ полковники О.О. Гапотченко, В.И. Ивасенко, А.Ф. Балуев.

Первым шагом действий Генеральной дирекции стала подготовка пакета организующих директивных документов Правительства Российской Федерации, основным из которых было Постановление Правительства Российской Федерации от 30.04.93 г. № 403. Этим Постановлением предписывалось:

Министерству транспорта Российской Федерации и Министерству обороны Российской Федерации:

- совместно с заинтересованными министерствами и ведомствами провести в период с 1993 по 1995 год модернизацию ЕС ОрВД Российской Федерации, включающей в себя систему организации ИВП, систему организации потоков воздушного движения (ВД) и систему УВД с их организационными структурами;

- разработать и представить в установленном порядке до 30 мая 1993 года в Совет Министров – Правительство Российской Федерации программу модернизации ЕС ОрВД Российской Федерации с учетом результатов работы по созданию **Единой автоматизированной РЛ системы страны**, предложений международного консорциума ГАТСС французской фирмы «Томсон-ЦСФ» и других работ по организации ЕС ОрВД, осуществляемых отечественными, иностранными и совместными предприятиями;

Комитету Российской Федерации по оборонным отраслям промышленности:

- создать научно-технический центр – головную организацию генерального подрядчика для предприятий промышленности Российской Федерации, участвующих в модернизации ЕС ОрВД;

Министерству обороны Российской Федерации:

- разработать совместно с Минтрансом России и утвердить до 1 октября 1993 года перечень радиотехнических позиций Войск ПВО и ВВС, которые могут быть использованы в качестве **подразделений двойного назначения**.

Было также поручено разработать статус подразделений двойного назначения, порядок их комплектования и содержания и до утверждения указанного перечня приостановить сокращение РТВ ПВО, Войск связи и радиотехнического обеспечения ВВС в районах Сибири, Крайнего Севера, Дальнего Востока и других районах России, где осуществляется полет ВС по международным авиатрассам. Однако «этот пункт Постановления Прави-

тельства Российской Федерации Министерством обороны был проигнорирован и сокращение подразделений РТВ ПВО в пунктах, указанных в Постановлении, осуществлялось ускоренными темпами, благодаря чему указанные районы остались без средств радиолокационного контроля...»⁷⁰.

К сказанному Г.К. Дубровым следует добавить, что по истечении 18 лет с момента разработки Генеральной дирекцией этих предложений ЕАРЛС страны оказалась представленной только несколькими работоспособными фрагментами ЕС ОрВД двойного назначения. Тем не менее, в связи с существенным сокращением боевого состава РТВ, создание такой системы стало рассматриваться не только как объективная закономерность, но и как единственная возможность более или менее успешного и ускоренного восстановления РЛ контроля за ВП хотя бы над основными регионами страны. Поэтому прежде чем перейти к рассмотрению структуры и принципов построения ЕАРЛС, остановимся на краткой характеристике специфики информационных систем военного и гражданского назначения как технико-технологической основы единого информационного пространства страны.

2.3. Краткая характеристика радиолокационной системы РТВ

Радиолокационная система РТВ составляла информационную основу системы контроля ВП советского периода развития страны. Она включала развернутые на местности в определенном порядке радиотехнические подразделения, оснащенные стационарными и мобильными РЛС (радиолокационными комплексами – РЛК) боевого и дежурного режимов, комплексами средств автоматизации, управления и связи в соответствии с целями и задачами ПВО страны. В рамках этой надсистемы РЛ система РТВ выполняла ответственные задачи по контролю ИВП, ведению РЛ разведки СВН противника, выдачи разведывательной и боевой информации, необходимой для решения задач управления войсками и радиолокационного обеспечения (РЛО) боевых действий ЗРВ, ИА и частей РЭБ Войск ПВО (рис. 2.3).

Пика развития РТВ как род войск в составе Войск ПВО страны достигли к середине 1980-х годов. Боевой состав и оперативное построение войск опирались на научные рекомендации и соответствовали требованиям других родов Войск ПВО к уровню решения стоящих перед РТВ задач. В те годы поставки в РТВ нового вооружения из промышленности превышали 150 единиц в год, примерно такое же количество техники ежегодно

⁷⁰ Дубров Г.К. О Радиотехнических войсках и не только... М., 2007. С. 104.

подвергалось капитальному ремонту. Это позволяло поддерживать общую боеготовность группировки РТВ на требуемом уровне и оптимизировать финансовые затраты. К моменту распада Советского Союза на территории Российской Федерации в составе РТВ ПВО находилось около 40 радиотехнических бригад и полков, 600 радиотехнических подразделений. На их вооружении стояло несколько тысяч РЛС, что позволяло решать весь объем стоящих перед войсками задач. РЛО охраны государственной границы в воздушном пространстве осуществлялось на всем ее протяжении, начиная с высот 3 000 м и более, и свыше 40 % – на малых высотах⁷¹.

В процессе либеральной военной реформы к концу 1990-х годов в РТВ, по сравнению с концом 1980-х годов, количество боевых полков и бригад уменьшилось в три раза, количество боевых и радиотехнических подразделений – почти в четыре раза, личный состав был сокращен в пять раз. Вследствие этого возможности РТВ по контролю ВП России сократились более чем на 50 %. К концу военной реформы сохранились лишь группировки Центрального, Западного и Северо-Западного регионов. Одновременно были существенно снижены возможности по контролю ВП над северными и восточными регионами, ведению радиолокационной разведки по границе с Казахстаном, Монголией, Китаем⁷². В целом РЛП с 34 млн кв. км (по состоянию на 20.08.1991 г.) сократилось: а) до 14 млн кв. км – к 01. 01. 1999 г. и б) до 7,2 млн кв. км – к 01.01 2001 г. (рис. 2.4)⁷³.

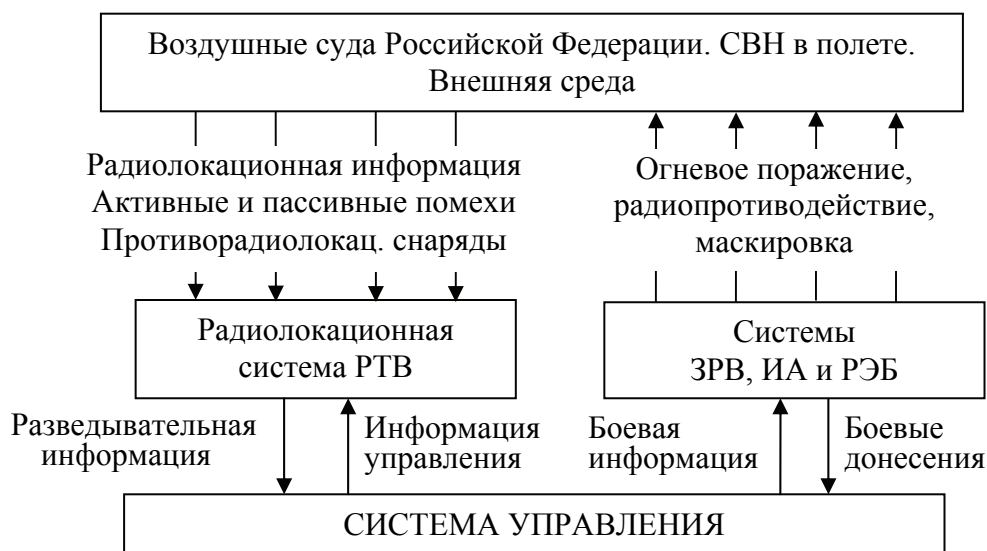


Рис. 2.3. Структурная схема системы ПВО

⁷¹ Астапенко Ю.А., Волков С.А., Кубанов Ю.К. РТВ как важнейший компонент ВКО // ВКО. 2010. № 4. С. 32–43.

⁷² Шрамченко А.В. Поиск новых подходов // ВКО. 2004. №1. С. 24–27.

⁷³ Дубров Г.К. России грозит слепота // Доклад на Конференции Союза ветеранов Войск ПВО 28.04. 2000 г.

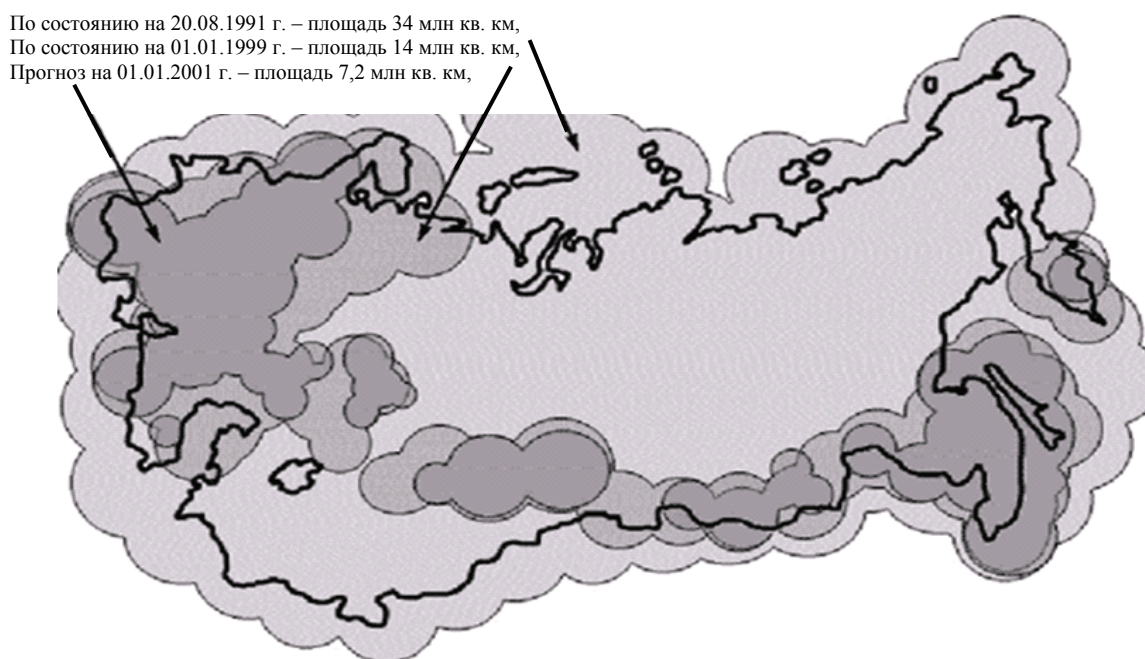


Рис. 2.4. Динамика сокращения РЛ поля над территорией бывшего СССР
(высота сечения 10 000 м)

Если в советское время зона контроля на высоте 10 000 перекрывала 100 % границы, то к концу 1999 года аналогичный показатель составил 55 %. Еще сильнее – с 84 % до 23 % – уменьшилось РЛП на малых (1 000 и менее м) высотах. Дежурное РЛП отсутствовало даже над Москвой. Удовлетворительное положение сохранилось лишь на северо-западной границе, на юге Приморского края и на Северном Кавказе. Устойчивый радиолокационный контроль над полетами авиации в приграничной полосе обеспечивался только на Кольском полуострове, по побережью Балтийского, Черного и Азовского морей, а также в Приморье. К началу 2000 года боевой состав РТВ вышел за минимально допустимые рамки при том, что перечень и объем возлагаемых на них информационных задач остался прежним, а требования к объему и качеству РЛИ даже возросли.

Выделяемые в последующие годы финансовые ресурсы не позволяли в полной мере обеспечить решение возложенных на РТВ информационных задач, что сопровождалось дальнейшим снижением их боевых возможностей не только из-за количественного сокращения, но и качественного ухудшения состояния СРЛ. При этом столь масштабная утрата РЛ системой РТВ своих информационных возможностей происходила на фоне сохранения угрозы воздушного нападения с применением высокоточного оружия и возникновения дополнительных угроз воздушного терроризма.

Вот как сложившуюся ситуацию оценивает начальник штаба – первый заместитель начальника ПВО ВВС П.П. Кураченко. «Анализ развития

средств воздушно-космического нападения иностранных государств, – отмечает военачальник, – показывает, что до 2020 года произойдут коренные изменения, связанные с освоением воздушно-космического пространства как единой сферы вооруженной борьбы. В вооруженные силы основных иностранных государств поступят принципиально новые средства и системы: гиперзвуковые и воздушно-космические летательные аппараты, разведывательно-ударные беспилотные аппараты, а также оружие, основанное на новых физических принципах. К этому же сроку произойдет интеграция средств разведки, связи, навигации и управления это способно обеспечить предполагаемому противнику возможность наносить скоординированные во времени высокоточные удары практически по любой точке земного шара, по всем объектам на территории и уже сегодня требует от нас адекватного совершенствования противовоздушной, а в ближайшей перспективе и воздушно-космической обороны России, предусматривающей объединение под единым управлением всех сил и средств, предназначенных для решения задач защиты от воздушно-космического нападения противника, в том числе сил и средств радиолокационной разведки ПВО»⁷⁴.

Для устранения сложившихся проблем в рамках рассмотренных ранее организационно-технических мероприятий были предприняты некоторые меры по получению информации о воздушной обстановке КП частей и подразделений РТВ, а также КП соединений ПВО от средств радиолокации Росавиации и Росаэронавигации, частей ПВО Сухопутных войск, ВМФ, расположенных на территориях, где нет сил и средств РТВ. Предполагалось, что это в той или иной мере позволит восстановить РЛП над территорией Российской Федерации, что, в свою очередь, позволит усилить радиолокационный контроль за государственной границей и порядком ИВП со стороны боевых расчетов. Однако сохранившаяся ведомственная разобщенность, техническая несовместимость по информационным входам и выходам многих радиолокационных средств, а также отсутствие единой автоматизированной системы сбора, обработки, отображения и передачи РЛИ существенно снизили ожидаемый интеграционный эффект. Все это, как отмечалось ранее, обусловило объективную необходимость возвращения к идее создания ЕАРЛС, способной в полном объеме решать задачи ПВО и УВД на основе объединения в единую систему технических, информационных и финансовых возможностей всех ведомств, имеющих средства радиолокации, в первую очередь – РТВ ПВО и ЕС ОрВД.

⁷⁴ Виктор Михайлов. Противовоздушная оборона должна быть готова отразить любой удар по объектам на территории Российской Федерации // Красная Звезда. 18 декабря 2009 г.

2.4. Обобщенная структура и функции ЕС ОрВД Российской Федерации

ЕС ОрВД Российской Федерации – ее структура, целевые функции, уровни системной организации, технико-технологическое обеспечение, формы взаимодействия со смежными системами и надсистемой – находится в постоянном движении, развитии. Диалектика этого движения и развития столь стремительна, что зафиксированные на какой-либо момент времени основные признаки и характеристики ее текущего состояния через незначительный временной интервал могут существенным образом отличаться от признаков и характеристик последующих этапов анализа. Поэтому с некоторой долей определенности здесь можно говорить только лишь об истории ее становления как единой системы. Дальнейшая же ее перспектива, в т. ч. и движение к той или иной структурной организации в форме АНС Российской Федерации, может пока рассматриваться только как определенная тенденция, возможность реализации которой детерминирована множеством социально-экономических, финансовых, военно-научных, научно-технических, организационных и других факторов.

После распада СССР, разделения предприятий ГА на самостоятельные авиакомпании и аэропорты, а также обособления подразделений ГА, связанных с УВД, ЕС УВД СССР была преобразована в ЕС УВД Российской Федерации. Эти преобразования были связаны не только с изменениями форм собственности, но и с существенным снижением пассажирооборота, пик которого пришелся на 1993 год (рис. 2.5⁷⁵).

Основным нормативным документом, отразившим произошедшие здесь изменения, было Положение о Единой системе управления воздушным движением Российской Федерации (ЕС УВД РФ), утвержденное Постановлением Правительства Российской Федерации № 1148 от 6 октября 1994 года. В соответствии с этим положением ЕС УВД РФ была призвана обеспечить организацию ИВП, УВД, рациональное распределение ВП в интересах экономики и обороны, безопасность полетов, а также контроль за соблюдением порядка ИВП страны. Как и в период функционирования МГА СССР, основу ЕС УВД РФ составили военные и гражданские органы УВД Российской Федерации. В органы управления преобразованной ЕС УВД РФ вошли: а) Межведомственная комиссия по ИВП и УВД Российской Федерации, б) зональные межведомственные комиссии по ИВП и УВД, в) органы УВД МО Российской Федерации и Федеральной авиационной службы России, г) оперативные органы ЕС УВД РФ, включающие: главный,

⁷⁵ Самойлов В.А [и др.]. Прогнозирование развития российского авиарынка // Сб. научн. трудов ГосНИИ ГА. М., 2004. С. 3–17.

зональные и вспомогательные зональные центры ЕС УВД РФ, органы УВД аэропортов, находящихся в федеральной собственности, а также органы управления предприятий по аэронавигационному обслуживанию. Общее руководство организацией ИВП было возложено на Межведомственную комиссию по ИВП и УВД Российской Федерации.

На органы, входящие в состав ЕС УВД РФ, были возложены следующие задачи: а) организация ИВП и рациональное его распределение; б) обеспечение совместно с заинтересованными федеральными органами исполнительной власти выполнения обязательств, принятых в соответствии с международными договорами Российской Федерации по вопросам ИВП и УВД; в) организация и непосредственное УВД над территорией страны и в ВП, где ответственность за УВД несет Российская Федерация; г) обеспечение экономичности, регулярности и безопасности ВД; д) организация и осуществление контроля за порядком ИВП Российской Федерации; е) разработка нормативных актов, определяющих порядок ИВП, организации УВД и функционирования ЕС УВД РФ; ж) осуществление перевода органов управления в особый период с мирного на военное положение в установленном порядке, другие текущие задачи. На оперативные органы ЕС УВД были возложены задачи планирования ИВП и УВД, а также контроль за соблюдением порядка использования воздушного пространства в пределах установленных для них районов и зон. Как следствие принятых мер, объем пассажирооборота вышел на положительную динамику, отвечая темпам роста ВВП страны (рис. 2.5)⁷⁶.

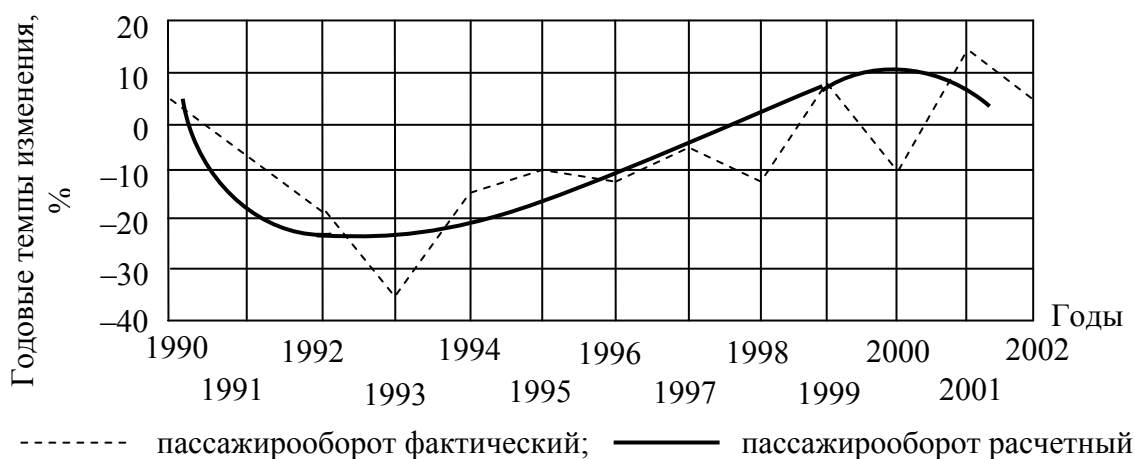


Рис. 2.5. Динамика объемов внутренних пассажирских перевозок России в период с 1990 по 2002 год

⁷⁶ В более поздней статье (см. : И.А. Самойлов [и др.]. Тенденции и прогнозы развития рынка авиаперевозок и парка авиакомпаний. Итоги прошедшего десятилетия // Сб. науч. трудов ГосНИИ ГА. М., 2011. С. 14–19) авторы подтверждают эту тенденцию, отмечая что «... в 2010 году воздушный транспорт более чем на 30 % превысил пассажирооборот железнодорожного транспорта в дальнем сообщении, хотя в 2000 году уступал ему более чем в 2 раза».

Однако по мере восстановления объема авиационных перевозок и услуг и, следовательно, усложнения задач аэронавигационного обеспечения полетов гражданской (коммерческой) и государственной авиации возникла необходимость в совершенствовании организационной структуры ЕС, технологий и нормативно-правовой базы ИВП и УВД. В этой связи Постановлением Правительства Российской Федерации от 18 июня 1998 г. № 605 понятию «организация воздушного движения» (ОрВД) было придано более развернутое содержание, а ЕС УВД РФ **переименовано** в ЕС ОрВД Российской Федерации. Постановлением, в частности, было определено, что государственное регулирование ИВП должны осуществлять: а) МО Российской Федерации (в лице Управления по ИВП и УВД) – полное государственное регулирование ИВП; б) Федеральная авиационная служба России (в лице Управления государственного регулирования ОВД) – государственное регулирование деятельности по использованию той части ВП, которая в установленном порядке определена для воздушных трасс (внутренних и международных), местных воздушных линий (МВЛ), районов авиационных работ, гражданских аэродромов и аэропортов.

Одновременно в функцию ОрВД как технологической формы реализации задач государственного регулирования вменялось: а) обслуживание (управление) воздушного движения (ОВД); б) организация потоков воздушного движения (ОПВД); в) организация воздушного пространства (ОВП) в целях обеспечения ОВД и ОПВД. При этом нормативная основа ОрВД устанавливалась федеральными авиационными правилами «Организация воздушного движения», утвержденными Постановлением Правительства Российской Федерации от 22.09. 1999 г. № 1084. В частности, *обслуживание* (управление) ВД возлагалось на центры ЕС ОрВД и органы ОВД (управления полетами) в процессе выполнения суточного плана ИВП. Комплекс мероприятий ОВД предусматривал: диспетчерское обслуживание ВД; полетно-информационное обслуживание ВД; консультативное обслуживание ВД и аварийное оповещение. *Организация* потоков ВД рассматривалась как деятельность по организации безопасных, упорядоченных и ускоренных потоков ВД для обеспечения максимально возможного использования пропускной способности органа ОВД и соответствия объема ВД пропускной способности, заявленной соответствующим органом ОВД. Деятельность по ОПВД возлагалась на центры ЕС ОрВД во взаимодействии с органами ОВД.

Организация ВП включала процесс планирования, направленный на обеспечение максимального использования имеющегося ВП на основе динамичного распределения по времени и в отдельных случаях – резервирования ВП для различных категорий пользователей в целях удовлетворения краткосрочных потребностей.

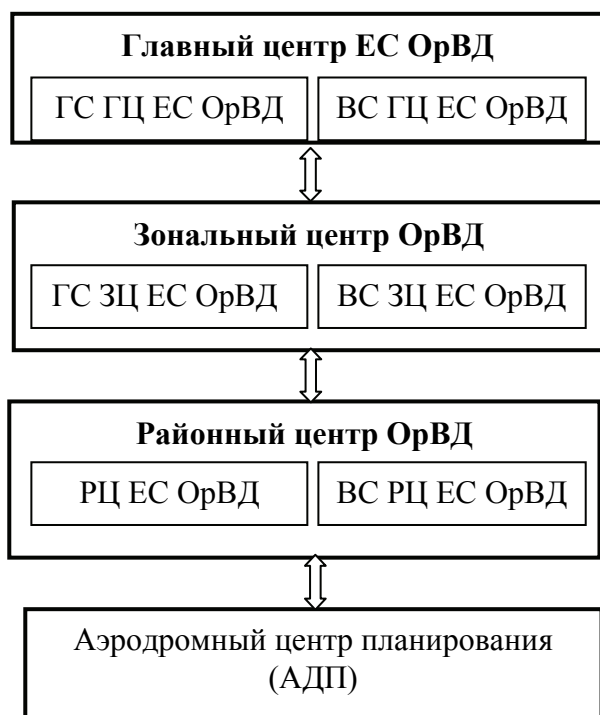


Рис. 2.6. Схема органов ЕС ОрВД: ГС – гражданский сектор; ВС – военный сектор; ГЦ, ЗЦ, РЦ – соответственно главный, зональные и районные центры

созданная Правительством Российской Федерации, и ее территориальные органы – зональные межведомственные комиссии по ИВП Российской Федерации, созданные председателем Межведомственной комиссии. К *оперативным* органам ЕС были отнесены: главный и зональные центры ЕС ОрВД, включающие военный и гражданский секторы; вспомогательные зональные центры ЕС ОрВД, состоящие из гражданских секторов; районные и вспомогательные районные центры ЕС ОрВД, состоящие из военных и/или гражданских секторов; органы ОВД аэропортов ГА, в т. ч. федерального значения, территориально совмещенные с РЦ (ВРЦ) ЕС (рис. 2.6).

Одновременно предусматривалось, что руководящие органы ЕС создаются Министерством обороны Российской Федерации и Федеральной авиационной службой России на федеральном и региональном уровне в целях осуществления исполнительных, разрешительных и контрольных функций в области организации ИВП (в пределах своей компетенции), а также обеспечения руководства деятельностью военных и гражданских органов ЕС. Положения об указанных руководящих органах утверждались соответственно Министром обороны Российской Федерации и директором Федеральной авиационной службы России. Непосредственная же организация ИВП возлагалась на органы ЕС, а также на органы пользователей ВП (органы ОВД

Назревшие же структурно-функциональные преобразования нашли свое отражение в новом Положении о ЕС ОрВД Российской Федерации. Здесь, в частности, было определено, что ЕС состоит из координирующих, руководящих и оперативных органов. *Координирующие* органы создаются в целях согласования действий соответствующих федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, органов ОВД (управления полетами) и пользователей ВП по вопросам организации ИВП, функционирования, финансирования, модернизации и развития ЕС. К *координирующим* органам ЕС были отнесены Межведомственная комиссия по ИВП Российской Федерации,

в установленных для них зонах и районах). При этом если в Положении о ЕС УВД от 1994 года характер субординации военного и гражданского секторов в явном виде обозначен не был, то в положении о ЕС от 18 июня 1998 года было подчеркнуто, что указания военных секторов оперативных органов по вопросам ИВП страны являются обязательными для гражданских секторов оперативных органов, органов ОВД и пользователей ВП.

Вместе с тем дальнейшее развитие событий в авиационном комплексе страны показало, что принятые меры по совершенствованию ЕС ОрВД оказались запоздалыми. Рост объема пассажирских авиаперевозок сопровождался закономерным ростом частоты выполнения авиарейсов и появлением новых маршрутов полета (рис. 2.7). Соответствующим образом возрастала информационная нагрузка на органы УВД, ОВД и ЕС ОрВД в целом. Этот рост услуг по аэронавигационному обеспечению происходил на фоне старения материально-технической и информационно-коммуникационной базы ЕС, явного несовершенства ее организационной структуры, а также ускоряющегося отставания существующей нормативно-правовой базы от требований развивающейся страны и Международной организации гражданской авиации (ИКАО).

В целом для ЕС рассматриваемого периода развития были характерны следующие основные недостатки⁷⁷:

- несовершенство административного руководства ЕС и ее оперативными органами;
- несовершенство координации деятельности оперативных военных и гражданских органов;
- фактическое отсутствие единой технической политики в области создания и эксплуатации техники для решения задач ЕС;
- несовершенство материально-технического обеспечения;
- несовершенство организационно-мобилизационного и технического планирования по переводу центров ЕС с мирного на военное положение;

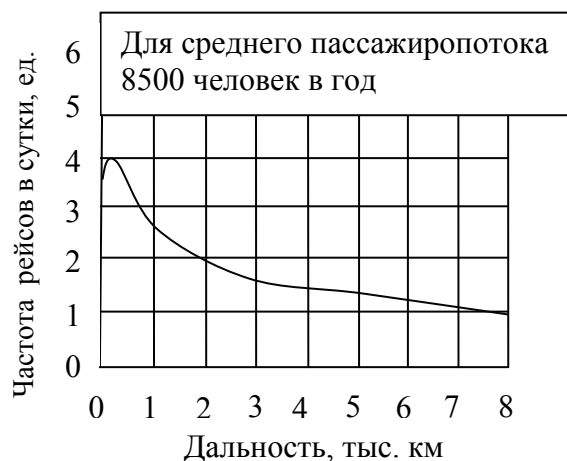


Рис. 2.7. Зависимость частоты выполнения авиарейсов от протяженности маршрута

⁷⁷ Концепция модернизации и развития Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации // Постановление Правительства Российской Федерации от 22 февраля 2000 г. № 144.

- необходимость организационно-штатной перестройки ЕС при ее переходе с мирного на военное положение.

В этой связи Постановлением Правительства Российской Федерации от 22 февраля 2000 г. № 144 была утверждена Концепция модернизации и развития ЕС ОрВД Российской Федерации (далее – Концепция), которая предусматривала совершенствование структуры ЕС и улучшение взаимодействия ее гражданской и военной подсистем путем поэтапного перехода *от существующей совмещенной структуры к единой структуре ее органов*.

На первом этапе реализации Концепции для повышения уровня взаимодействия гражданских и военных органов ЕС предусматривалось:

1) для *руководящих органов* ЕС – совместная разработка, согласование, утверждение и применение нормативных правовых актов по государственному регулированию и организации ИВП; совместный контроль использования и совершенствования технической базы гражданских и военных органов ЕС; повышение уровня координации и взаимодействия с пользователями воздушного пространства;

2) для *оперативных органов* ЕС – обеспечение гражданских и военных органов ЕС: а) унифицированной и идентичной информацией о воздушной обстановке, планах полетов, местоположении воздушных судов и другой деятельности по использованию воздушного пространства; б) технологиями автоматического обмена информацией об операциях, выполняемых диспетчерским составом; в) прямой, устойчивой и надежной речевой связью между гражданскими и военными диспетчерами.

На следующих этапах реформирования Министерством обороны Российской Федерации и Федеральной службой воздушного транспорта России совместно с организациями промышленности должна была быть выработана единая техническая политика, разработаны предложения по совершенствованию организационной, технической и информационной деятельности гражданских и военных органов ЕС, завершён переход гражданской подсистемы на новую организационную структуру, которая позволила бы обеспечить: а) единую ответственность за организацию и безопасность воздушного движения; б) централизацию ИВП на основе государственной системы приоритетов; в) равные права всех пользователей воздушного пространства; г) комплексное использование технической базы гражданской и военной подсистем; д) эффективное взаимодействие участников процесса управления; е) *приоритет интересов гражданской подсистемы в целом* над экономическими интересами отдельных организаций по ИВП и УВД; ж) единство имущественного комплекса гражданской подсистемы.

Основу такой структуры должно было составить ФГУП «Государственная корпорация по организации воздушного движения в Российской Федерации» (Госкорпорация по ОрВД) с объединением вокруг нее всех

предприятий по ИВП и УВД, а также баз электрорадиотехнического обеспечения и связи (ЭРТОС).

Поскольку ЕС имеет стратегическое значение для обеспечения национальной безопасности государства, постольку ее перевод на работу в условиях военного времени должен был осуществляться без перестройки структуры, без перерывов функционирования и без изменения направлений взаимодействия с другими системами. В особый период или в условиях военного времени основу ЕС должна составлять ее военная подсистема. В мирное же время личный состав центров ЕС, расположенных в приграничной полосе и имеющих военные секторы, обязан был принимать участие во всех командно-штабных и летно-тактических учениях масштаба авиационного соединения и выше.

В военных секторах центров ЕС предписывалось иметь отдельные штаты на мирное и военное время. Перевод центров ЕС, имеющих в мирное время только гражданский сектор, на работу в условиях военного времени должен сопровождаться формированием военного сектора с включением его в систему боевого управления авиацией соответствующего направления. Перевод двухсекторных центров ЕС на организационно-штатную структуру военного времени предполагалось осуществлять на базе соответствующих военных секторов путем перевода их в боевую готовность в пунктах постоянной дислокации и приведения личного состава в соответствие со штатным расписанием военного времени согласно планам мобилизации. Потребности же развертываемых и формируемых органов ЕС во всех видах мобилизационных ресурсов в соответствии со штатным расписанием военного времени предполагалось обеспечивать путем приписки к ним диспетчерского состава гражданских секторов соответствующих центров и инженерно-технического состава баз ЭРТОС. При этом организационно-штатная структура центров ЕС должна быть способной обеспечить организацию ИВП как с запасных (защищенных) пунктов управления, так и с пунктов управления мест постоянной дислокации оперативного состава. Одновременно предписывалось предусмотреть комплекс мероприятий по обеспечению **живучести** объектов и **помехозащищенности** радиоэлектронных средств (РЭС) ЕС.

Основным итогом успешной реализации Концепции должно было стать создание системы более высокого уровня структурной организации – *федеральной аэронавигационной системы* (АНС), включающей: сеть воздушных трасс; наземные, бортовые и космические средства связи, навигации, посадки и наблюдения; систему ОрВД; систему метеорологического обеспечения; систему аэронавигационной информации; службу поиска и спасания; службу технического обслуживания; специально подготовленный персонал, способный действовать в соответствии с установленными правилами и процедурами. Важное значение в рассматриваемой Концеп-

ции придавалось проведению единой технической политики в области аэронавигационного обслуживания.

Поскольку новые принципы работы перспективных систем ОрВД, основанные на связи бортовых, наземных и космических средств в единую интегрированную сеть с помощью цифровых линий передачи данных, требуют увязки ЕС с проектируемой единой интегрированной системой ОрВД Европейского региона ИКАО, а в дальнейшем и с мировой АНС, постольку одной из главных задач единой технической политики должна стать задача разработки и утверждения согласованной технической архитектуры ЕС, обеспечивающей взаимодействие ее элементов и последующую интеграцию в европейскую АНС.

Основные показатели, характеризующие степень реализации Концепции ЕС, были следующие: обеспечение национальной безопасности и безопасности ВД при высокой его интенсивности; удовлетворение требований пользователей ВП к качеству аэронавигационной информации; совместимость с международной АНС; баланс доходов и затрат на поддержание и развитие ЕС; требуемый уровень мобилизационной подготовки персонала; степень реализуемости мобилизационного плана.

В развитие Положения о ЕС ОрВД от 18.06. 1998 г. и Концепции ее модернизации приказом министра обороны № 484 и министра транспорта № 156 от 07.12. 2002 г. было введено Положение об оперативных органах (центрах) ЕС ОрВД, определяющее предназначение, структуру, задачи и функции центров ЕС, а также права и обязанности начальников (руководителей) военных и гражданских секторов центров по вопросам организации ИВП.

Логическим пределом предусмотренных Концепцией структурно-функциональных преобразований ЕС ОрВД стало учреждение Постановлением Правительства Российской Федерации от 30 марта 2006 года № 173 Федеральной аэронавигационной службы России как федерального органа исполнительной власти, специально уполномоченного в области гражданской авиации и национальной обороны, а также как руководящего органа ЕС ОрВД, государственных инспекторских органов ГА в сфере ИВП Российской Федерации, аэронавигационного обслуживания пользователей ВП Российской Федерации и авиационно-космического поиска и спасания.

Вместе с тем по мере реализации Концепции модернизации ЕС становилось все более очевидным, что предусмотренные в ней организационно-технические и технологические мероприятия, как и в предыдущем случае, явно отстают от насущных потребностей развивающегося авиационного комплекса страны. При слабой интенсивности воздушного движения она была способна обеспечивать среднестатистические показатели по безопасности и эффективности полетов, однако в условиях постоянно возрастающего объема авиационных перевозок и услуг (в среднем на 6 %

в год) такая система не имела реальной стратегической перспективы, а ее сохранение в современном виде в ближайшем будущем могло привести к серьезному отставанию.

Как отметил А.В. Нерадько, «ЕС ОрВД имеет существенные системные недостатки. Несмотря на то, что Система называется единой, на самом деле, она является двухфрагментной. Ее организационная структура базировалась на гражданских и военных органах, подчиненных различным министерствам. ЕС ОрВД не обеспечивает пользователей воздушного пространства всеми видами аэронавигационного обслуживания. Ведомственная разобщенность ограничивала возможность эффективного и гибкого использования воздушного пространства и его доступность... Различие правил и процедур подготовки персонала и работы у гражданских и военных специалистов, недостатки в проведении единой технической политики, а также при организации системы поиска и спасания, задержки в создании единого информационного поля с функциями координатно-временного и радиолокационного обеспечения, отрицательно сказываются на возможности контроля воздушного пространства, обеспечении обороноспособности, на проведении мероприятий по предотвращению терроризма в сфере аэронавигации, а также на эффективности использования воздушного пространства»⁷⁸.

Руководитель Росаэронавигации также подчеркнул, что «основу технического обеспечения ЕС ОрВД составляют морально и физически устаревшие традиционные радиотехнические системы. Не осуществляется на должном уровне автоматизированное взаимодействие всех систем, участвующих в аэронавигационном обслуживании полетов. Эти системы не связаны между собой организационно-функциональной структурой, что препятствует их координированному развитию» (там же).

Росаэронавигацией была предложена Концепция создания и развития Аэронавигационной системы России, одобренная Правительством Российской Федерации 04.10. 2006 г. По замыслу Росаэронавигации АНС России должна представлять собой *единую систему организации использования воздушного пространства страны и аэронавигационного обслуживания его пользователей, в т. ч. в зонах ее международной ответственности*. Назначение АНС связано с обеспечением эффективного ИВП Российской Федерации всеми его пользователями в интересах развития экономики и обеспечения национальной безопасности страны. При этом координация деятельности и развития всех

⁷⁸ Нерадько А.В. Концепция создания и развития Аэронавигационной системы России // Тез. докл. на заседании Правительства Российской Федерации 04.10. 2006 г. Одновременно следует также заметить, что из-за недостаточного финансирования до 85 % технических средств и систем связи, навигации и наблюдения ЕС ОрВД на рассматриваемый момент времени выработали установленный ресурс и требовали замены.

служб и систем в интересах пользователей ВП осуществляется одним федеральным органом исполнительной власти, а сама система основана на интегрированном взаимодействии человека, технологий, средств, служб и должна включать: а) наземные, бортовые и спутниковые средства и системы связи, навигации, посадки, наблюдения, авиационно-космического поиска и спасания, аэронавигационной информации, метеорологического обслуживания, службы технического обслуживания; б) персонал, осуществляющий в соответствии с установленными правилами и процедурами организацию ИВП России и аэронавигационное обслуживание его пользователей.

Очевидно, что по решаемым задачам и сфере ответственности АНС является системой более высокого уровня иерархии и системной организации, чем действующая ЕС ОрВД. Она строится на базе единой технической архитектуры при соблюдении соответствующих стандартов и рекомендуемой практики ИКАО, нормативных правовых актов Российской Федерации, целей и задач национальной обороны и призвана обеспечивать организационную и информационно-техническую совместимость, а также многоуровневое взаимодействие с системами соответствующих органов УВД (управления полетами) пользователей ВП, в т. ч. автоматизированными. В качестве одного из важнейших параметров успешного функционирования АНС выдвигалось: а) тесное взаимодействие с компонентами *единой автоматизированной радиолокационной системы разведки* и другими военными автоматизированными системами управления; б) взаимодействие с автоматизированными системами метеорологического обслуживания аэронавигации; в) взаимодействие с иными системами, информация которых может быть использована или передана в/из АНС в интересах организации ИВП и аэронавигационного обслуживания его пользователей. Количество объектов аэронавигации в защищенном исполнении предполагалось довести до 100 %.

За счет этого комплекса мер планировалось существенно сократить время перевода АНС на работу в условиях особого периода и военного времени, повысить ее роль в общегосударственном комплексе мер по пресечению терроризма. Для обеспечения решения этих задач предусматривалась интеграция в АНС военнослужащих военных секторов ЕС ОрВД и ряда других информационных подсистем ВВС Российской Федерации. При этом вместо 118 центров ЕС ОрВД предполагалось создать только 13 объединенных центров.

Не менее важной задачей для создаваемой АНС является и повышение **безопасности полетов** – снижение количества катастроф по ее вине в условиях ожидаемого роста интенсивности ВД, выражаемого в снижении риска катастроф воздушных судов к 2015 году в 2,7 раза, а к 2025 году – в 4,8 раза. Для этого предполагалось завершить техноло-

гическую триаду ОрВД (рис. 2.8) технологией траекторного управления, основанной на автоматизированном совместном использовании плановой и полетной информации о пространственно-временном положении ВС и обеспечивающей переход от традиционной технологии службы аэронавигационной информации (САИ) к управлению аэронавигационной информацией.

Одновременно с рассматриваемой Концепцией Правительство Российской Федерации одобрило и план мероприятий по созданию и развитию АНС России. План предусматривал три этапа ее формирования, скоординированных с положениями военно-технической политики, Транспортной стратегией, программами развития авиационной техники, Глобальной навигационной спутниковой системой (ГЛОНАСС), Планом реформирования органов военного управления, утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации № 159 в феврале 2006 года. Эти этапы формирования АНС учитывали также и требования ИКАО, определяющие тенденции развития мировой АНС до 2025 года.

На первом этапе реализации Концепции (2006–2008 гг.) предусматривалось: а) создание организационно-функциональной и технической структуры АНС России с едиными гражданско-военными органами, обеспечивающей реализацию потенциальных возможностей существующих технических средств и технологий в целях повышения безопасности и экономической эффективности ИВП; б) внедрение процедур аэронавигационного обслуживания на основе международных стандартов и рекомендаций ИКАО; в) принятие мер по гармонизации АНС с аналогичными системами стран – членов СНГ и сопредельных государств. Одновременно предусматривалось создание перспективных средств наблюдения за движением воздушных судов и единой автоматизированной радиолокационной системы в целях круглосуточного обеспечения пунктов управления Вооруженных сил Российской Федерации РЛИ.

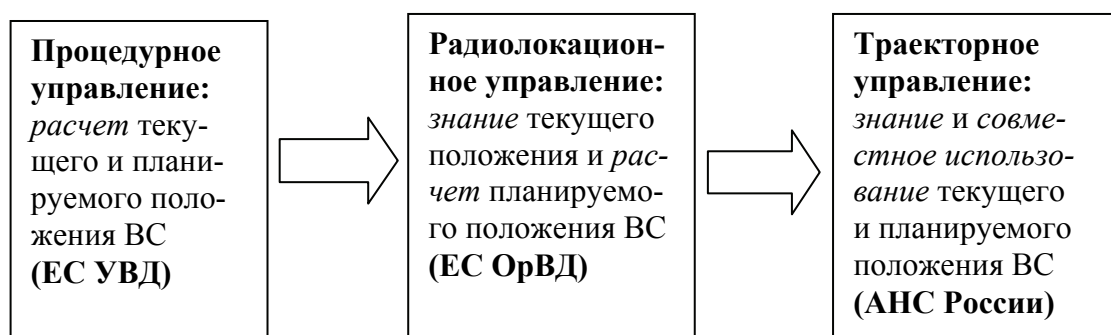


Рис. 2.8. Характер изменения технологий УВД ЕС ОрВД

На втором этапе (2009–2015 гг.) в развитие задач первого этапа дополнительно предусматривается: а) переход от традиционных к перспективным наземным, бортовым и спутниковым средствам и системам (связи, навигации, поиска и спасания, аэронавигационной информации, метеорологического обслуживания аэронавигации); б) интеграция АНС в евразийскую АНС; в) внедрение новых технологий ОрВД в отдельных районах Российской Федерации; г) завершение работ по созданию ЕАРЛС в целях круглосуточного обеспечения пунктов управления Вооруженных сил Российской Федерации РЛИ и интеграции АНС в региональную европейскую АНС.

На третьем этапе (2016–2025 гг.) предусматривается: а) завершение работ по адаптации организационно-функциональной структуры АНС, механизма управления системой и технологий работы персонала в условиях функционирования интегрированной системы аэронавигационного обслуживания полетов с использованием автоматизированного взаимодействия всех ее подсистем, включая пользователей ВП; б) создание интегрированной системы обеспечения безопасности ВД на базе наземных и бортовых средств обнаружения и разрешения конфликтных ситуаций; в) интеграция в мировую аэронавигационную систему.

В развитие плана мероприятий по созданию АНС России Постановлением Правительства Российской Федерации от 1 сентября 2008 года № 652 (с изменениями от 21 декабря 2009 года) была введена в действие Федеральная целевая программа (ФЦП) «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009–2015 гг.)», мероприятия которой были сгруппированы по трем направлениям: модернизация системы ОрВД; развитие метеорологического обеспечения аэронавигации; развитие единой системы авиационно-космического поиска и спасания.

Из-за недостаточного объема финансирования этой программы ряд запланированных мероприятий реализовать не удалось⁷⁹. Тем не менее,

⁷⁹ По данным Счетной палаты о ходе исполнения расходов на реализацию ФЦП по состоянию на 1 августа 2008 года (данные Отчета о кассовом поступлении и выбытии средств федерального бюджета – ф.0503124) ФЦП «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002–2010 годы и на период до 2015 года» профинансирована на 19,5 % от запланированного; ФЦП «Модернизация транспортной системы России (2002–2010 годы)» профинансирована на 37,5 %; ФЦП «Глобальная навигационная система» профинансирована на 50,5 %. В прогнозе на 2010 год (к паспорту Программы на этот год) ожидалась следующая ситуация: ФЦП «Модернизация транспортной системы России (2002–2010 годы)» и ФЦП «Развитие транспортной системы России (2010–2015 годы)» будут профинансированы на 33 %, ФЦП «Модернизация Ес ОрВД Российской Федерации (2009–2015 годы)» – на 30 %. Из заявления А.В. Нерадько, сделанным им на совещании «Об организации воздушного движения» 20.06.2012 г. (под председательством Д.А. Медведева) можно сделать вывод, что состояние с финансированием этих ФЦП не улучшилось.

в рамках первого этапа создания АНС России был проведен значительный комплекс системных мероприятий по основным направлениям ее совершенствования: внесены изменения в Воздушный кодекс Российской Федерации, нормативно закрепившие понятие аэронавигационного обслуживания; разработано более 30 нормативных правовых актов, направленных на совершенствование аэронавигационного обслуживания полетов; принята новая редакция Федеральных правил ИВП Российской Федерации (Постановление Правительства Российской Федерации от 11 марта 2010 года № 138), занимающих ключевое место в структуре нормативных документов по вопросам организации ИВП. В них, в частности, закреплены нормы, устанавливающие классификацию ВП и уведомительный порядок ИВП, предусмотрено введение новых элементов структуры ВП (районы полетной информации, диспетчерские районы, диспетчерские зоны), определен класс ВП, в котором используется уведомительный порядок ИВП – класс G, закреплена возможность ИВП без разрешения органа организации ВД с подачей уведомления по усмотрению командира воздушного судна.

В рамках практической работы по совершенствованию структуры ВП Российской Федерации приказом Министерства транспорта от 08.05.09 г. № 73 «Об утверждении Перечня зон и районов ЕС ОрВД Российской Федерации» с 07 мая 2009 года определена новая структура ВП: 1 главный, 7 зональных, 54 районных (из них 18 с правами планирования), 18 вспомогательных районных центров. Приказами этого же Министерства от 02 февраля 2009 года № 31 и от 06 октября 2009 года № 173 введены в действие 91 воздушная трасса, из них 79 международных, 11 внутренних и 1 спрямлённая.

Аэронавигационное обслуживание в части авиационно-космического поиска и спасания осуществляется силами и средствами Единой системы авиационно-космического поиска и спасания Российской Федерации (ЕС АКПС), осуществляющей организацию и проведение поиска и спасания терпящих или потерпевших бедствие ВС всех видов авиации, их пассажиров и экипажей. В 7 федеральных округах функционируют 7 региональных авиационных поисково-спасательных центров (АПСЦ) и на федеральном уровне – Главный координационный центр поиска и спасания. Поисково-спасательное обеспечение осуществляется 52 региональными поисково-спасательными базами (19 новых находятся в стадии формирования и сертификации). В системе поисково-спасательного обеспечения полетов авиации России ежедневно несут дежурство до 130 воздушных судов.

Метеорологическое обеспечение полетов ГА на воздушных трассах проводится на основании договоров на предоставление авиационной метеорологической информации между Госкорпорацией по ОрВД» и Метео-агентством Росгидромета. Метеорологическое обеспечение органов УВД

осуществляют 305 авиационных метеорологических подразделений Росгидромета и 18 авиационных метеостанций в составе гражданской авиации.

Аэронавигационное обслуживание, связанное с предоставлением АНИ, осуществляется в целях организации потока своевременных, достоверных аэронавигационных данных, необходимых для обеспечения безопасности и эффективности воздушной навигации. *Служба аэронавигационной информации* состоит из органов аэронавигационной информации и имеет трехуровневую структуру, включающую в себя на федеральном, региональном и местном уровнях *подразделения аэронавигационной информации* (АНИ) следующих структур формирующейся аэронавигационной системы: Росаэронавигация, ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», ФГУП «Центр аэронавигационной информации», ФГУП «ГосНИИ "Аэронавигация"», органы АНИ государственной и экспериментальной авиации, территориальные подразделения АНИ Росавиации и филиалов ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», органы АНИ объединений государственных авиационных формирований, а также органы АНИ аэродромов и аэропортов (рис. 2.9).

Организационную основу ЕС ОрВД составляет ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», структурно включающая в себя генеральную дирекцию и 14 филиалов (рис. 2.10, 2.11). Базовым исполнительным компонентом ЕС является совокупность главного, зональных и районных центров ОрВД (рис. 2.6), системообразующим фактором которой выступает технологическая (целевая) функция по организации и контролю ИВП. На уровнях зональных и районных центров этот системообразующий фактор проявляется через технологическую функцию организации потоков ВД и его управления.

С декабря 2007 года были расформированы 28 военных секторов главного, зональных и районных центров ЕС ОрВД, а их функции переданы соответствующим центрам УВД. Для этого была организована и осуществлена подготовка почти 400 гражданских диспетчеров для УВД вне трасс. Одновременно, по согласованию с Минобороны России, была отработана программа обучения военных специалистов для получения ими свидетельств гражданского диспетчера. Поэтому в настоящее время в состав ЕС ОрВД входит 61 центр ОВД, из них один главный, 7 зональных и 53 районных. Из них 17 с правом планирования и выдачи разрешения на ИВП (табл. 2.1)⁸⁰.

⁸⁰ Информация подпункта «Аэронавигационное обслуживание» взята из материалов, размещенных на официальном сайте Госкорпорации по ОрВД, из докладов Ю.П. Токарева «Состояние, проблемы системы обеспечения аэронавигационной информацией в Российской Федерации и пути их решения», Д.В. Савицкого «Регулирование системы планирования использования воздушного пространства при создании Аэронавигационной системы России и автоматизации решения основных задач планирования ИВП», сделанных ими на заседании Аэронавигационного совета (коллегии) 12.09.2007 г. (г. Москва), а также из доклада В.М. Горбенко на совещании «Об организации воздушного движения» 20.06.2012 г., проходившем под председательством Д.А. Медведева (Московский центр АУВД).

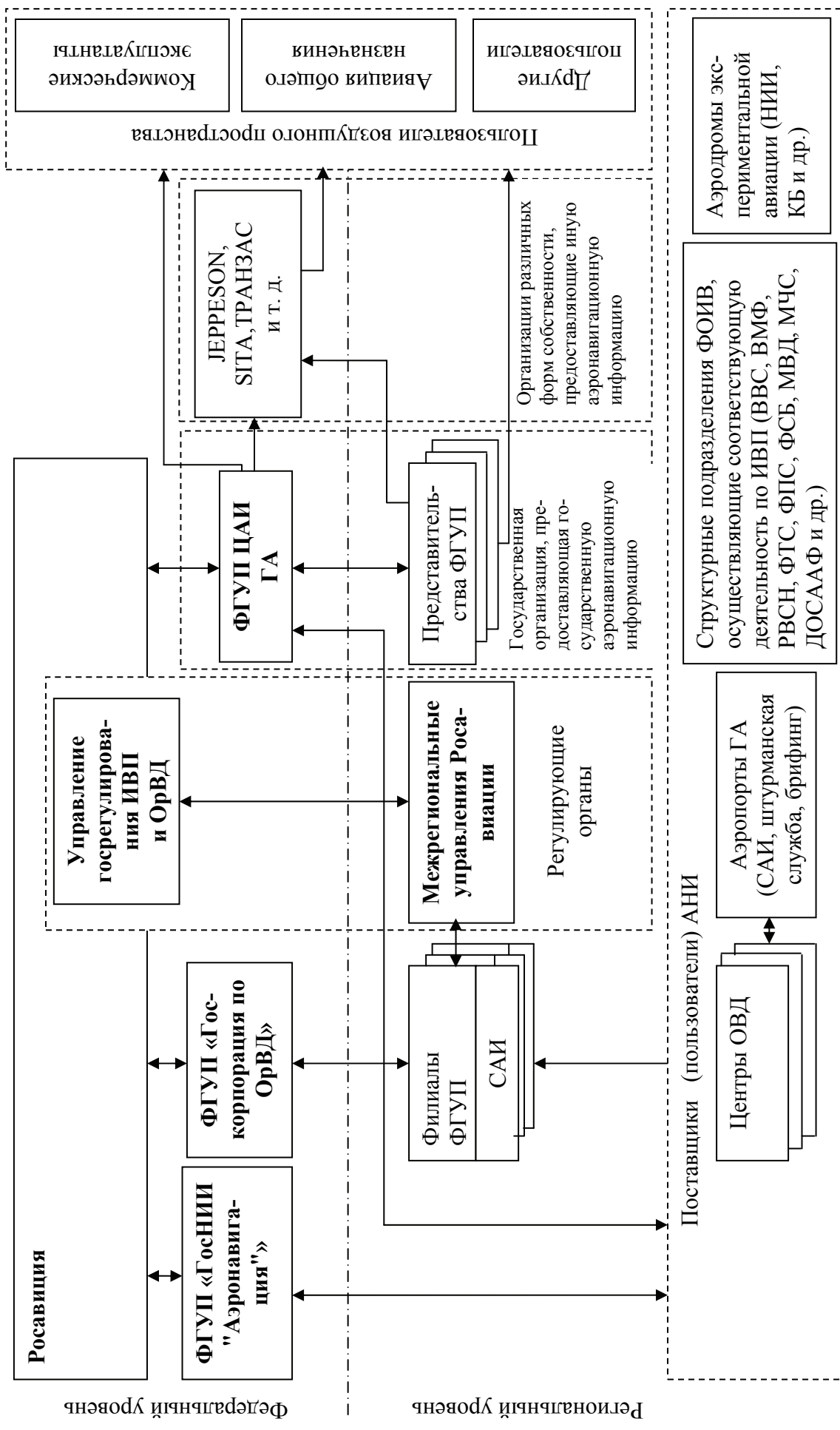


Рис. 2.9. Структурная схема перспективной системы обеспечения АНИ

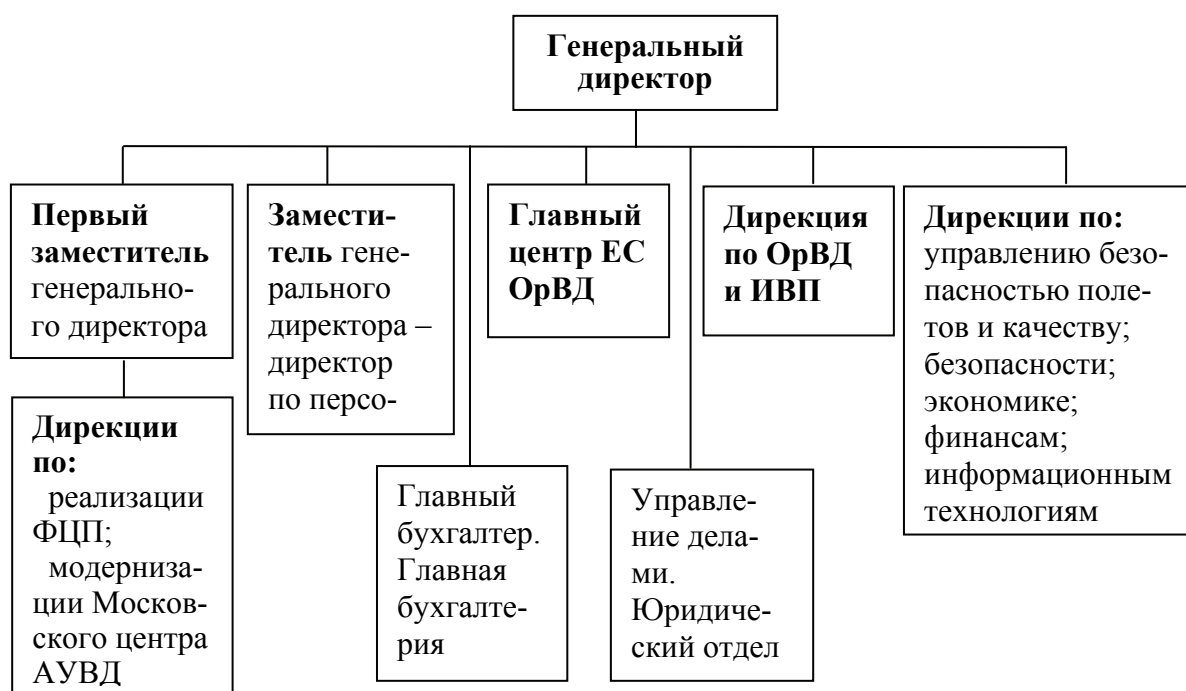


Рис. 2.10. Организационная структура Генеральной дирекции ФГУП «Госкорпорация по ОрВД»

Таблица 2.1

Основные характеристики ЕС ОрВД переходного этапа

Наименование характеристики	Единица измерения
Обслуживаемая территория	Более 26 млн кв. км
Протяженность маршрутов	Более 650 000 км
Обслуживается полетов в год	Около 1 млн
Одновременно под управлением находится воздушных судов	Более 1 000
Персонал:	Около 26 тыс. чел.
из них:	
специалисты, осуществляющие непосредственное УВД	Около 7,1 тыс. чел.
инженеры, обслуживающие средства РТО и Связи	9,5 тыс. чел.
Оперативные органы:	61 центр ЕС ОрВД
из них:	
ГЦ	1
ЗЦ	7
РЦ (ВРЦ)	53
из них с правом планирования и выдачи разрешения на ИВП	17
Автоматизированные системы УВД	9 ед.
Радиолокаторы	Свыше 430 ед.
Средства навигации	Около 2 000 ед.
Средства ВЧ и СВЧ радиосвязи	Свыше 11 000 ед.
Средства автоматизации ОВД	92 ед.
Автоматизированных рабочих мест	51 ед.

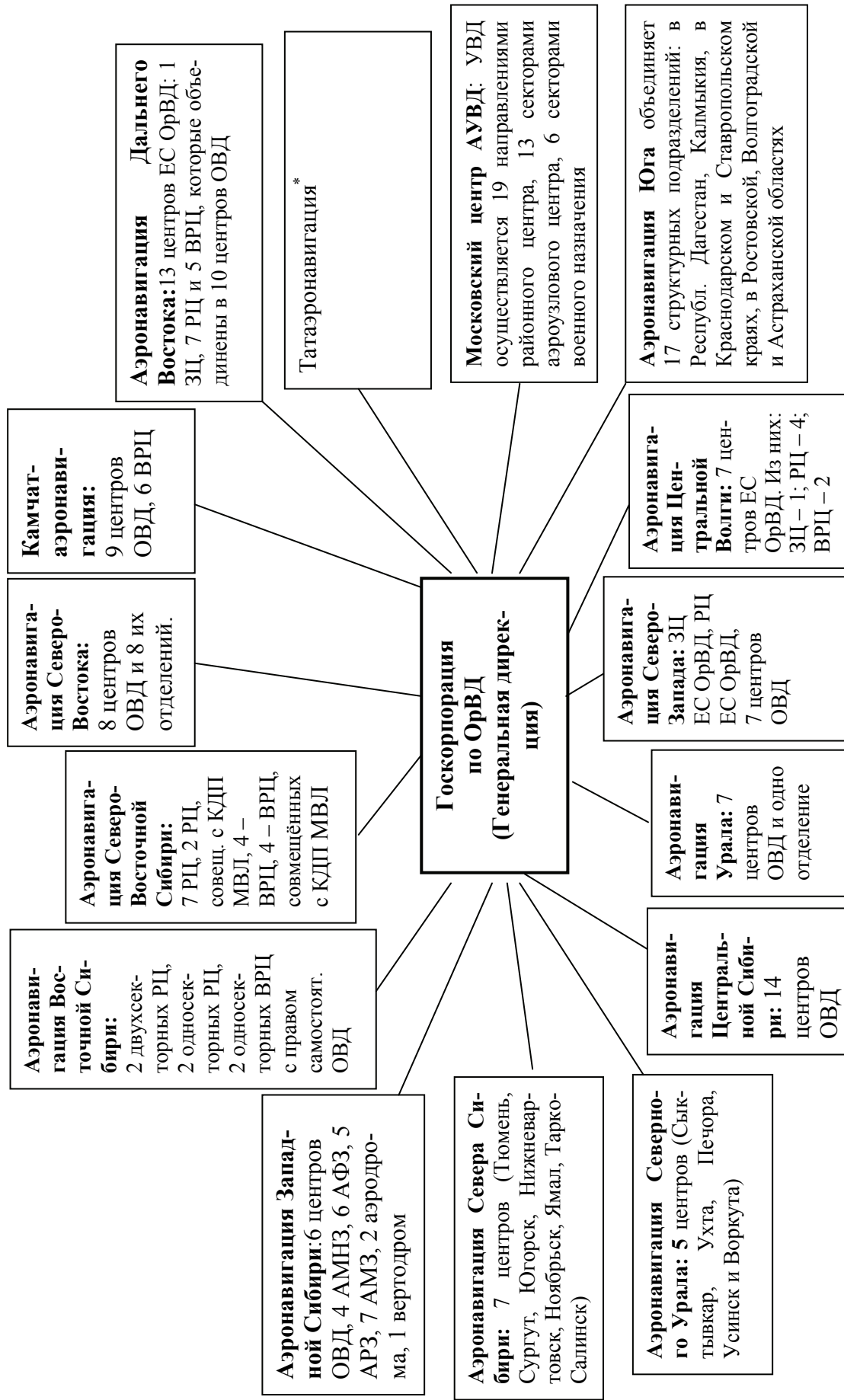


Рис. 2.11. Организационная структура ФГУП «Госкорпорация по ОрВД»

* выявить подробные данные о структуре филиала не представилось возможным

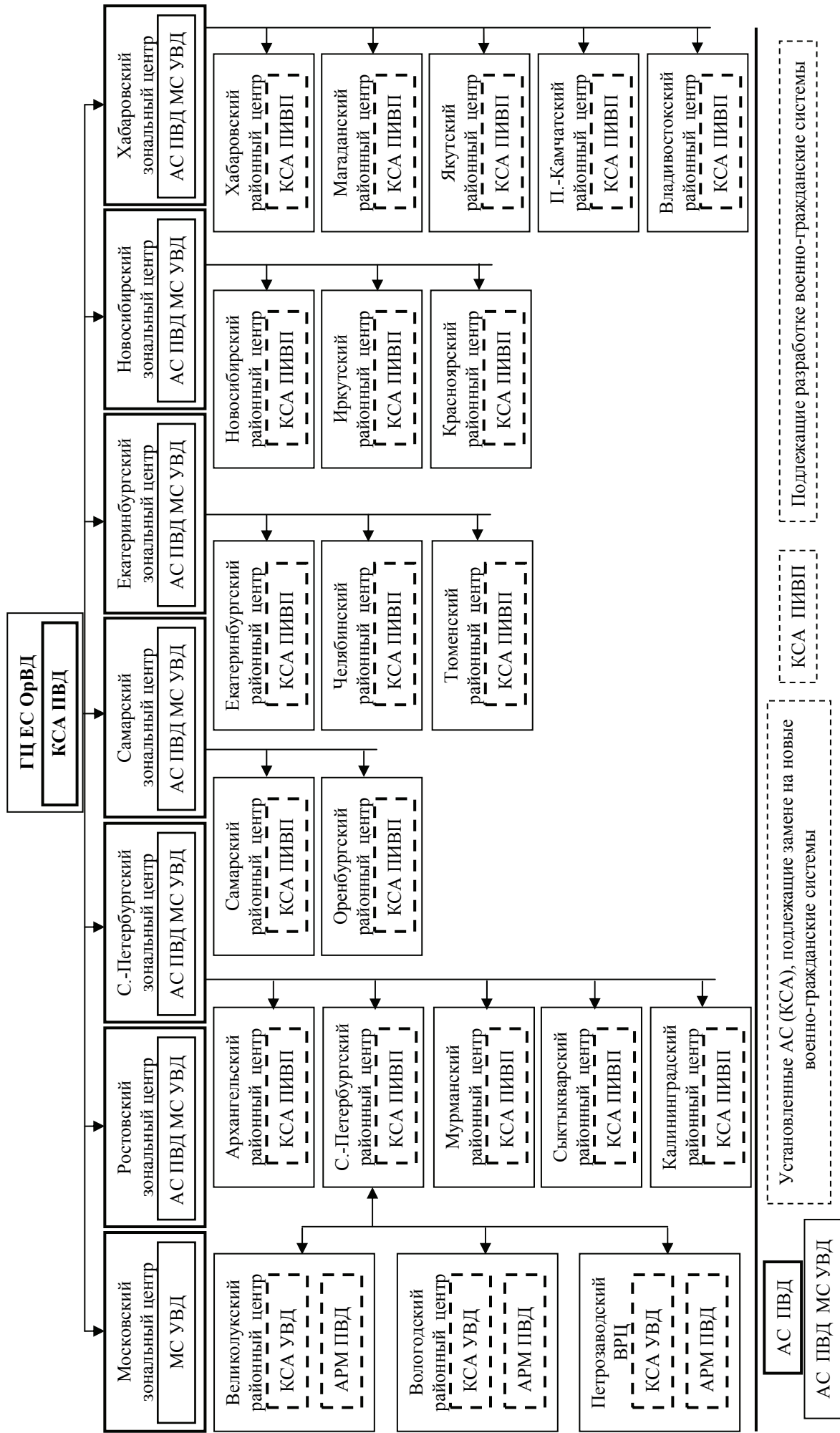


Рис. 2.12. Структура объединенной военно-гражданской Единой системы ОрВД

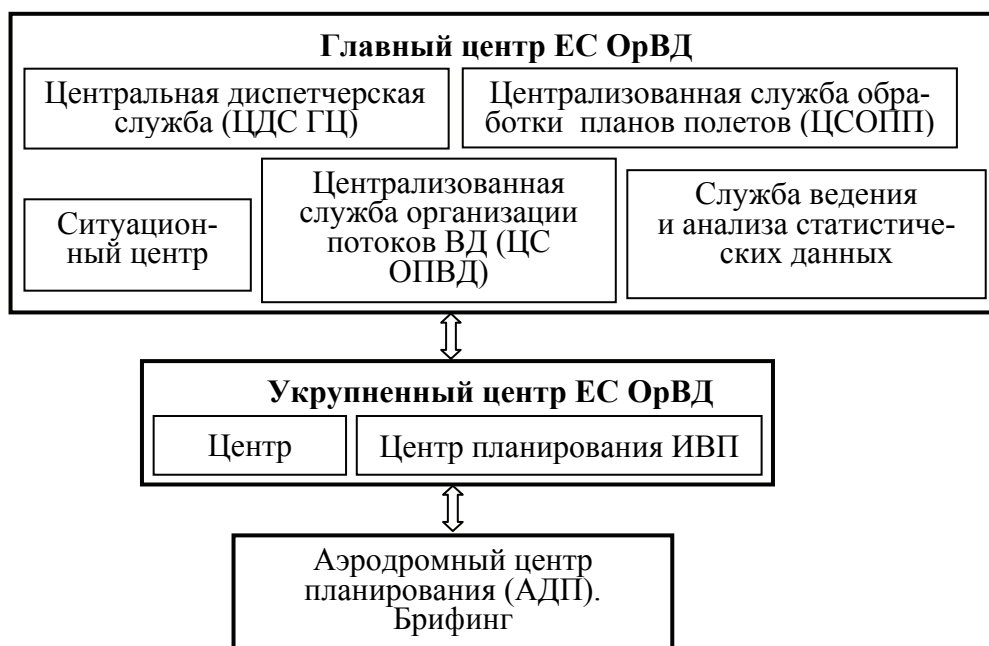


Рис. 2.13. Перспективная структура органов ЕС ОрВД

Схема объединенной (военно-гражданской) ЕС ОрВД представлена на рис. 2.12, 2.13. В целом по своей организационной структуре, технической оснащённости и выполняемым функциям современная ЕС ОрВД занимает пока некоторое промежуточное положение между дореформенным ее состоянием и перспективной АНС России.

Реализация последующих этапов развития АСН предполагает: переход к применению требуемых навигационных характеристик (RNP); использование методов принципиально новых видов навигации, в т. ч. зональной навигации (RNAV) и навигации на основе характеристик (PBN); использование классифицированного ВП со свободным выбором маршрутов ОВД; осуществление перехода от традиционной САИ к управлению аэронавигационной информацией; развитие корпоративной системы управления безопасностью полетов при ОрВД⁸¹.

В целом современная АНС строится по модульному принципу при оптимизированном сопряжении разнотипных, с высокой степенью разнообразия характеристик, отечественных и зарубежных технических средств. Предполагается, что архитектура построения такой системы будет обеспечивать обмен данными в реальном масштабе времени по широкополосным линиям передачи данных, а также взаимодействие с компонентами Федеральной системы разведки и контроля воздушного пространства Российской Федерации.

⁸¹ Беляков А.В. Перспективы развития Аэронавигационной системы Российской Федерации // Транспортная безопасность и технологии. 2010. № 1.

2.5. Принципы построения и обобщенная структура ЕАРЛС

Современное состояние и ближайшая перспектива развития ЕАРЛС Российской Федерации таковы, что в процессе ее создания (в связи с необходимостью восстановления единого РЛ поля страны) из всего многообразия принципов системного подхода востребованными в той или иной степени оказались только лишь принципы соответствия структуры системы целям и задачам надсистемы, соответствия структуры системы структуре внешней среды, а также принцип технологической, технической и информационной совместимости основных компонентов и уровней системы. Очевидно, что в обобщенном виде эти принципы можно объединить в принцип *догоняющей модернизации*.

Ранее отмечалось, что основными предпосылками создания ЕАРЛС являются всеобщие законы технологического движения информации, а также необходимость восстановления РЛП страны, разрушенного в процессе небоснованного и поспешного сокращения боевого состава РТВ. Однако не только эти предпосылки выступили детерминантами создания рассматриваемой системы. К началу второго тысячелетия у российских авиакомпаний ускоренными темпами стал сокращаться парк самолетов советского периода производства из-за естественного старения и выработки ими установленного ресурса. Стало очевидно, что при сохранении сложившегося положения в отечественной ГА ей к 2005–2006 гг. грозит глубокий кризис провозной мощности (рис. 2.14)⁸². Отечественная авиационная промышленность, находившаяся в упадке, оказалась не в состоянии пополнить выбывающий парк самолетов новыми и конкурентоспособными машинами в требуемых объемах. По этой причине на отечественный авиационный рынок хлынул поток самолетов иностранного производства (частично новых, но преимущественно побывавших в эксплуатации не один десяток лет), не оборудованных системой государственного РЛ опознавания «Пароль» (СРЛО-П).

Вследствие обвального характера подобных процессов число самолетов отечественной ГА, оборудованных СРЛО-П, стало неуклонно снижаться и к 2005–2006 гг. достигло 10 % от существующего парка. В этих условиях задачи по идентификации ВС, контролю полетов своей авиации и оценке складывающейся воздушной обстановки в границах ответственности, без привлечения соответствующей информации от ЕС ОрВД, легли на расчеты КП соединений ПВО и радиотехнических частей непосильным бременем. Случаи небоснованного приведения дежурных сил ВВС и ПВО в повышенные сте-

⁸² Самойлов В.А. [и др.]. Прогнозирование развития российского авиарынка // Сб. науч. трудов ГосНИИ ГА. М., 2004. С. 3–17.

пени боевой готовности, как и их неприведения в соответствующие степени готовности при нарушении режимов полетов в ВП Российской Федерации, стали носить массовый характер. Поэтому сохранение национальных интересов в области контроля ВП и ПВО поставили соответствующие ведомства и в целом руководство Российской Федерации перед необходимостью разработки и создания ЕАРЛС. Эта задача становилась все более актуальной, так как ведущие в военно-информационном и экономическом отношениях государства подобные интеграционные программы развивают весьма активно.

Достаточно сказать, что США, наряду с ранее развернутой сетью РЛС воздушного базирования объединенной системы наблюдения за ВП типа АВАКС, осуществляют модернизацию обычных РЛ постов. В 1999 году завершено развертывание по периметру страны около 50 новых автоматизированных РЛС с целью замены устаревших, что дало возможность создать вблизи границ страны сплошное РЛ поле на средних и малых высотах. В то же время, по мнению американских специалистов, даже эта система контроля ВП не позволяет в достаточной степени обеспечить защиту территории страны от террористических актов, подобных воздушной атаке на Башни-Близнецы 11 сентября 2001 года вследствие ограниченных возможностей по обнаружению и сопровождению низколетящих малоразмерных целей. С учетом этих требований в США проводятся мероприятия по улучшению качества РЛ обеспечения полетов военной и гражданской авиации, повышению эффективности применения сил и средств ПВО. Для реализации этой программы был подписан контракт с фирмой Raytheon на приобретение более 200 новых РЛС и 300 терминалов общей стоимостью около 620 млн долл. США. Страны Балтии также создают свою региональную систему, объединяющую национальные РЛ системы контроля ВП Эстонии, Латвии и Литвы⁸³.

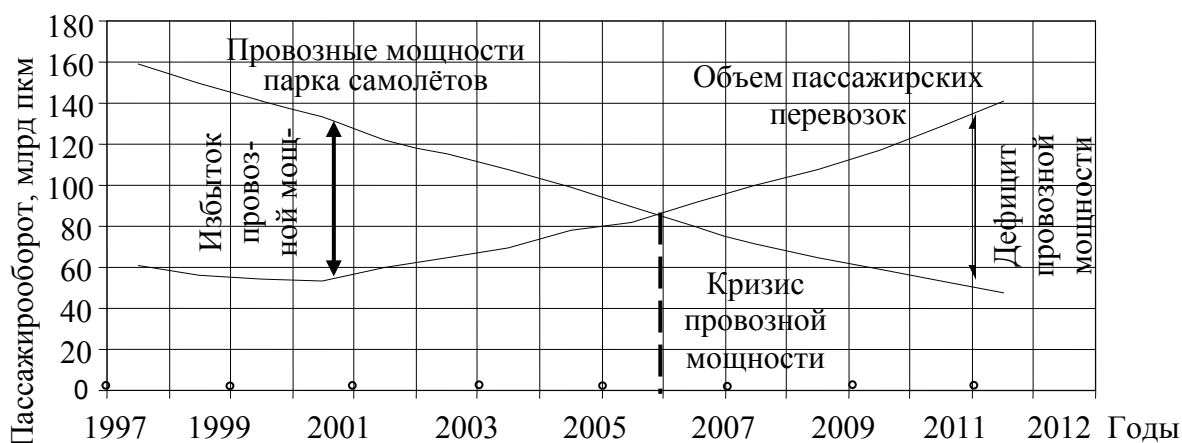


Рис. 2.14. Характеристика провозной мощности действующего парка ВС ГА и прогнозируемых объемов перевозок в пассажирокилометрах (пкм)

⁸³ Алешин А. Угроза радиолокационной слепоты // ВКО. 2005. № 1.

Задача ставилась таким образом, чтобы ЕАРЛС, строящаяся на основе принципа взаимного дополнения радиолокационных систем мирного и военного времени, могла применяться в интересах решения и оборонных, и народно-хозяйственных задач, обеспечив их более эффективное применение за счет информационного взаимодействия, снижения издержек функционирования и территориального дублирования.

Однако относительно ПВО и контроля воздушного пространства такая постановка вопроса предусматривала не только создание позиций двойного назначения и непосредственное использование получаемой от них первичной РЛИ с целью частичного или полного восстановления РЛП страны, но и максимальное использование в интересах ПВО вторичной и третичной информации от автоматизированных систем ОВД, поскольку в этих системах (за счет автоматической идентификации планово-диспетчерской информации с радиолокационной) содержится исчерпывающая индивидуальная информация о каждом управляемом воздушном судне, независимо от наличия на борту системы РЛО-П, а также осуществляется автоматизированная проверка соответствия параметров полета каждого судна утвержденному плану.

Одновременно ставилась задача и по автоматизации процессов планирования полетов ВС и ИВП в зонах ответственности ПВО. Автоматизация этих процессов должна была существенно повысить достоверность плановой информации и оперативность ее доведения до КП радиотехнических частей (соединений ПВО), что, в свою очередь, способствовало бы дальнейшему повышению эффективности контроля за соблюдением установленного порядка ИВП и снижению вероятности необоснованного приведения дежурных сил ПВО в повышенные степени боевой готовности.

В целом обязательная выдача на КП радиотехнических частей (соединений ПВО) не только обобщенной РЛИ о воздушной обстановке, но и идентифицированной с ней плановой информации по ВС, управляемым районными центрами ЕС ОВД, рассматривалась как важнейшая цель информационно-технического взаимодействия двух объединяемых систем.

Единая автоматизированная радиолокационная система представляет собой *совокупность технически совместимых средств радиолокации, комплексов средств автоматизации и связи, а также подсистем управления разной ведомственной принадлежности, разнесенных в пространстве в соответствии с замыслом ПВО и задачами радиотехнического обеспечения полетов ГА, объединенных в единую информационно-техническую систему с целью добывания, автоматизированного сбора, обработки и выдачи потребителям РЛИ о воздушной обстановке в реальном масштабе времени.*

Первоначально в ЕАРЛС предполагалось включить силы и средства РЛ разведки РТВ ПВО, подразделений РЛ обеспечения ВВС, радиотехнических подразделений и частей войсковой ПВО, радиотехнических подразделений и частей ПВО и надводных кораблей ВМФ, а также радиолокационных позиций системы сбора, обработки, отображения и передачи РЛИ ЕС ОрВД. Однако вплоть до настоящего времени удалось объединить в более или менее устойчивый системный инвариант (не только по финансовым и организационным, но и техническим причинам) только лишь средства РЛ разведки РТВ нескольких секторов ПВО и зон ЕС ОрВД.

В процессе реализации предусмотренных Концепцией организационно-технических мероприятий были уточнены перечни информационных элементов ЕАРЛС и проведены практические эксперименты в нескольких зонах ПВО по уточнению возможностей создания информационных элементов двойного назначения. Первым звеном в создаваемой системе стало подразделение двойного назначения «Чална», созданное на базе радиотехнического подразделения Северо-Западной зоны ПВО в Карелии. На технической позиции этого подразделения, кроме штатной радиоэлектронной техники, были размещены средства радиолокации госпредприятия «Сев.-Запаэроконтроль» ЕС ОрВД (в настоящее время – филиал Госкорпорации по ОрВД «Аэронавигация Северо-Запада» – рис. 2.11), в том числе первичная РЛС П-37, вторичный радиолокатор «Корень-АС», а также средства связи и передачи данных. Созданное радиотехническое подразделение стало решать задачи как в интересах ПВО, так и в интересах УВД ГА.

Появилась реальная возможность выполнения задач двойного назначения с использованием РЛИ от подразделений «Чална», «Комсомольск-на-Амуре», «Кош-Агач», «Кызыл» и позиций «Хабаровск», «Дальнереченск», «Ростов-на-Дону», «Минеральные Воды», «Усть-Донецк», «Брюховецкая», «Геленджик», «Светлоград», «Колпашево», «Пермь». По оценке бывшего начальника штаба – заместителя начальника РТВ ВВС А. Алешина, изложенной в цитируемой выше статье, «...в условиях сокращения состава Радиотехнических войск противовоздушной обороны применение позиций двойного назначения федеральной системы частично позволило сохранить качество контроля за соблюдением порядка использования воздушного пространства Российской Федерации. В свою очередь, применение подразделений двойного назначения позволило... почти на 25 % снизить затраты при решении задач управления воздушным движением в Карелии, Хабаровском Крае, Новосибирской области, Республике Тыва».

Вместе с тем резкое снижение финансирования в условиях дефолта 1998 года в сочетании с дальнейшим сокращением группировок РТВ при объединении Войск ПВО и ВВС привело к существенному снижению информационных возможностей ЕАРЛС. Для исправления сложившейся си-

туации усилиями Минобороны, Федеральной службы воздушного транспорта, Российского агентства по системам управления и ряда других министерств и ведомств были разработаны проекты соответствующей целевой программы, новой Концепции совершенствования РЛ системы, а также Перечень информационных элементов двойного назначения, которые должны были войти в эту систему. Параллельно с руководством государственных предприятий по ИВП и УВД, расположенных во всех регионах страны, были подписаны договоренности о создании более 40 информационных элементов двойного назначения, притом что более половины из них уже функционировали. Это позволило практически восстановить надежный РЛ контроль ВП на больших высотах по первичному РЛП на Востоке страны. Для восстановления же сплошного РЛП России на средних высотах необходимо было создать около 100 радиолокационных позиций двойного назначения, оснащенных радиолокационными комплексами «ЛИРА-Т» (ежегодно по 7–12 информационных элементов в течение десяти лет).

Однако многие из запланированных организационно-технических мероприятий реализовать не удалось. Как пишет А. Алешин, «в начале 2001 г. Главное контрольное управление проверило выполнение указов... Проверка показала, что... до сих пор программа совершенствования системы не принята. Финансирование, как и в предыдущие пять лет, на эти цели в бюджете не заложено», а работа по дооснащению средствами радиолокации, автоматизации и связи радиотехнических подразделений и радиолокационных позиций для выполнения ими функций двойного назначения «ведется, как правило, на основе бывших связей руководителей и дружеских отношений коллег в смежных военных и гражданских системах»⁸⁴.

По утверждению военачальника, встречались и редкие исключения. В частности, на базе Великолукского центра ОрВД все же удалось создать типовую радиолокационную позицию двойного назначения, оснащенную разработанными по совместному проекту Минобороны и Минтранса трассовым радиолокационным комплексом «ЛИРА-Т» и комплексом автоматизации «ТОПАЗ-2000». Такая РЛ позиция впервые в отечественной практике учитывала требования и особенности военно-гражданского применения. Она стала не только реально функционирующим фрагментом ЕАРЛС района ПВО, но и испытательной площадкой для комплексной проверки новых технических идей, отработки принципов автоматизированного взаимодействия всех ведомственных элементов создаваемой системы.

Принципиальная схема взаимодействия командных пунктов объединения ВВС (ПВО) с оперативными органами (центрами) ЕС ОрВД по во-

⁸⁴ Алешин А. Угроза радиолокационной слепоты // ВКО. 2005. №1.

просам планирования и контроля ИВП представлена на рис. 2.15⁸⁵. Схема отражает:

а) в части взаимодействия по *планово-диспетчерской информации* – автоматическое распределение и выдачу на взаимодействующие ведомственные АСУ (КСА) ПВО сформированных сводных суточных планов ИВП, корректирующих сообщений по изменению суточных планов, а также сообщений текущего планирования ИВП, включая данные по санкционированному отклонению ВС от маршрутов полетов и установленных эшелонов полетов;

б) в части взаимодействия по радиолокационной информации:

- автоматическую выдачу на взаимодействующие АСУ (КСА) ПВО РЛИ (первичной, вторичной и радиолокационного государственного опознавания),

- в т. ч. сигналов «Бедствие», «Нападение на экипаж», «Потеря радиосвязи»), а также информации, получаемой по другим каналам (например, каналам автоматического зависимого наблюдения), по всем ВС, сопровождаемым ЕАРЛС. Выдача информации должна осуществляться в границах зон ответственности АСУ (КСА);

- автоматический прием от АСУ (КСА) РЛИ (первичной, вторичной и радиолокационного государственного опознавания) по воздушным судам-нарушителям порядка ИВП с указанием вида нарушения по каждому ВС;

- прием РЛИ от АСУ (КСА) по запросам по всем ВС в указанных (назначаемых) стробах автосопровождения.

Одновременно на представленной схеме нашел отражение некоторый переходной вариант информационного взаимодействия КП объединения ВВС (ПВО) с оперативными органами (центрами) ЕС ОрВД по вопросам планирования и контроля ИВП, включающий существующие центры ЕС ОрВД с автономно функционирующими в нем военным и гражданским секторами и перспективные (единые военно-гражданские) центры ЕС ОрВД.

Комплексное испытание одного из фрагментов ЕАРЛС было осуществлено в 2005–2006 годах. В его состав вошли радиотехнические подразделения и части соединений ПВО, а также радиолокационные позиции Росаэронавигации в границах Московского, Пулковского и Великолукского центров ЕС ОрВД. Системотехнические принципы объединения РЛИ о воздушной обстановке, поступающей от средств радиолокационного наблюдения Росаэронавигации, подразделений и частей РТВ, ее обработки

⁸⁵ Савицкий Д.В. Регулирование системы планирования использования воздушного пространства при создании аэронавигационной системы России и автоматизации решения основных задач планирования ИВП: докл. на заседании Аэронавигационного совета (коллегии) 12.09. 2007 г. (г. Москва).

в КСА КП ПВО, а также использования в целях радиолокационного обеспечения дежурных сил ПВО, были определены данными, утвержденными Главкомандующим ВВС. Основной целью испытания было подтверждение возможности: а) повышения эффективности системы по разведке и контролю воздушного пространства страны; б) снижения вероятности необоснованного приведения дежурных сил ПВО в повышенные степени боевой готовности; в) повышения уровня безопасности воздушного движения за счет информационно-технического и технологического взаимодействия укрупненных центров ЕС ОрВД и объединений ВВС и ПВО.

Для достижения цели испытания проводилась практическая проверка технических решений автоматизированного взаимодействия центров ЕС ОрВД и РЛ позиций Росаэронавигации с органами ВВС и ПВО при реализации:

а) автоматизированного приема на КП объединения ВВС от военного и гражданского секторов ЗЦ ЕС ОрВД плановой информации о ИВП в границах соответствующей зоны ЕС ОрВД на предстоящие сутки;

б) автоматизированного формирования на основе этой информации сводного суточного плана ИВП в границах зоны ответственности за ПВО объединения ВВС и доведения ее (в части касающейся) до подчиненных КП соединения ПВО и КП радиотехнических частей;

в) автоматизированного приема и использования на КП объединения ВВС (соединения ПВО) РЛИ о воздушной обстановке от районных (укрупненных) центров ЕС ОрВД;

г) децентрализованного (неавтоматизированного) приема и использования на КП (пунктах управления – ПУ) радиотехнических подразделений ВВС (ПВО) информации о воздушной обстановке от радиолокационных позиций Росаэронавигации;

д) приема и использования в районных центрах ЕС ОрВД РЛИ от радиотехнических подразделений Министерства обороны Российской Федерации.

Структурная схема фрагмента ЕАРЛС, на базе которого проводилась экспериментальная проверка принципов автоматизированного взаимодействия центров ЕС ОрВД и РЛ позиций Росаэронавигации с органами ВВС и ПВО, представлена на рис. 2.16⁸⁶. Информационно-техническое взаимодействие основных компонентов этого фрагмента состоит в следующем.

⁸⁶ Безель Я.В. [и др.]. Что показали испытания фрагмента Единой автоматизированной радиолокационной системы ФСР и КВП Российской Федерации // Радиопромышленность. 2008. Вып.1. С.56–66; Агишев М.Б. [и др.]. Основные принципы организации информационно-технического взаимодействия центров ЕС ОрВД с комплексами средств автоматизации командных пунктов ПВО (там же, с. 66–73).

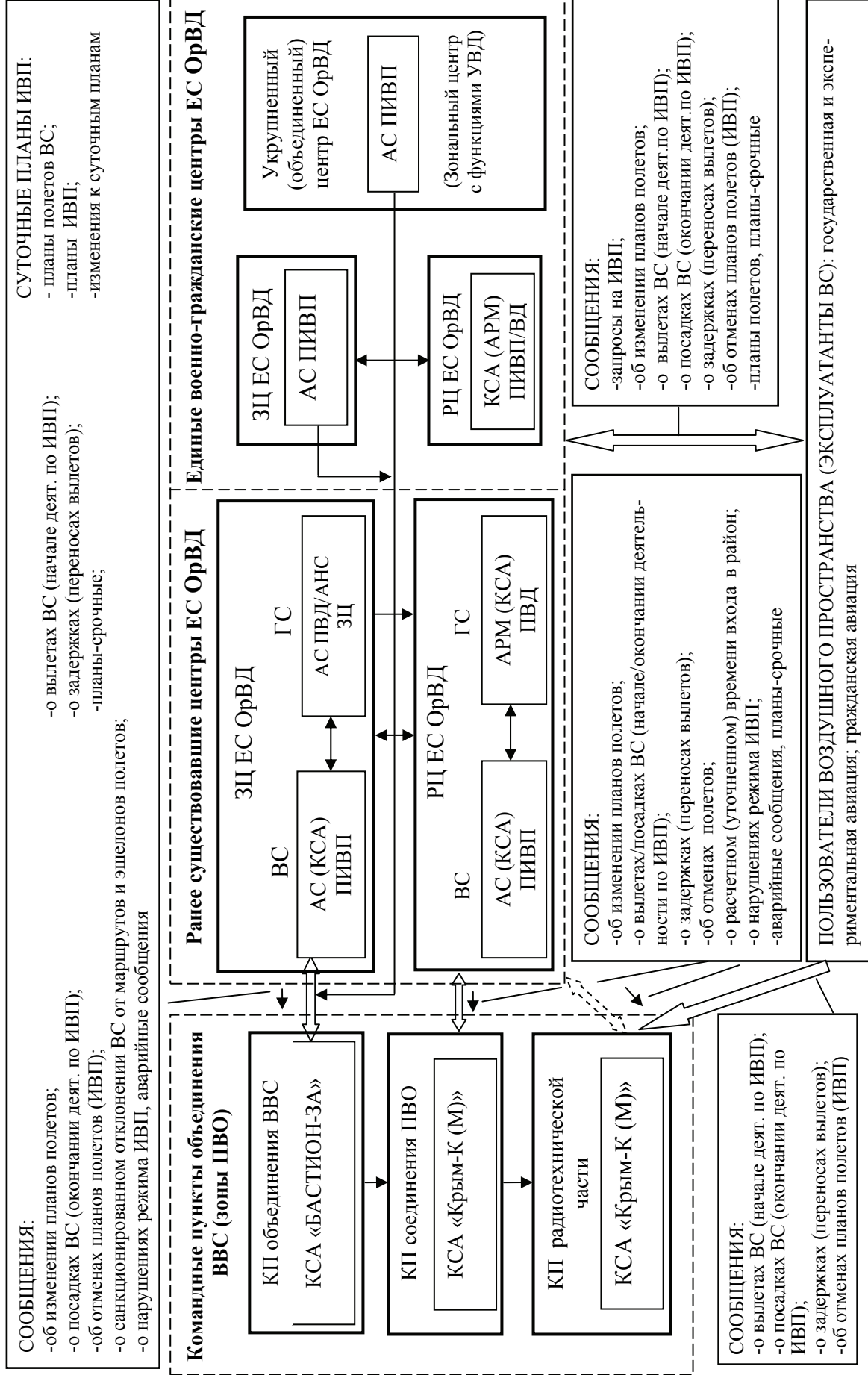


Рис. 2.15. Принципиальная схема взаимодействия КП объединения ВВС (ПВО) с оперативными органами (центрами) ЕС ОрВД по вопросам планирования и контроля ИВП

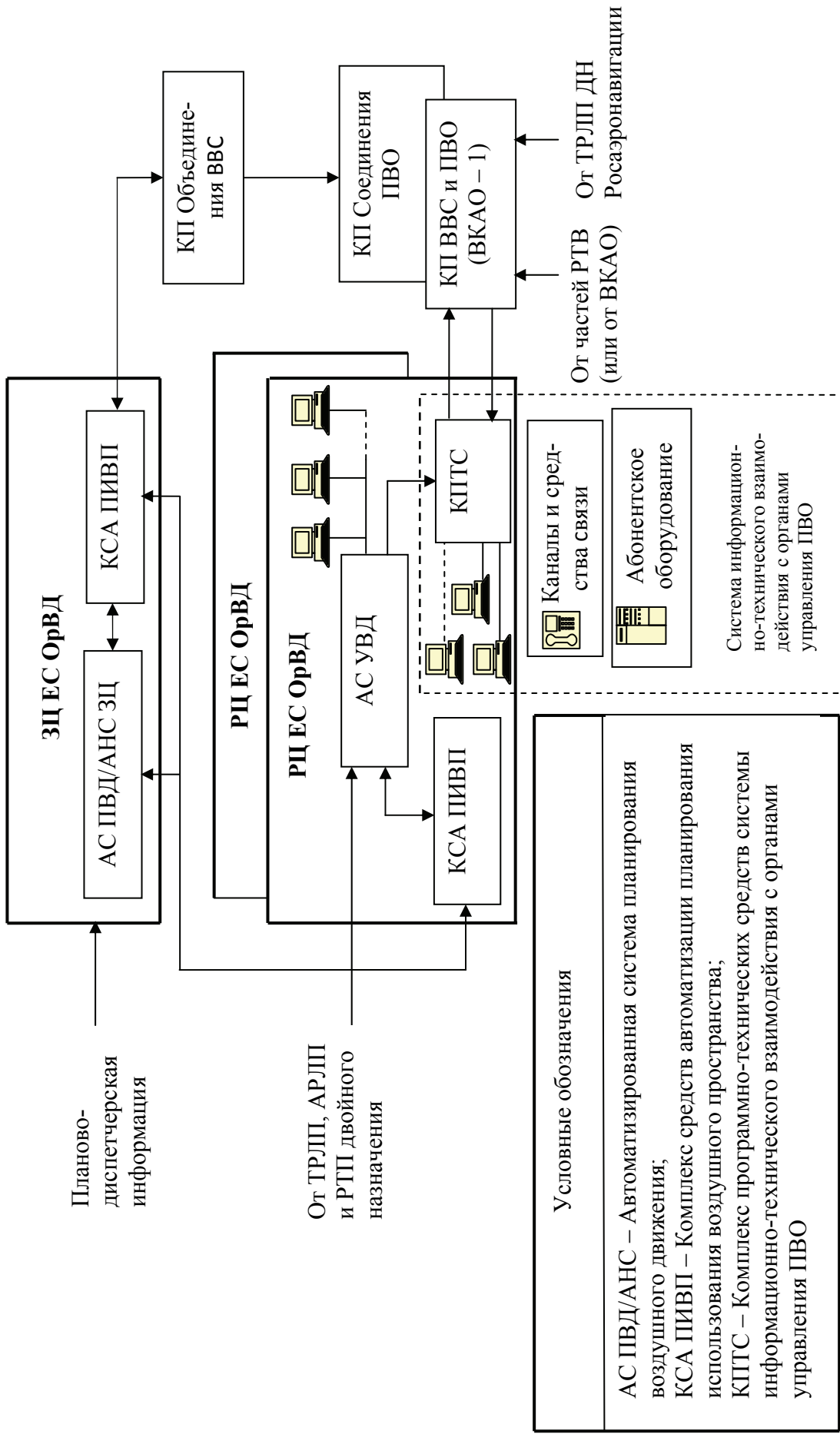


Рис. 2.16. Экспериментальная схема информационного взаимодействия РЦ ЕС ОрВД с КП ВВС и ПВО

Планово-диспетчерская информация о ИВП в границах зоны ЕС ОрВД на предстоящие сутки с зонального центра ЕС ОрВД в автоматизированном режиме поступает на КП объединения ВВС и на КСА планирования использования воздушного пространства (ПИВП) районного центра ЕС ОрВД. В первом случае на основе этой информации в автоматизированном режиме происходит формирование сводного суточного плана ИВП в границах объединения ПВО (зоны ответственности за ПВО) и доведение его (в части касающейся) до подчиненных КП соединений ПВО и КП радиотехнических частей. Во втором случае эта информация, вместе с РЛИ от трассовых и аэродромных радиолокационных позиций Росаэронавигации, а также от радиолокационных позиций двойного назначения Министерства обороны Российской Федерации, поступает на соответствующий КСА УВД. Сюда же, с КСА ПИВП зонального центра ЕС ОрВД, поступает и информация по корректировке планов полета. Вся радиолокационная и планово-диспетчерская информация выдается на автоматизированные рабочие места (АРМ) диспетчеров РЦ ЕС ОрВД и используется для решения задач УВД.

В процессе решения этих задач осуществляется процедура сопоставления плановой и текущей РЛИ, с помощью которой производится ее идентификация. Подобная операция радиолокационного наблюдения может производиться автоматически или вручную по соответствующим алгоритмам. Эта же информация от КСА УВД поступает и на комплекс программно-технических средств (КПТС) системы информационно-технического взаимодействия (СИТВ). До создания укрупненных центров ЕС ОрВД на КПТС дополнительно поступает РЛИ от позиций Росаэронавигации, не входящих в район ответственности существующего районного центра. В составе КПТС предусмотрены специальные АРМ диспетчеров по взаимодействию, основная задача которых состоит в реализации перечисленных ранее видов информационно-технического взаимодействия РЦ ЕС ОрВД и органа управления ПВО. Там, где по каким-либо причинам централизованная выдача РЛИ от радиолокационных позиций Росаэронавигации невозможна, предусмотрен децентрализованный способ выдачи информации на КП и ПУ ближайших радиотехнических подразделений ПВО. На КПТС возлагается функция по обеспечению максимальной идентификации всех воздушных объектов, особенно при смене кодов и режимов работы ответчика вторичного канала радиолокатора (канала «активный запрос-ответ»), а также отождествление ВС, информация от которых поступила по первичному каналу радиолокатора.

Далее вся РЛИ о воздушной обстановке и фактическом плане (маршруте) каждого идентифицированного ВС поступает на КСА КП соединения ПВО с последующим ее отображением на соответствующих АРМ лиц боевого расчета. В свою очередь, КСА соединения ПВО передает на КПТС

РЦ ЕС ОрВД радиолокационную информацию о ВС, нарушающих порядок использования воздушного пространства, терпящих бедствие, неопознанных объектах, контрольных целях для ПВО и истребителях ПВО, поднятых для выполнения боевой задачи.

Для оперативного информационного взаимодействия лиц боевого расчета (дежурной смены) КП соединений ПВО, операторов трассовых радиолокаторов позиций двойного назначения (ТРЛП ДН) и диспетчерского состава РЦ ЕС ОрВД автоматизированные рабочие места диспетчеров по взаимодействию оборудуются техническими средствами оперативно-командной связи. Кроме того, для обеспечения информационного и оперативного взаимодействия центров ЕС ОрВД с КП соединений ПВО в состав СИТВ входит выносной комплект абонентского оборудования ВКАО-1, основные функции и задачи которого совпадают с функциями и задачами КПТС, что обеспечивает одинаковое отображение видеомодели воздушной обстановки на рабочих местах диспетчеров по взаимодействию в центрах ЕС ОрВД и помощника оперативного дежурного по контролю за полетами ВС на КП ПВО. Подобное выносное абонентское оборудование установлено и на неавтоматизированных КП и ПУ ПВО для приема и отображения РЛИ, поступающей от ТРЛП ДН Росаэронавигации.

Результаты испытания фрагмента ЕАРЛС были признаны положительными. Оперативность доведения информации и сообщений по обслуживанию воздушного движения до КП соединения ПВО и КП радиотехнической бригады удалось увеличить в несколько раз. При этом максимальная достоверность идентификации (индексации) ВС и наибольшее снижение нагрузки на боевые расчеты КП ПВО (сокращение рабочего времени) при оценке воздушной обстановки достигались в том случае, когда от районных (в перспективе – укрупненных) центров ЕС ОрВД на КСА КП соединений ПВО (КП радиотехнических частей) осуществляется выдача не только обобщенной РЛИ о воздушной обстановке, не только коррелированной с ней плановой информации о полетах ВС, находящихся под управлением диспетчерского персонала, но и сведений о вводимых изменениях структуры воздушного пространства и ограничениях его использования⁸⁷. Одновременно с этим было отмечено повышение уровня безопасности полетов не только государственной и экспериментальной, но и гражданской авиации.

В реальных условиях функционирования фрагмента ЕАРЛС были также подтверждены и очевидные преимущества централизованного (ав-

⁸⁷ Безель Я.В. [и др.]. Что показали испытания фрагмента Единой автоматизированной радиолокационной системы ФСР и КВП Российской Федерации // Радиопромышленность. 2008. Вып.1. С.56–66; Кислуха А.Е. К единому радиолокационному полю страны // ВКО. 2012. № 2. С. 6–16.

томатизированного) способа получения КП соединения ПВО от районного (укрупненного) центра ЕС ОрВД информации о воздушной обстановке, обобщенной по данным всех средств системы наблюдения ЕС ОРВД. Это преимущество связано с тем, что индивидуальное опознавание ВС, находящихся под управлением диспетчерского персонала, осуществляется независимо от наличия на их борту ответчика российской системы РЛО-П за счет использования средств вторичной радиолокации, информации системы автоматического зависимого наблюдения (АЗН), процедур автоматического или полуавтоматического отождествления РЛИ с информацией активного плана полетов, речевой связи с экипажами ВС. И только автоматизированный способ информационно-технического взаимодействия сопрягаемых систем обеспечивает полное использование имеющихся в системе ОВД индивидуальных данных о воздушных судах в интересах задач ПВО.

Для дальнейшего совершенствования ЕАРЛС Постановлением Правительства Российской Федерации № 345 от 02.06.2006 г. была принята соответствующая ФЦП сроком на три года (2007–2010 гг.), основные цели которой включали:

- повышение эффективности решения задач обороны страны в части, касающейся обеспечения контроля ВП за счет создания ЕАРЛС как информационно-технической и технологической основы системы разведки и контроля;
- восстановление параметров РЛ поля в Центральном, Северо-Западном и Восточном регионах Российской Федерации до минимально необходимого уровня;
- повышение безопасности полетов авиации в зонах с низкой интенсивностью ВД и на малых высотах за счет использования информации, предоставляемой радиотехническими подразделениями двойного назначения Министерства обороны Российской Федерации.

Для достижения поставленных программой целевых установок предусматривалось решение следующих основных задач:

- создание материально-технической базы ЕАРЛС, в т. ч. дооснащение трассовых РЛ позиций двойного назначения (ТРЛП ДН) Федеральной аэронавигационной службы средствами первичной радиолокации, запросчиками системы РЛО-П, средствами автоматизации и приема-передачи данных для функционирования ЕАРЛС;
- организация автоматизированного информационно-технического взаимодействия (сопряжения) ведомственных РЛ средств и систем Министерства обороны Российской Федерации и Федеральной аэронавигационной службы.

Реализация программы предусматривалась в два этапа.

Первый этап – 2007–2008 гг. Повышение эффективности решения задач ПВО страны, предотвращение противоправных действий в ВП, обеспечение безопасности ВД и полетов гражданских и военных ВС:

- создание элементов ЕАРЛС в Центральном, Северо-Западном и Восточном районах Российской Федерации;
- проведение комплексных работ по совершенствованию системы разведки и контроля;
- разработка проекта документации для укрупненных центров ЕС ОрВД и ТРЛП ДН;
- разработка предложений и планов поэтапного дооснащения (переснащения) ТРЛП ДН Росаэронавигации техникой для их применения при решении задач системы разведки и контроля;
- доукомплектование ТРЛП ДН Росаэронавигации радиоэлектронной техникой;
- организация системы связи и передачи данных системы разведки и контроля;
- оснащение укрупненных центров ЕС ОрВД средствами для решения задач информационно-технического взаимодействия этих центров с системой разведки и контроля.

Второй этап – 2009–2010 гг. Повышение безопасности полетов авиации в зонах с низкой интенсивностью ВД и на малых высотах за счет использования информации, предоставляемой радиотехническими подразделениями двойного назначения Министерства обороны:

- завершение дооснащения центров и ТРЛП ДН Росавиации;
- завершение создания элементов ЕАЛРС в Центральном, Северо-Западном и Восточном районах Российской Федерации.

Основные целевые показатели эффективности выполнения ФЦП, в частности, включали: *на первом этапе* – прирост площади контролируемого Министерством обороны ВП Российской Федерации (на высоте 1 000 м) на 340 тыс. кв. км, сокращение расхода ресурса РЭТ Министерства обороны на 176, 0 тыс. ч; *на втором этапе* – прирост площади контролируемого ВП на 1 018 тыс. кв. км при сокращении расхода ресурса РЭТ на 661, 0 тыс. ч⁸⁸.

Из-за недостаточного финансирования реализация и этой ФЦП оказалась под угрозой срыва. В соответствии с упоминавшимися ранее дан-

⁸⁸ В статье Астапенко Ю.А., Волков С.А., Кубанов Ю.К. «РТВ как важнейший компонент ВКО» (ВКО, 2010, №4) приведены несколько иные параметры программы. Авторы утверждают, что в рамках ФЦП предусматривалось создание РЛ позиций двойного назначения на базе 53 позиций ЕС ОрВД, РЛИ которых будет доступна в т. ч. и органам управления РТВ ВВС различного уровня. Предполагалось, что реализация ФЦП позволит существенно нарастить площадь РЛП на высоте 1 000 м. В частности, в Центральной и Северо-Западной зонах ответственности за ПВО она может быть увеличена на 33–38 %, в Сибирской – на 25 %, Северо-Кавказской – на 20 %, Восточной – на 10 %.

ными Счетной палаты о ходе исполнения расходов на реализацию ФЦП по состоянию на 1 августа 2008 года финансирование рассматриваемой ФЦП в 2008 году не осуществлялось.

По периоду 2009–2012 гг. состояние финансирования выявить не удалось. Однако исходя из доклада А.В. Нерадько, сделанного им на совещании «Об организации воздушного движения» 20 июня 2012 года (под руководством Д.А. Медведева), можно сделать вывод, что финансирование этой ФЦП не улучшилось. «Главная программа модернизации ЕС ОрВД, – отметил на совещании руководитель Росавиации, – не корректировалась с 2009 года, несмотря на сокращение почти вдвое объёмов финансирования за последние три года... Просили бы Вашего поручения, уважаемый Дмитрий Анатольевич, о корректировке Федеральной целевой программы с целью пролонгации её... Иначе, возможно, произойдёт отставание аэронавигационной системы России от мировой аэронавигационной системы»⁸⁹.

Следует заметить, что ФЦП «Совершенствование ФСР и КВП (2007–2010 гг.)» в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от февраля 2011 г. № 98 пролонгирована на период до 2015 г.⁹⁰. Однако проблема заключается не в формальной пролонгации, а в своевременном выделении предусмотренных программой финансовых средств.

Тем не менее в 2006–2009 годах Росаэронавигация совместно с Министерством обороны за счет внепрограммной деятельности ввела в эксплуатацию более 1 750 комплектов систем и средств радиотехнического обеспечения полетов и связи, в т. ч. более 20 радиолокаторов, 15 систем инструментальной посадки, 8 радиомаяков ближней навигации. В этот же период проведены работы по техническому перевооружению 28 ТРЛП ДН, а Хабаровский, Владивостокский, Петропавловск-Камчатский и Магаданский центры ЕС ОрВД были оснащены системами информационно-технического взаимодействия с органами управления Министерства обороны. Продолжаются работы по техническому перевооружению ТРЛП ДН в Центральной, Северо-Кавказской и Восточной зонах ПВО. Системами информационно-технического взаимодействия с органами ПВО оснащаются Московский и Якутский центры ЕС ОрВД⁹¹.

⁸⁹ Стенограмма совещания. URL: <http://правительство.рф/special/stens/20342/>.

⁹⁰ Сергеев С.В., Кислуха А.Е. К единому радиолокационному полю страны // ВКО. 2012. №3. С. 18–25.

⁹¹ Более подробно см.: Нерадько А.В. Тез. докл. на заседании Аэронавигационного совета (коллегия) 27 апреля 2007 года; Савицкий Д.В. Реформирование системы организации воздушного движения // Транспортная безопасность и технологии. 2007. № 3; Токарев Ю.П. Состояние, проблемы системы обеспечения аэронавигационной информацией в Российской Федерации и пути их решения // Тез. докл. на заседании Аэронавигационного совета (Коллегия) от 12.09.07; Беляков А.В. Перспективы развития Аэронавигационной системы Российской Федерации // Транспортная безопасность и технологии. 2010. № 1 и др.

В целом рассматриваемый период характеризуется созданием по всей территории страны пока лишь базовых элементов ЕАРЛС, что не может считаться удовлетворительным ни с точки зрения безопасности полетов возрождающейся отечественной гражданской авиации, ни с точки зрения обороноспособности страны. Достаточно сказать, что из-за десятилетий недофинансирования основу современного парка радиотехнических средств подразделений РТВ ВВС составляют устаревшие образцы РЛС, доля современных – не более 7 %, исправной техники – 50–60 %, из-за чего резко снижена интенсивность несения дежурства по ПВО. К дежурству по графику в течение года привлекается не более половины подразделений и в основном из числа тех, что расположены в пределах приграничной (приморской) полосы. При этом явная диспропорция между требованиями надсистемы к группировке РТВ и ее реальными возможностями по объему и качеству РЛИ сохраняется.

Можно предположить, что за счет пролонгации данной ФЦП к 2015 году удастся создать еще 32 радиолокационные позиции двойного назначения (РЛП ДН), а к 2020 году все 114 РЛП ДН войдут в состав ЕАРЛС. Однако даже в этом случае полностью восстановить утраченный за предшествующие годы радиолокационный контроль за полетами в ВП Российской Федерации не удастся, так как простого замещения устаревших образцов РЭТ частей современным вооружением даже нарастающими темпами (согласно Государственной программе вооружения 2020) уже недостаточно. Можно разработать самую передовую теорию и наиболее эффективную методологию РЛ систем, но если Правительство страны не находит возможности финансирования им же утвержденных целевых программ, трудно говорить об успешном решении какой-либо государственной проблемы.

Цитируемый ранее генерал-лейтенант Г.К. Дубров (в 1987–1992 гг. – начальник РТВ ПВО, а в период с 1992 по 1996 гг. – заместитель руководителя специальной Генеральной дирекции по выполнению работ, связанных с модернизацией ЕС ОрВД), приводя в качестве примера государственного подхода к подобным проблемам Постановление Государственного комитета обороны № ГОКО-3686сс от 4 июня 1943 года «О радиолокации», заметил: «Уважаемые читатели, видите, как четко, конкретно, лаконично поставлена задача на организацию создания и производства радиолокационного вооружения как важнейшего средства обеспечения защиты объектов, войск, гражданского населения от уничтожения средствами воздушного нападения противника. В Постановлении расставлены точки, кто конкретный организатор и конкретный исполнитель, кто персонально отвечает своей головой за реализацию и исполнение пунктов постановления. Так могут готовить и выпускать подобные Постановления и Решения только те Руководители Государства, которые стоят на позициях обеспечения национальной независимости тех народов, во главе которых они поставлены, судьба которых

(народов) является их личной судьбой, гибель государства, гибель народа – это их личная гибель»⁹². Подобным образом ставят вопрос С.В. Сергеев и А.Е. Кислуха «Вероятно, самым широким кругам российской общественности и экспертному сообществу страны, – пишут авторы, – интересно бы знать, насколько эффективно работает созданная единая радиолокационная система ФСР и КВП в сегодняшних границах ответственности за противовоздушную оборону. Нас не должен терзать сегодня и в исторически обозримом будущем вопрос: грозит ли России радиолокационная слепота?»⁹³

Сложившиеся финансовые и организационные проблемы создания ЕАРЛС усложняются еще и тем, что на фоне существенных достижений в военно-информационной сфере ряда развитых европейских государств, в первую очередь США, в отечественной военно-технической (да и в государственной) политике до сих пор отсутствует четкое понимание принципов создания единой информационно-управляющей системы двойного назначения, иногда называемой *глобальным информационно-управляющим полем страны*. Выбрав в качестве базового принципа создания ЕАРЛС Российской Федерации принцип догоняющей модернизации, который на начальном этапе его реализации больше напоминает принцип бессистемного и не совсем последовательного латания дыр в послереформенном РЛП, страна рискует отстать от информационно развитых европейских государств навсегда.

2.6. Основные принципы и направления развития ЕАРЛС

2.6.1. Принципы развития ЕАРЛС

Исходя из рассмотренной ранее системной формы и технико-технологической сущности РЛ системы, принципы (нормативные правила) ее совершенствования и развития можно сгруппировать по следующим основным признакам: а) уровню общности (справедливости) того или иного принципа относительно всех компонентов системы), б) признаку функциональности (с точки зрения существующих в ЕАРЛС отношений и взаимодействий «система – надсистема»), в) принципу технологичности (с точки зрения соблюдения основных закономерностей протекающих в ней вещественно-энергетических и информационных технологий), г) принципу техничности (с точки зрения соблюдения основных закономерностей строения и функ-

⁹² Дубров Г.К. О Радиотехнических войсках и не только... М., 2007. С. 107.

⁹³ Сергеев С.В., Кислуха А.Е. К единому радиолокационному полю страны // ВКО. 2012. №3. С. 18–25.

ционирования радиоэлектронной техники: СРЛ, КСА и связи). Признак функциональности (исходя из характера отношений и взаимодействий системы с надсистемой) можно, в свою очередь, разделить на признаки, учитывающие специфику взаимодействия системы с собственной надсистемой, и признаки, учитывающие специфику взаимодействия системы с внешней средой (включая, например, воздушного противника и средства информационного противодействия естественного и искусственного происхождения).

К первой группе принципов целесообразно отнести принципы научности, системности, открытости, информационной дополняемости, универсальности, функциональной надежности (живучести), информационной глобальности и принцип рефлексивности. *Ко второй группе* принципов (с точки зрения отношений и взаимодействий «система – надсистема») целесообразно отнести принципы соответствия структуры системы целям и задачам надсистемы, технологической, технической и информационной совместимости компонентов системы между собой и собственно ЕАРЛС с надсистемой, иерархичной доступности к информационным ресурсам и принцип минимума энтропии в состоянии системы. К этой же группе принципов, но с точки зрения отношений и взаимодействий «система – внешняя среда», следует отнести принципы соответствия структуры системы структуре внешней среды, мобильности, информационной защищенности и принцип максимума энтропии в состоянии системы (принцип скрытности). *Третья группа* принципов включает принципы высокотехнологичности, технологической универсальности и принцип высокой степени автоматизации основных технологических процессов. *К четвертой группе* принципов целесообразно отнести принципы унификации, модульности построения, адаптивности и принцип эксплуатационной (технической) надежности.

Первая группа принципов определяет общую идеологию построения системы⁹⁴. В частности, методологические принципы научности и системности предполагают ориентацию на самые передовые достижения науки и техники, имеющиеся в арсенале общей теории и методологии науки к началу разработки и построению РЛ системы. Финансовая, ресурсная и энергетическая емкость таких систем, пространственно-временная распределенность и государственный характер решаемых ими задач предполагают максимальную оптимизацию проектных и управленческих решений, которая невозможна вне научного подхода. Сюда же относится и выбор методологии проектирования системы, который должен исходить не от промышленности по

⁹⁴ При более детальном исследовании этой группы принципов можно заметить, что часть из них (например, принципы научности и системности) носит общеметодологический характер, то есть относится непосредственно к субъекту деятельности. Остальные принципы несут на себе онтологическую (сущностную) нагрузку, то есть затрагивают сущностные аспекты самой системы.

ныне доминирующему ведомственному принципу «предлагаем, что есть», а от заказчика (надсистемы), исходя из всей совокупности стоящих перед ним задач (принцип государственного подхода «так надо в интересах дела»). При этом вся совокупность теоретических оснований и методологических средств должна применяться во взаимосвязи и взаимозависимости, то есть системно.

Принцип открытости предполагает возможность интеграции данной системы в существующие или перспективные системы более высокого уровня структурной организации либо включение в ее состав в качестве подсистем систем более низкого уровня структурной организации без кардинальной перестройки ее структуры и протекающих в ней вещественно-энергетических и/или информационных технологий.

Принцип информационной дополняемости предполагает взаимное дополнение информационных возможностей ЕАРЛС информационными возможностями других РЛ систем и наоборот.

Принцип универсальности отражает двойное назначение системы, связанное с одновременным решением и народно-хозяйственных задач (задач контроля ИВП), и задач национальной обороны. Отсюда следует принцип функциональной надежности (живучести) системы, которая должна быть готовой к решению возложенных на нее информационных задач с требуемыми показателями качества не только в простых или особых условиях мирного времени, но и в военное время, включая ситуации огневого воздействия на компоненты системы со стороны противника.

Принцип информационной глобальности предполагает создание глобального информационно-управляющего поля, в рамках которого происходит не только сбор, обработка и доведение до потребителей плановой, полетной, разведывательной или боевой информации, но возможность доведения до них (хотя бы в перспективе) команд (распоряжений) управления и прием докладов о текущем состоянии компонентов системы как в мирное, так и военное время.

Принцип рефлексивности отражает социальную природу рассматриваемой системы⁹⁵. В отличие от принципа адаптивности (приспособляемости) системы к изменяющимся условиям внешней среды этот принцип побуждает индивидуального или коллективного субъекта системы к активному воздействию на эти условия (в известной степени – к их изменению и управлению

⁹⁵ Рефлексия (лат. reflexio – обращение назад, отражение) в узком смысле слова представляет собой самообращенность сознания человека, сопровождающую любую деятельностью, в которой возникают затруднения; в широком смысле слова – представляет собой не только самообращенность сознания человека, но и обращенность этого сознания на процесс и результат деятельности другого субъекта, с которым первый находится во взаимодействии (противодействии). Подобное свойство рефлексии характерно и для социальных систем, включая системы «человек – техника».

ими) в собственных интересах. В силу фундаментального значения для любой социальной системы свойство рефлексивности выступает в качестве одного из существенных признаков ЕАРЛС. По этой причине такую систему в дальнейшем будем называть *информационной системой с рефлексией*.

Вторая группа принципов отражает сущность РЛ системы с точки зрения ее функционального качества (эффективности функционирования в отношениях и взаимодействиях «система – надсистема» и «система – внешняя среда»). Они закономерно вытекают из сформулированных ранее общесистемных принципов структурности и функционального среза. В рамках взаимодействий «система – надсистема» структура системы должна быть адекватной целям и задачам (целевой функции) надсистемы. Соответственно этому все компоненты системы и надсистемы должны быть технологически, технически и информационно совместимы между собой, обеспечивая тем самым: а) иерархическую доступность к информационным ресурсам всех компонентов системы в рамках их компетенции и б) минимум уровня энтропии (неопределенности) в состоянии системы и ее компонентов. В рамках же взаимодействий «система – внешняя среда» структура системы и основные варианты ее поведения должны быть адекватными структуре и основным вариантам действия (воздействия) внешней среды, обеспечивая: а) устойчивость структуры к внешнему (огневому) воздействию, в т. ч. (и в первую очередь) за счет высокой мобильности; б) защищенность своих информационных ресурсов (включая наличную информацию о состоянии внешней среды) при максимальном уровне энтропии своего состояния и собственных намерений для внешней среды (воздушного противника). В этом своем качестве (наряду со специфическим качеством рефлексивности) ЕАРЛС выступает как *конфликтная информационная система*.

В *третьей группе* принципов нашли свое проявление фундаментальные законы и закономерности технологического движения вещества, энергии и информации (закон перехода технологической функции от человека к технологическому средству, закон детерминации технологической функции технического объекта технологической целью, закон повышения уровня опосредствования (автоматизации) человеческой деятельности, закон повышения степени расчлененности технологической функций технического средства по мере ее технологизации и др.). В силу высокой скорости протекания основных информационных процессов система должна функционировать в реальном масштабе времени, что возможно только при высоком уровне ее автоматизации. Высокий уровень автоматизации, в свою очередь, предполагает предельную расчлененность в пространстве и во времени процессов сбора, обработки, отображения и передачи информации, что достижимо только на уровне наукоемких технологий и технологической универсальности процессов во всех уровнях системы.

Четвертая группа принципов отражает некоторый технический идеал, отвечающий требованиям унифицированности (применение однотипных подсистем, узлов и программного обеспечения в различных звеньях и уровнях системы), модульности построения (создание однотипных модулей, объединенных общим принципом информационно-технологического и технического взаимодействия), высокой эксплуатационной надежности (например, за счет технического резервирования) и адаптивности системы к изменяющимся условиям внешней среды. В последнем случае (в отличие от рассмотренного выше свойства рефлексивности) речь идет о способности технического (радиолокационного) компонента системы перестраивать свои пространственно-временные, поляризационные и частотные параметры адекватно изменению соответствующих параметров внешней среды (средств РЭБ воздушного противника).

Исходя из изложенных в начале главы общих соображений, несложно заметить, что перечисленные принципы носят эмпирический характер, то есть не следуют с необходимостью категорического силлогизма из строгой научной теории РЛ систем. Это обстоятельство указывает на открытый характер приведенного выше перечня, который вряд ли способен охватить все возможные ситуации разработки, построения и функционирования проектируемой системы. В то же время они и не являются сопутствующими принципами метода проб и ошибок, поскольку представляют собой нормативные следствия из ряда эмпирических фактов, идей, гипотез и эмпирических закономерностей РЛ систем, обобщенных с точки зрения междисциплинарной методологии и современной системотехники. Эти принципы, пусть даже в первом приближении, составляют некоторую междисциплинарную онтологию (системотехническую картину мира), которой идеологи и методологи РЛ систем могут руководствоваться в своей проектной деятельности.

2.6.2. Основные направления развития ЕАРЛС

Ранее отмечалось, что при создании ЕАРЛС в современном ее состоянии из всего многообразия принципов системного подхода востребованными в той или иной степени оказались лишь принципы соответствия структуры системы целям и задачам надсистемы, соответствия структуры системы структуре внешней среды, а также принцип технологической, технической и информационной совместимости основных компонентов и уровней системы (обобщенный принцип догоняющей модернизации). Столь незначительный перечень регулятивных норм проектной деятельности определялся ограниченностью задач, решаемых в процессе создания рассматриваемой системы, основной из которых была задача хотя бы частичного восстановления РЛП страны после неоправданного сокращения боевого состава РТВ. Оче-

видно, что подобный подход, в какой-то мере оправданный на начальном этапе создания системы (на этапе частичного восстановления РЛП страны), в процессе ее дальнейшего совершенствования и развития не может считаться приемлемым ни с точки зрения устойчивого и всестороннего аэронавигационного обеспечения государственной, экспериментальной и ГА в интересах повышения безопасности полетов ВС, ни с точки зрения эффективности контроля ИВП страны, ни с точки зрения гарантированного отражения ударов СВКН противника по объектам Российской Федерации или ее союзников.

Обостряющееся несоответствие между информационными возможностями формирующейся ЕАРЛС и требованиями к полноте, достоверности, своевременности и точности радиолокационной и аэронавигационной информации (наряду с очаговой структурой существующего РЛП) объясняется существенными изменениями в современном авиационном комплексе страны. Это, в первую очередь, связано с устойчивым ростом объема пассажирских перевозок отечественной ГА как на внутренних, так и на международных авиалиниях. Сюда же следует отнести и возросший объем авиaperевозок в воздушном пространстве страны иностранными авиакомпаниями. Одновременно с этим произошли значительные изменения в правилах полета развивающейся отечественной малой авиации⁹⁶ за счет перехода ею от разрешительного к уведомительному порядку ИВП, что существенно обострило проблему КВП и обеспечения необходимого уровня безопасности полетов, особенно на малых высотах. Кроме того, осталась неизменной и тенденция к снижению доли самолетов отечественной ГА, оборудованных СРЛО-П.

Несоответствие же информационных возможностей ЕАРЛС требованиям к качеству РЛО систем ПВО и ВКО страны объясняется существенными изменениями в вооружении, информационном, тыловом и техническом обеспечении СВКН ведущих стран НАТО (в первую очередь, США), которые привели к коренным изменениям в стратегии и тактике боевого применения этих средств. Пока Россия с переменным успехом занималась восстановлением некогда единого и многоярусного РЛП, Запад продолжал наращивать свой воздушно-космический потенциал нападения и на многие годы опередил наши средства ПВО и ВКО по возможности адекватного реагирования на внешние угрозы в воздушно-космической сфере.

Между тем опыт локальных войн и вооруженных конфликтов конца XX–начала XXI веков, в которых прошли боевые испытания несколько

⁹⁶ Напомним, что под уведомительным порядком ИВП понимается предоставление пользователям ВП возможности выполнения полетов без получения диспетчерского разрешения. При этом ответственность за предотвращение столкновений с ВС и другими материальными объектами в воздухе, столкновений с препятствиями при выполнении полетов в ВП класса G возлагается на командира ВС (Федеральные авиационные правила ИВП Российской Федерации, утв. Пост. Правит. Российской Федерации от 11.03.2010 г. № 138, ст. 123–127).

поколений СВН западных стран, убедительно свидетельствует, что их боевая авиация была и остается одним из основных средств, способных нанести удары на глубину театра военных действий (ТВД) или по всей территории противника, предопределяя не только захват инициативы, но и исход противоборства. При этом реализация программ совершенствования и развития СВКН западных стран идет полным ходом в следующих основных направлениях:

- создание и полномасштабное развертывание глобальной космической системы (КС) «Battlefield Awareness» («Прозрачность поля сражения»), позволяющей в режиме реального времени наблюдать за обстановкой на земле, в воздухе и космосе, координировать действия с другими КС, наземными и воздушными системами защиты и нападения;
- создание ударных КС (орбитальных платформ) для нанесения ударов по наземным, воздушным и космическим объектам с помощью средств поражения, разработанных на основе ядерных технологий;
- широкомасштабное освоение диапазона высот от 35–40 до 100–120 км и скоростей полета от М3 до М(15–20) с использованием ЛА, создаваемых на основе гиперзвуковых технологий⁹⁷;
- комплексное применение крупногабаритных и маломассогабаритных космических аппаратов различного назначения с запуском их с помощью ракет-носителей мобильного базирования;
- совершенствование межконтинентальных баллистических ракет с целью повышения их возможностей по преодолению систем предупреждения о ракетном нападении и противоракетной (воздушно-космической) обороны противника, оснащение их головными частями неядерного оружия массового поражения, управляемыми в полете;
- совершенствование нестратегических средств ракетного нападения (нестратегических баллистических ракет) с целью доведения их дальности и скорости полета до максимально установленных международными договорами ($D_{\text{П}} < 3\ 500$; $V_{\text{П}} < 5\ 500$ м/с), повышение их точности и поражающего действия;
- активное внедрение при создании СВКН технологии «СТЕЛС» и микроминиатюризации бортовых блоков, узлов и систем, а также переход с программно-аппаратных средств на моноблочные программные комплексы;
- разработка и оснащение воздушных и ракетно-космических носителей оружием направленной и электромагнитной энергии и оружием, основанном на новых физических принципах;

⁹⁷ Заметим, что в 1980-х и начале 1990-х годов ведущая роль в разработке подобных систем принадлежала Советскому Союзу, осуществившему ряд успешных испытаний гиперзвуковых ЛА.

- создание запасов пилотируемых и беспилотных СВН, способных нанести скоординированные по времени и месту мощные удары десятками тысяч средств высокоточного оружия⁹⁸.

Одновременно руководство вооруженных сил США предпринимает значительные усилия по поддержанию на необходимом уровне существующих и разработке перспективных средств разведки и РЭБ, предназначенных для скрытного ведения разведки систем и средств связи ПВО, управления войсками и последующего нарушения или затруднения их функционирования как самостоятельно, так и во взаимодействии с другими средствами. При этом основные НИОКР по созданию средств РЭБ сосредоточиваются на следующих направлениях⁹⁹:

- расширение диапазона частот постановки помех и увеличение количества одновременно подавляемых РЭС;
- повышение энергопотенциала станций помех за счет установки ФАР, формирующих многолучевые диаграммы направленности;
- создание средств радио- и радиотехнической разведки, обеспечивающих обнаружение работы средств радиолокации и связи повышенной скрытности и их высокоточное пеленгование;
- внедрение цифровых методов обработки сигналов;
- увеличение количества параметров адаптации помехового сигнала;
- формирование дезинформирующих (имитирующих) помех с высокой точностью воспроизводящих сигналы РЭС противника;
- разработка устройств автоматического распознавания речи и синтеза дезинформирующих сообщений для передачи в радиосетях противника;
- повышение уровня автоматизации комплексов и использование методов искусственного интеллекта;
- создание аппаратуры радиоэлектронного подавления, генераторов электромагнитного излучения (ЭМИ) и СВЧ-оружия для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА);
- объединение в единую сеть средств разведки, РЭБ и их интеграция со средствами поражения;
- внедрение открытой модульной архитектуры аппаратуры, позволяющей комплектовать носитель необходимыми средствами для выполнения определенных задач в конкретной радиоэлектронной обстановке по принципу конструктора, а также наращивать возможности при возникновении новых угроз и проведении модернизаций;
- замена элементной базы на более совершенную.

⁹⁸ Куликов А. ВВС как инструмент политики // ВКО. 2007. № 5,6. С. 34–41; 48–53

⁹⁹ Михайлов А. Подавляющее информационное превосходство // ВКО. 2007. №5. С. 72–77.

Американские специалисты считают, что создание широкополосных приемопередающих комплексов с фазированной антенной системой, формирующей управляемую диаграмму направленности с несколькими лучами и способной быстро изменять поляризацию излучения, позволит осуществить переход от аппаратуры всенаправленного излучения широкополосных (заградительных) и узкополосных (прицельных по частоте) помех к станциям, способным создавать прицельные по направлению (пространству) и частоте помехи (*selective jamming*) более высокого уровня мощности. Это, в свою очередь, позволит оперативно определять и назначать для РЭП наиболее важные объекты и цели (РЛС ПВО, средства и линии радиосвязи и др.), подавление которых обеспечит надежное нарушение или срыв управления войсками и оружием при минимально задействованных силах и средствах РЭБ и значительном снижении уровня помех для РЭС своих войск.

Не менее важное значение придает руководство вооруженных сил США и всестороннему информационному обеспечению боевых действий СВКН, что нашло свое проявление в попытках создания *единой информационно-управляющей структуры* вооруженных сил на основе принципа функциональной интеграции разрозненных космических, воздушных, наземных и морских информационных средств (разведки, РЭБ, связи, навигации, управления оружием, автоматизированного сбора и обработки информации, моделирования и др.) с опорой на услуги глобальных телекоммуникационных сетей военного и гражданского назначения. По их мнению, создание такой системы приведет к появлению нового стратегического и тактического качества – возможности систематического глобального наблюдения за развитием воздушно-космической обстановки, ее оперативной и адекватной оценки и точного наведения ударных средств на объекты, расположенные в любом районе земного шара, в интересах решения задач как стратегического, так и тактического уровня. При этом предполагается обеспечить (в течение нескольких десятков минут после запроса) органы управления объединений, соединений и частей подробными (с разрешением объектов размером порядка 10 м) электронными картами района боевых действий, содержащими информацию о текущей обстановке. Карты будут также содержать мозаичные видеовставки, отражающие отдельные важные особенности элементов обстановки в интересах подготовки целеуказания ударным средствам и оценки результатов нанесения ударов. Предполагается также автоматизировать процесс оценки противника, разработку вариантов действий своих войск и их реализацию¹⁰⁰.

¹⁰⁰ Ноговицин А.А., Барвиненко В.В. Развитие способов и форм военных действий: информационный аспект // Военная мысль. 2004. № 2. С. 2–7.

Как подчеркивают А.А. Ноговицин и В.В. Барвиненко, именно развитие систем разведки, связи и математических моделей для поддержки принятия решений и обеспечения оперативного планирования позволило вооруженным силам США и других государств-участников НАТО достаточно гибко подходить к выбору способов и форм военных действий в локальных войнах последнего времени. В частности, созданные системы разведки, связи и управления позволяли не только детально изучать и оценивать обстановку в районах боевых действий, но и использовать самые различные силы и средства поражения (в том числе современные высокоточные ракеты и управляемые авиабомбы с лазерным наведением, а также бомбардировщики В-52 с обычными неуправляемыми бомбами), осуществлять их скоординированное применение практически сразу после обнаружения объектов любыми (космическими, воздушными или наземными) средствами разведки. Развитая же система связи между экипажами боевых самолетов и силами спецопераций позволила сократить время с момента обнаружения цели подразделениями спецназа до момента нанесения по ней удара авиацией *с нескольких часов до нескольких минут*.

Рассмотренные проблемы несоответствия информационных возможностей ЕАРЛС требованиям к качеству радиолокационного обеспечения систем ПВО и ВКО страны, а также требованиям к полноте, достоверности, своевременности и точности радиолокационной и аэронавигационной информации со стороны отечественной ГА дополнительно усложняются комплексом проводимых в Российской Федерации мероприятий по освоению арктической зоны. В программе освоения этой зоны полярные исследования перешли из сферы науки в сферу экономики, что привело к ожесточенному политическому спору между государствами, граничащими с Арктикой¹⁰¹.

¹⁰¹ Напомним, что Арктикой называется область земного шара, включающая северные окраины Евразии, Северной Америки и почти весь Северный Ледовитый океан. Южная граница Арктики совпадает с южной границей зоны тундры. Площадь региона составляет около 27 млн кв. км (почти в три раза больше Европы). Центральную часть околополюсной области занимает Северный Ледовитый океан площадью 14,75 млн кв. км. Исследования Геологической службы США, проведенные в 2000 г., показали, что в арктическом регионе может находиться до четверти потенциальных мировых ресурсов нефти и газа. На текущий момент в Арктике выявлено более 20 крупных нефтегазовых месторождений. Для 10 из них перспективность разработки уже доказана. Согласно оценкам Минприроды Российской Федерации, на площади 6,2 млн кв. км сосредоточены запасы в 15,5 млрд т нефти и 84,5 трлн кубометров газа. Самым известным является Штокмановское месторождение, расположенное в российской шельфовой зоне Баренцева моря. Его запасы оцениваются в 3,7 трлн кубометров газа и порядка 31 млн т газоконденсата. На арктическом шельфе сосредоточены крупные запасы рыбы. Помимо этого, по данной территории проходит Северный морской путь, значимость которого как транспортной магистрали неуклонно растет. В ближайшей и среднесрочной перспективе следует ожидать активизации деятельности в полярных широтах (Мальцева Л., Липатова С. Битва за Арктику. URL: www.vko.ru info@vko.ru).

Одной из форм реализации государственной политики в Арктике стало введение режима пограничной зоны в ряде административно-территориальных образований Арктической зоны Российской Федерации, что в дальнейшем неизбежно повлечет за собой установление вдоль государственной границы Российской Федерации в Северном Ледовитом океане приграничной полосы – воздушного пространства, примыкающего к границе, шириной 25 км с особым режимом его использования. В этом случае перед ЕАРЛС и ее информационно-технической основой – РТВ – могут быть поставлены задачи РЛО ПВО сил общего назначения и объектов в Арктической зоне Российской Федерации и ведение радиолокационного контроля за соблюдением правил ИВП в приграничной полосе с особым режимом полетов. Реализация этих задач может потребовать как минимум воссоздания ранее существовавшего здесь РЛП РТВ, когда вдоль всей сухопутной государственной границы по побережью Северного Ледовитого океана и на островах было развернуто около 50 радиотехнических подразделений.

Таким образом, реальные условия внутренней и внешней среды, в рамках которых происходит становление и развитие ЕАРЛС, предъявляют к ней значительно более жесткие функциональные требования, чем те, к выполнению которых она в настоящее время оказалась готовой. В этой связи возникает весьма непростая и комплексная по своему содержанию проблема выбора направления и принципов ее совершенствования и развития, решение которой не лежит на поверхности из-за рассмотренной ранее системной формы и технико-технологической сущности ЕАРЛС.

С точки зрения методологии системного подхода такая система представляет собой сложную неравновесную (нелинейную, открытую) систему, подчиняющуюся законам и принципам синергетики (см. подпараграф 1.3.4). Важнейшей особенностью таких систем является неоднозначность их эволюционного будущего: проходя через точку бифуркации (состояние неустойчивости), такие системы «выбирают» один из доступных им путей-аттракторов развития. При этом «отвергнутые» в точке бифуркации аттракторы «закрываются» и становятся в дальнейшем недоступными системе. Это, в частности, означает, что в случае ошибочного выбора идеологии построения ЕАРЛС вернуться к исходному состоянию и исправить допущенные ошибки будет уже невозможно.

К рассмотренной методологической проблеме и ей подобным примыкает не менее важная экономическая проблема, сложившаяся в рамках отношений «система – надсистема». Как подчеркивают в этой связи Ю.А. Астапенко, С.А. Волков и Ю.К. Кубанов, «в качестве основных ограничений, накладываемых на развитие группировки РТВ ВВС, выступают выделенные на данный род войск ВВС лимиты ассигнований, включаемые в Государственную программу вооружений на период до 2020 г., пределы штатной численности

личного состава, количество воинских частей и подразделений радиотехнических войск, нормативно установленные, исходя из конечного технического ресурса вооружения и военной техники, нормы его расходования»¹⁰².

Попытаемся хотя бы в первом приближении сформулировать наиболее перспективное направление совершенствования и развития ЕАРЛС. В современной научно-технической литературе ведется на этот счет активная полемика. Так, Ю.А. Астапенко, С.А. Волков и Ю.К. Кубанов, в приведенной выше статье, в качестве одного из подходов предлагают программу, предусматривающую:

- стабилизацию боевого состава РТВ ВВС;
- наращивание усилий по созданию ЕАРЛС при главенствующей роли РТВ ВВС;
- проведение программно-целевого комплексного оснащения группировок РТВ в зонах ответственности за ПВО новыми средствами радиолокации, автоматизации и связи согласованно с оснащением новым вооружением авиации и зенитных ракетных войск;
- концентрацию усилий по совершенствованию группировок РТВ в приграничных (приморских) районах на направлениях возможных военных конфликтов, в районе важных объектов, а также в районах с интенсивным ВД, в т. ч. за счет имеющегося дублирования в дислокации подразделений РТВ и РЛ позиций двойного назначения;
- переход Радиотехнических войск ВВС в ряде регионов страны только к решению задачи контроля ВП с оснащением радиотехнических подразделений таких группировок РЛС дежурного режима и обеспечением возможности дополнительного развертывания РЛС боевого режима из состава мобильного резерва;
- координация мероприятий по совершенствованию группировок РТВ ВВС в зонах ответственности за ПВО с государствами, входящими в объединенную систему ПВО СНГ, в части совершенствования связей взаимодействия и совместного планирования применения национальных систем ПВО.

Предлагаются и другие мероприятия, которые (как и изложенные выше) хотя и являются необходимыми и очень важными, но не исчерпывают всего комплекса проблем построения ЕАРЛС как системы двойного назначения, поскольку не выходят за рамки принципа догоняющей модернизации. Дело в том, что в таких системах радиолокационное и аэронавигационное обеспечение полетов отечественной (государственной, экспериментальной и гражданской) авиации, как и контроль за ИВП, хотя и относится к одной из наиболее важных народно-хозяйственных задач, но с точки зрения национальной обо-

¹⁰² Астапенко Ю.А., Волков С.А., Кубанов Ю.К. РТВ как важнейший компонент ВКО // ВКО. 2010. №4.

роны не является *самой приоритетной* государственной задачей, поскольку ущерб в случае утраты страной собственной обороноспособности может оказаться несоизмеримым с ущербом от несовершенства, например, некоторых элементов ЕС ОрВД. Поэтому если исходить из приоритета национальной обороны относительно других народно-хозяйственных задач, то подход к совершенствованию и развитию ЕАРЛС должен быть принципиально иным.

Возможные варианты подходов, ориентированных не только на восстановление РЛП страны, но и на среднесрочную перспективу с учетом тенденций и перспектив развития СВН ведущих стран НАТО, обсуждаются в соответствующей научной литературе не менее активно, чем рассмотренный выше вариант догоняющей модернизации. Несмотря на различия в деталях, все они сходятся на идее включения ЕАРЛС в информационно-управляющую систему создаваемой ВКО в качестве одной из ее информационных подсистем.

Как известно,¹⁰³ Концепция ВКО Российской Федерации, определившая цель, направления и приоритеты ее создания, была утверждена 5 апреля 2006 года Президентом Российской Федерации. Концепцией предусматривается, что ВКО как комплекс общегосударственных и военных мероприятий, операций и боевых действий войск (сил и средств) **организуется и осуществляется в целях предупреждения о воздушно-космическом нападении противника, его отражения, а также обороны объектов страны, Вооруженных сил и населения от ударов с воздуха и из космоса.** Достижение этих целей обеспечивается решением трех основных оперативных задач ВКО:¹⁰⁴

- постоянное ведение разведки воздушно-космического пространства и контроля состава и состояния группировок СВН противника, своевременное вскрытие подготовки и предупреждение высшего государственного и военного руководства страны о воздушном или воздушно-космическом нападении (ВКН) противника;
- отражение нападения сил и средств ВКН противника и защита группировок вооруженных сил, промышленных районов, административно-политических центров, населения от ударов с воздуха и из космоса;
- нанесение поражения группировкам СВКН, его системе управления и наведения в воздухе и в космическом пространстве в пунктах базирования на земле, море, в воздухе и космосе.

Несложно заметить, что первая из рассмотренных задач ВКО носит явно выраженный информационный характер и предусматривает: а) контроль воздушного и космического пространства; б) оценку характера изменений (наращивания, перестроения) группировки космических аппаратов противника, прогноз и оценку их деятельности и угрозы; в) контроль

¹⁰³ А. Михайлов. Как строить ВКО в современных условиях // ВКО. 2010. № 5. С. 14–25.

¹⁰⁴ А. Михайлов. Как строить ВКО в современных условиях // ВКО. 2010. № 5. С. 14–25.

порядка ИВП, полетов над территорией страны и перелетов государственной границы; г) пресечение нарушений государственной границы РФ в воздушном пространстве; д) контроль состава, состояния и деятельности группировки СВКН в местах базирования, направленности подготовки; е) своевременное вскрытие подготовки и предупреждение высшего государственного и военного руководства страны о воздушном или ВКН, угрозе национальным интересам в космосе; ж) обнаружение СВКН противника во всем диапазоне высот и скоростей их боевого применения и выдача информации предупреждения и целеуказания на активные (огневые) средства.

Очевидно, что реализация этой оперативной информационно-управленческой задачи должна достигаться организацией и несением боевого дежурства по ВКО уже в мирное время. Однако даже на стадии выполнения конкретных шагов по созданию элементов ВКО не только варианты организации и несения боевого дежурства, но и сама целесообразность комплексной защиты государства от всех возможных СВКН определенное время подвергалась сомнениям и даже обструкции. В качестве примера можно привести статью С.М. Нестерова, С.А Волкова с символическим названием «Еще раз о системе ВКО». Как пишут авторы, «выступление генерального конструктора – директора НИЦ системного проектирования ОАО «МАК «Вымпел» С.А. Суханова («ВКО», 2010, № 2) прямо «взорвало» научную общественность и практиков строительства системы ВКО государства. Официальное непризнание курса военно-политического руководства страны на организацию комплексной защиты государства от всех возможных средств СВКН, самой системы ВКО и целесообразности ее создания для России, таких выдающихся конструкторов, каким является директор НИЦ СП ОАО «МАК «Вымпел», по крайней мере, выглядит странно»¹⁰⁵.

Точку в затянувшемся споре поставил Президент Российской Федерации, объявивший в ноябре 2010 года в послании Федеральному собранию о создании системы ВКО. В этом же году им была поставлена задача военному ведомству до 1 декабря 2011 года перевести под управление единого стратегического командования все существующие системы ПВО и ПРО, предупреждения о ракетном нападении и контроля космического пространства. В конце ноября 2011 года командующий Космическими войсками России генерал-лейтенант О. Остапенко заявил, что все необходимые работы по созданию ВКО идут в соответствии с планом. Одновременно он подчеркнул, что «формирование ВКО идет на базе Космических войск» и «те задачи, которые поставлены – создать к исходу 2011 года войска ВКО – будут выполнены»¹⁰⁶.

¹⁰⁵ URL: www.vko.ru

¹⁰⁶ URL: <http://www.timesru.com/russia/2011/4/21/2578/1>

Вместе с тем споры и дискуссии вокруг структуры объединенной ВКО не утихают. Этому есть множество причин политического, экономического, военно-технического, теоретико-методологического и организационного характера. Одна из таких причин связана с тем, что вся методология и идеология построения ВКО разрабатывалась сначала применительно к Войскам ПВО, затем (после их включения в состав Военно-воздушных сил) – применительно к ВВС, а в действительности становление этой системы происходит на базе Космических войск. Весьма показательной в этой связи является статья заместителя директора Института политического и военного анализа А.А. Храмчихина «Воздушно-космическая оборона как возможность». «В декабре прошлого года, – пишет автор, – президент России Дмитрий Медведев поручил объединить до 1 декабря 2011 года все системы противовоздушной и противоракетной обороны, а также системы предупреждения о ракетном нападении под управлением единого стратегического командования. Ответственными за исполнение поручения были назначены премьер-министр России Владимир Путин и министр обороны Анатолий Сердюков. Таким образом, задача получила очень высокий приоритет. Правда, до сих пор не вполне понятно, что имеется в виду и как именно будет реализовываться президентское поручение»¹⁰⁷.

В силу ограниченности предмета нашего исследования спецификой построения и развития ЕАРЛС остановимся только лишь на краткой характеристике информационно-управляющей подсистемы системы ВКО. Здесь можно сослаться на мнение А. Михайлова, изложенное им в приведенной ранее статье «Как строить ВКО в современных условиях», который считает, что основу дежурных сил информационно-управляющей подсистемы ВКО должны составлять средства разведки Генерального штаба, РЛ средства командований ВВС и ПВО (Радиотехнические войска), загоризонтные РЛС, средства РЛ разведки ПВО Сухопутных войск и Военно-морского флота, а также средства радиолокации позиций двойного назначения ЕС ОрВД. В этом случае появляется реальная возможность создания системы разведки и предупреждения о воздушно-космическом нападении (СРиПВКН) ВКО страны, включающей *совокупность развернутых на земле, в воздушном и космическом пространствах объединенных функциональными связями сил и средств, органов управления ими для ведения разведки СВКН противника, достоверного установления факта начала ракетного или воздушного нападения и своевременного предупреждения органов государственного и военного управления.*

Автор справедливо утверждает, что эффективное решение информационно-управляющей задачи ВКО должно достигаться качественным *развити-*

¹⁰⁷ Независимое военное обозрение. URL: http://nvo.ng.ru/concepts/2011-03-04/1_oborona.html

ем СРиПВКН как составной части единой системы ВКО государства при ее полной интеграции в единое **разведывательно-информационное пространство** Вооружённых сил Российской Федерации. При этом текущее состояние системы таково, что объединение разведывательной информации от различных средств разведки воздушно-космического противника на КП ВВС и ПВО позволяет уже сегодня сформировать единое информационно-управляющее пространство ВКО. Это единое пространство может включать:

первый (оперативно-стратегический) эшелон – на основе космических и наземных средств ПРН и радиоразведки Генерального штаба с глубиной разведки до 9 000 км;

второй (оперативный) эшелон – на основе наземных средств системы ПРН, РЛС загоризонтного обнаружения, высокопотенциальных РЛС дальнего обнаружения воздушных целей, средств радиоразведки Генерального штаба с глубиной разведки до 4 500 км;

третий (тактический) эшелон – на основе воздушных и наземных средств радиолокационной, радио- и радиотехнической разведки Генерального штаба, ВВС (Радиотехнических войск), войсковой ПВО, ВМФ и ЕС ОрВД с дальностью действия до 600 км и более. При этом средства разведки тактического эшелона объединяются в единую автоматизированную РЛ систему.

Таким образом, создание единой информационно-управляющей системы ВКО Российской Федерации на основе принципа функциональной интеграции разрозненных космических, воздушных, наземных и морских информационных средств опирается на реально функционирующие информационные подсистемы ВВС и ПВО, СПРН, ПРО, ЕС ОрВД, на широкие информационные возможности глобальных телекоммуникационных сетей военного и гражданского назначения и является делом ближайшей перспективы. Как утверждает А. Михайлов, реализация указанных предложений позволит к 2020 году создать в Российской Федерации, а при необходимости, и над территорией ее союзников эшелонированную систему ПВО и ПРО, а в последующем – единую систему ВКО и обеспечить эффективное ее развитие в будущем¹⁰⁸.

Очевидно, что важное значение в реализации информационных задач в части контроля порядка ИВП и перелета воздушными судами государственной границы РФ в воздушном пространстве, в части разведки и обна-

¹⁰⁸ Михайлов А. «ВКО». 2010. №5. См. также статьи: В. Волковицкого («ВКО». 2009. № 6; 2010. № 1, 2); С. Волкова («ВКО». 2007. № 5; 2008. № 3, 4; 2010. № 4); А. Борзова («ВКО». 2009. № 2); Б. Чельцова («ВКО». 2006. № 2) и др. Научное обоснование взглядов этих авторов является дальнейшим развитием научных подходов к созданию системы ВКО государства в конкретных условиях сегодняшнего дня. Однако в ходе научных дискуссий встречаются и диаметрально противоположные позиции (В. Дворкин. «ВПК» от 2. 03. 2007; С. Суханов. «ВКО». 2010. № 2).

ружения аэродинамических и баллистических целей, выдачи информации оповещения и целеуказания для активных средств ПВО придается ЕАРЛС и ее информационно-технической основе – РЛ системе РТВ.

2.7. ЕАРЛС как конфликтная информационная система с рефлексией

Хотя и с серьезными проблемами, основной из которых является систематическое недофинансирование соответствующих целевых программ, развитие ЕАРЛС продолжается одновременно и в направлении создания новых РЛ позиций двойного назначения, и в направлении автоматизированного объединения в единый поток всей РЛИ о государственной, экспериментальной и гражданской авиации. Это развитие обеспечивается посредством оборудования зональных центров ЕС ОрВД системами информационно-технического взаимодействия с органами управления ВВС и ПВО, включающими комплекс программно-технических средств, абонентское оборудование, а также каналы и средства связи (рис. 2.16). Однако с предстоящей интеграцией ЕАРЛС в информационно-управляющую подсистему ВКО у нее появляются не только новые перспективы, но и некоторые принципиально иные функции. В этой связи задача восстановления, совершенствования и развития ЕАРЛС уже не может опираться на традиционный подход и нуждается в новом методологическом базисе, позволяющем раскрыть все ее потенциальные возможности и скрытые резервы на основе знания ее специфики и внутрисистемных законов.

Как было показано выше, технические системы не возникают произвольно и не функционируют сами по себе. Так или иначе они оказываются вовлеченными в систему *человеческой деятельности* (рис. 1.1) и социальных взаимодействий, опосредствуя их. Возникновение, становление и развитие таких систем подчиняется упоминавшемуся закону *передачи технологической функции от человека техническому средству*, который выступает генеральной линией и локомотивом технического прогресса, накладывая свой отпечаток на внутренние закономерности функционирования технических объектов и систем техники. По этой причине любая техническая система является составной частью, подсистемой системы более высокого порядка, которые, как уже отмечалось, принято называть социальными (целенаправленными). В системотехнике такие системы (то есть системы «человек – техника – среда») иногда называют *эргатическими*. Если целевой функцией системы является обеспечение надсистемы некоторой информацией заданного качества, такая система называется *информацион-*

ной. Если же эта система вовлечена в радиоэлектронный информационный конфликт (конфликтное информационное взаимодействие), то она называется *конфликтной* информационной системой.

Конфликтное информационное взаимодействие радиолокационных средств (информационный радиоэлектронный конфликт) представляет собой процесс борьбы за точность, достоверность, полноту и своевременность информации относительно пространственно-временного положения и функционального состояния своих сил и средств, сил и средств противостоящей стороны, а также о текущих действиях и перспективных намерениях противника. В рамках этого конфликта стороны реализуют самые разнообразные мероприятия по разрушению, скрытию, извлечению, искажению или фальсификации информации, осуществляемые посредством передачи и приема излучений в спектре электромагнитных волн. С этой точки зрения основой информационного обеспечения конфликтного взаимодействия являются радиоэлектронные системы извлечения информации. Их главная задача связана с обеспечением активного вмешательства в поведение противостоящей стороны путем добывания максимально достоверных сведений о текущем состоянии, характере действий и намерениях тех или иных ее элементов (подсистем). Очевидно, что ЕАРЛС является разновидностью именно таких радиоэлектронных систем.

Для эргатических систем характерны четыре вида деятельности, существенно различные по содержанию и форме: 1) операторская (техническая), состоящая в использовании техники в строгом соответствии с априорными правилами (инструкциями) и/или в поддержании ее в рабочем (боеготовом) состоянии; 2) руководящая, связанная с обучением, воспитанием операторов и организацией деятельности по поддержанию техники в рабочем состоянии. Этот вид деятельности характеризуется ответственностью за людей и технику; 3) оперативная, связанная с эффективным использованием людей и техники, постановкой целей, разработкой принципов поведения и способов действий; 4) комбинированная – руководящая оперативная, являющаяся высшей формой оперативной деятельности.

Определяющим фактором в разделении видов деятельности в эргатических конфликтных системах является область распределения инициативы, в рамках которой рассмотренный ранее постулат выбора выдвигается на первый план. Применение этого постулата имеет два аспекта. *Первый* касается стимулирования или подавления свободы выбора. В рамках взаимодействия надсистем «средства ВВС и ПВО» – «СВН противника» свобода выбора противника должна быть подавлена или максимально ограничена в первую очередь необходимым и достаточным потоком энтропии (потоком неопределенности относительно собственных намерений, текущего состояния и поведения). В рамках взаимодействия надсистемы ВВС

и ПВО с ЕАРЛС стимулирование и подавление свободы выбора должно проявляться в диалектическом единстве.

С одной стороны, стимулирование выбора расширяет возможности РЛ системы по отбору целевых функций, компонентов подсистемы управления, свойств и способов взаимосвязи этих компонентов, поскольку правильный выбор целевых ориентиров, как и своевременная их корректировка, является важнейшим условием успешного становления и развития РЛ системы. С другой стороны, конкретное достижение этих ориентиров в реальной боевой обстановке в значительной мере зависит от ограничения форм и способов управления жизнедеятельностью этой системы, высшей и конечной целью которого является достижение наибольшего полезного эффекта при наименьших усилиях и затратах. *Второй* аспект связан с количественным описанием выбора, его формальным представлением, качественной и количественной оценкой и использованием этой оценки в форме некоторого решения, изложенного ранее в подпараграфе 1.3.1.

Помимо рассмотренных ранее существенных свойств (целесообразность, целенаправленность, опосредствованность и преобразовательность) любая деятельность, включая военно-техническую, обладает еще одним важнейшим свойством – свойством **рефлексивной симметрии** (рис. 2.17), то есть наличием в ней двух относительно независимых контуров функционирования: а) контура выполнения тех или иных конкретных действий или операций, направленных на изменение состояния или преобразование внешней среды в соответствии с целевой функцией надсистемы; б) контура осознания, осмысления и целенаправленного совершенствования средств, методов и технологий выполнения этих действий (как и действий противоположной стороны), то есть контур *рефлексии*.

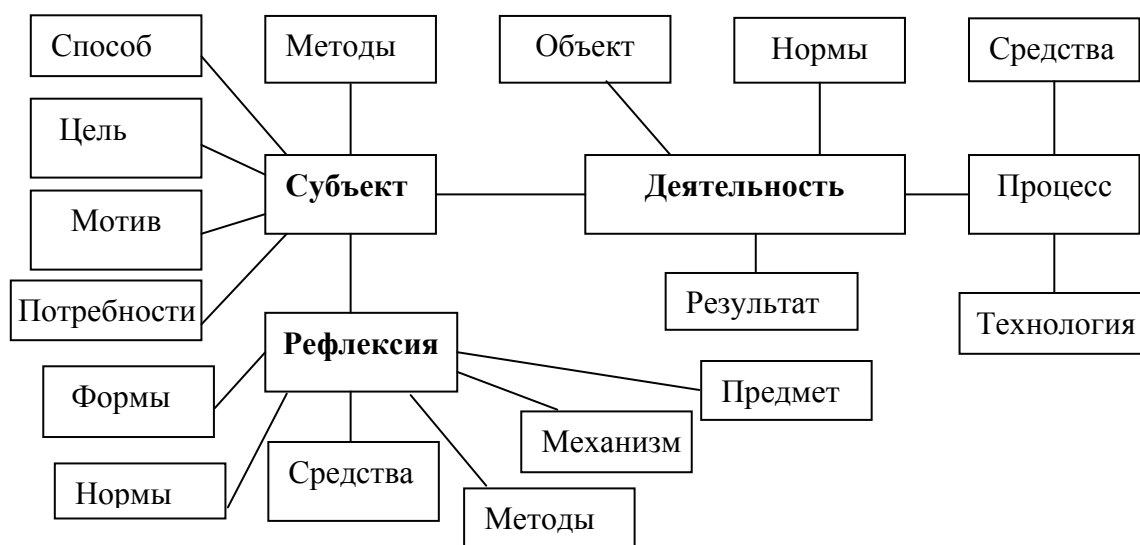


Рис. 2.17. Схема рефлексивной симметрии деятельности

Таким образом, ЕАРЛС является сложной информационной системой с рефлексией. Но поскольку ее информационное взаимодействие с внешней средой (системой РЭБ воздушного противника) носит конфликтный характер, постольку она является конфликтной информационной системой с рефлексией. *Информационное взаимодействие такой системы с внешней средой осуществляется, в первую очередь, в сфере рефлексии.*

В целом информационное противостояние нападающей и обороняющейся сторон связано с целенаправленным воздействием на систему рефлексии противника таким образом, чтобы в наибольшей степени ее исказить, направить по наиболее выгодному для себя варианту развития. Различные варианты построения воздушного удара, гибкая тактика применения сил и средств воздушного нападения, включая ложные цели, различного рода помехи радиоэлектронным средствам и многое другое, является основным средством воздушного противника по манипулированию рефлексией субъектов управления ЕАРЛС и соответственно системой ВВС и ПВО (а в перспективе – системой ВКО).

Участвующие в конфликте надсистемы («средства ВВС и ПВО», с одной стороны, и «СВН противника» – с другой) стремятся нарушить или исключить функционирование противоположной стороны. Под нарушением функционирования обычно понимают снижение уровня показателей эффективности системы до заданного предела, например, уменьшение вероятности поражения самолетов противника, увеличение ущерба от воздушного (для надсистемы ПВО и ВВС) и космического (для ВКО) удара, снижение дальности действия, увеличение ошибок измерения координат объектов и т. п. (для ЕАРЛС).

В силу того, что радиолокационный конфликт в основном происходит в информационной сфере, в качестве ведущего средства манипуляции рефлексивной сферой субъекта противостоящей системы является информация. Последователи А.А. Богданова (упоминавшиеся ранее Бертуланфи, Винер, Нейман и др.), объединив высказанные им идеи в общую теорию систем, одновременно установили, как нужно влиять на «слабейшие (большие) точки» ядра системы, ее подсистем и управляющие связи, чтобы систему сохранить, трансформировать или разрушить. Оказалось, что для разрушения системы, прежде всего, нужны: а) деформация, вплоть до дегградации, целевых функций системы; б) искажение целевых приоритетов; в) разрыв или «переключение» системных управляющих связей; г) обострение внутрисистемных противоречий как в целеполагающем ядре системы, так и между ее ядром и подсистемами; д) перегрузка каналов управления правдоподобной по форме, но ложной по существу информацией о состоянии и намерениях противостоящей стороны; е) создание положительной об-

ратной связи, «автоколебаний» в контуре управления системой с целью «раскачки» ее состояния и вывода за пределы устойчивости.

По форме реализации воздействие на рефлексивную сферу субъекта противостояния совпадает с управлением. По содержанию же оно выступает как изощенный способ манипуляции сознанием и поведением объекта воздействия. Рефлексивное управление (воздействие, манипуляция сознанием противника) принято подразделять на простое и сложное. При *простом* управлении (воздействии, манипуляции) его цели достигаются (в вероятностном смысле) с помощью передачи тем или иным способом информации (фактической, ситуационной или воображаемой) противодействующей системе для побуждения (принуждения) к принятию ею выгодного для воздействующей стороны решения. *Сложное* рефлексивное управление связано с *управлением самой рефлексией*, то есть с воздействием не только на процесс отражения обстановки управляемой системой (средством передачи соответствующей информации или путем непосредственного воздействия), но и на сам процесс моделирования возможных действий и принятия решений. При этом в силу общих закономерностей вооруженной борьбы сторона нападения, при равном исходном уровне информационной неопределенности относительно друг друга, *превосходит обороняющуюся сторону в ранге рефлексии*. Превосходство обусловлено фактором инициативы, возможностью выбора вариантов построения удара и т. д., которыми изначально располагает нападающая сторона относительно обороняющейся, особенно в случае достижения эффекта внезапности.

Здесь важно подчеркнуть, что взаимодействие (противодействие) рассматриваемых подсистем носит трижды опосредствованный характер: а) через систему рефлексии противостоящей стороны (через методы, технологии и средства анализа складывающейся политической, военно-технической, стратегической и тактической ситуации, через методы, технологии и средства принятия решения о характере возможных упреждающих или ответных действий и т. д.); б) через средства радиопротиводействия (средства РЭП и радиотехнической разведки СВН противника); в) через внешнюю среду, которая посредством мешающих отражений, внешних мешающих излучений и нелинейных эффектов среды распространения может оказать серьезное влияние на исход противостояния.

Таким образом, основной целью системы воздушного нападения противника является нанесение максимального ущерба противодействующей стороне, включая ее средства защиты. Основной же целью системы ВВС и ПВО (а в перспективе и ВКО) является минимизация этого ущерба путем максимального ослабления или полного уничтожения сил и средств противника. Поэтому цель, предмет и предполагаемый результат действий воздушного противника и связанные с ними метод, способ, процесс и средства

являются первичными и определяют цель, предмет, предполагаемый результат, а также связанные с ними метод, способ, процесс и средства действий ВВС и ПВО. Следовательно, *закономерности построения ЕАРЛС в конечном счете определяются не только требованиями к боевой и разведывательной информации со стороны огневых средств ПВО (внутренними законами развития системы), но и законами строения, функционирования и развития СВН и тактикой их боевого применения (законами функционирования и развития внешней относительно РЛ системы среды)*. В этом **законе соответствия** находит свое проявление упоминавшийся ранее общий принцип структурной адекватности системы и среды.

В силу информационного характера решаемых задач современная ЕАРЛС в рамках сложившегося информационного конфликта обеспечивает создание в реальном масштабе времени динамической *информационной модели* воздушной обстановки на ТВД, способной обеспечить наиболее полное использование боевых возможностей огневых средств ВВС, ПВО и ВКО при отражении ударов воздушного (воздушно-космического) противника. Однако в силу различного рода стохастических факторов, в первую очередь, целенаправленно создаваемых противником, такая информационная модель в той или иной мере отличается от реально осуществляемой им воздушной операции. Это отличие (своеобразный «зазор» между реальной картиной воздушного налета и ее информационной моделью) в решающей степени определяет успех отражения воздушного удара силами и средствами ВВС, ПВО и ВКО.

Таким образом, основные усилия ЕАРЛС связаны не только с глубоким и всесторонним анализом поступающей информации о противнике и своей авиации с целью максимального приближения создаваемой ею модели воздушного удара к реальным событиям вооруженной борьбы в соответствии с рассмотренным ранее системным принципом структурности, но и с анализом, совершенствованием и развитием собственной структуры, применяемых РЛ средств, а также средств, технологий и методов сбора, обработки и передачи РЛИ на обеспечиваемые КП и огневые средства ПВО.

С целью реализации двуединой функции (информационной и рефлексивной) ЕАРЛС осуществляет разведку воздушного противника в установленных высотных границах на территории Российской Федерации и сопредельных государств. Основными элементами такой системы являются РЛС, действующие в режиме излучения и приема пассивного ответа (эхо-сигнала) объекта. При этом каждая из РЛС, развернутая на конкретной позиции, создает свою *зону обнаружения* Ω_i , представляющую собой *область воздушного пространства, в пределах которой обеспечивается обнаружение воздушных объектов с заданным средним значением ЭПР и получение*

о них информации i -й РЛС с показателями качества, не хуже заданных: для РЛ обнаружения – вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги, для РЛ измерения – дисперсия ошибки измерения координат (рис. 2.18).

В исходном состоянии каждая из РЛС взаимодействует со средой независимо от других. Однако целью элемента любой системы является сохранение устойчивого состояния в течение достаточно продолжительного времени или «выживание», поскольку воздействие со стороны среды носит характер возмущения, выводящего элемент из устойчивого состояния, включая возможный гибельный исход. Поэтому подверженные разрушительному воздействию среды (в рассматриваемом случае – воздействию СВН противника) элементы вынуждены объединяться в систему с целью увеличения вероятности выживания, повышения надежности, устойчивости и т. д.¹⁰⁹

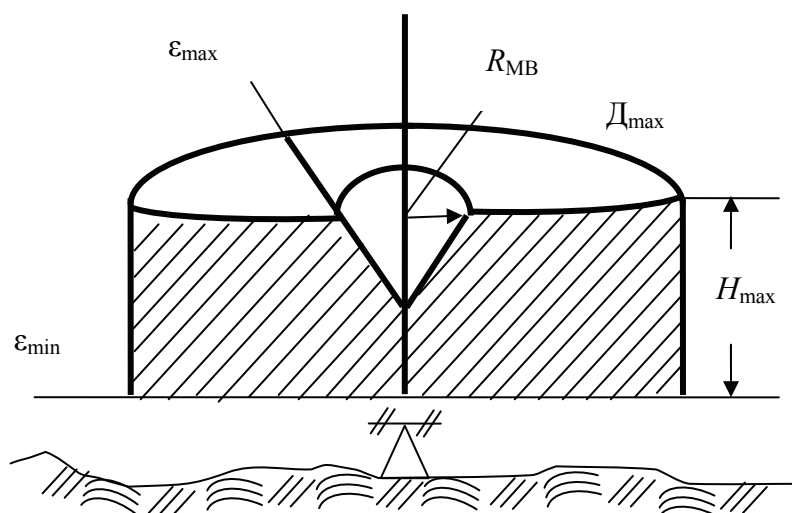


Рис. 2.18. Сечение зоны обнаружения i -й РЛС (РЛК) в вертикальной плоскости: ε_{\max} , ε_{\min} – соответственно максимальный и минимальный углы места; $R_{\text{МВ}}$ – радиус «мёртвой» воронки; D_{\max} – максимальная дальность обнаружения; H_{\max} – максимальная высота («потолок») обнаружения

Совокупность зон обнаружения Ω_i включенных РЛС образует в пространстве требуемое РЛП РЛ системы РТВ $\Omega_{\text{РЛП}}$: $\Omega_{\text{РЛП}} \leq \{\Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3 \dots\}$. Объединение элементов в РЛ систему означает установление связей между ними, которые, в свою очередь, создают потенциальную возможность

¹⁰⁹ Напомним, что ЕАРЛС относится к классу человеко-машинных систем. Поэтому процессы, протекающие в такой системе носят целенаправленный, субъектно-деятельностный характер.

управления, так как обеспечивают, в частности, одновременный требуемый их переход из одной группы состояний в другую. При этом важны именно своевременность, согласованность поведения элементов (компонентов), что позволяет совершать целенаправленные действия, повышающие в конечном итоге устойчивость всей ЕАРЛС¹¹⁰.

Связи в РЛ системе образуют ее структуру, характеристики которой обеспечивают поведение системы как единого целого. Какова структура (способ связи отдельных РЛС, радиотехнических подразделений, радиотехнических частей или группировок РТВ), такова и РЛ система, что было показано ранее на ряде примеров. Главной структурной особенностью, определяющей целостность такой системы, является нелинейность, которая выражается как невозможность линейного представления взаимодействия и взаимосвязи элементов системы: $\zeta(A+B) \neq \zeta(A) + \zeta(B)$, где A, B – элементы системы; $\zeta(x)$ – мера на множестве элементов. **В этом и проявляется ранее упоминавшийся системный (сверхсуммарный) эффект, при котором свойства целого (системы) не сводятся к сумме свойств его элементов.** Первые значительно разнообразнее и богаче вторых. Прирост в качестве происходит за счет соответствующих связей (структуры), изменение качества системы – за счет изменения качества системных связей (ручной, автоматизированный или автоматический съём, обработка и передача РЛИ; узкополосные или широкополосные, проводные, кабельные, оптоволоконные или радио каналы связи и т. д.).

Здесь важно подчеркнуть следующее. *Во-первых*, совместно с другой системной особенностью – иерархичностью структуры – нелинейность придает «усилительный» характер этой структуре, что приводит к таким особенностям сложных систем, как лавинообразность процессов, спонтанность и определенная непредсказуемость поведения (например, за счет огневого подавления части РЛС или РЭП группировки РТВ со стороны противника), наличие скачкообразных переходов, дискретности состояния (так называемые пороговые эффекты), экспоненциального и логарифмического характера зависимости внутренних параметров и состояний, наличие ветвящихся процессов и т. д. *Во-вторых*, элементы за устойчивость в системе «расплачиваются» потерей автономии, то есть приобретают не только «права», но и «обязанности», в связи с чем они дифференцируются, получают сравнительно узкую специализацию (функцию). Применительно к средствам радиолокации специализация проявляется в создании радио-

¹¹⁰ В качестве элемента (в зависимости от «среза» рассмотрения РЛ системы) может выступать: а) отдельная РЛС, если анализу подвергается РЛП рлр; б) отдельные радиотехнические подразделения (рлр, ртб), если анализу подвергается РЛП ртбр (рлп) и т.д. Однако смысл системного подхода, все его принципы и постулаты остаются неизменными на всех уровнях декомпозиции ЕАРЛС.

локационных комплексов (РЛК) и собственно РЛС; в рамках РЛК – в появлении дальномеров и высотномеров; в рамках РЛС – в создании РЛС маловысотного поля, дежурного и боевого режимов, РЛС специального назначения и т. д. Применительно к элементу системы в виде радиолокационной роты (рлр) эта специализация проявляется в формировании: а) отдельных (удаленных) или местных рлр, размещенных при радиотехнических батальонах (ртб), КП ЗРВ или ИА; б) маловысотных рлр или рлр дальнего обнаружения и наведения и т. д.

Понятно, что такая специализация имеет смысл и оказывается эффективной лишь при условии согласованной работы всех этих элементов. Поэтому проблема системной организации вообще и ЕАРЛС в частности носит противоречивый характер: с одной стороны, объединение элементов в систему расширяет возможности системы в целом, но с другой – ограничивает возможности самих элементов. Высокоспециализированная система становится негибкой: будучи устойчивой в стационарных условиях, она теряет способность к изменению и может не суметь адаптироваться к новым, изменившимся условиям среды. Излишняя стабилизация системы, жесткая фиксация ее структуры так же опасны, как и случай полной децентрализации управления. Следовательно, эффективная организация определяется противоречивыми требованиями устойчивости и изменчивости, одинаково необходимыми для выживания РЛ системы в нестационарной среде.

Очевидно, что оптимальное соотношение между этими требованиями, отражаемое в структуре РЛ системы, зависит от степени нестационарности среды. Чем более изменчива, динамична среда, тем более гибкой должна быть структура РЛ системы и, наоборот, постоянство среды приводит к возникновению простейших структур, что можно проследить на РЛ системе ЕС ОрВД.

Рассмотрим пример из опыта боевых действий Войск ПВО Вьетнамской народной армии против авиации ВВС США. В частности, применение в 1965 году ПВО Вьетнама ЗРК против ВВС США оказалось для последних полной неожиданностью. Структура ПВО (внешняя среда для ВВС США) качественно изменилась, в то время как варианты налета этой авиации на объекты удара и тактика ее применения некоторое время оставались неизменными. Отсюда и весьма существенные потери ВВС США в первые дни этого противостояния, цифры которых ранее уже приводились. Простейшие, стационарные структуры воздушных налетов, ориентированные на противодействие лишь со стороны зенитной (ствольной) артиллерии, оказались неэффективными в условиях действия современной ПВО.

В последующих хорошо спланированных и организованных ответных действиях авиация США предприняла массированный налет на пози-

ции ЗРВ. В ходе удара были выведены из строя или уничтожены четыре технических дивизиона, размещенных стационарно. При этом ни один огневой дивизион не пострадал, поскольку за несколько часов до удара они, по различным причинам, сменили позиции. Гибкость структуры огневых средств ПВО позволила избежать более тяжелых потерь. Однако общая боеспособность группировки ПВО была почти на сутки утрачена из-за стационарного характера обеспечивающей (технической) подсистемы, оказавшейся «болевым» точкой (слабейшим звеном) группировки.

На конкретных примерах применения методологии системного подхода к проблеме построения модели ЕАРЛС (в данном случае – системотехники *первого уровня концептуализации* – см. параграф 1.1) можно создать целостное представление о технологии реализации изложенного ранее **принципа моделируемости**, то есть представление о том, каким образом некоторая сложная система: *а) может быть представлена конечным множеством частных моделей, каждая из которых отражает определенную грань ее сущности, и б) каким образом некоторое множество независимых элементов превращается в систему*, то есть приобретает системное качество.

В то же время даже предварительный анализ структуры и основных параметров РЛП как основной формы материализации ЕАРЛС в условиях противовоздушного боя указывает на сложность решения этой задачи, аналитический вариант которой еще ждет своей разработки. Это связано со следующим:

1. ЕАРЛС состоит из огромного количества разнообразных элементов (РЛС) со своими связями и многообразными видами взаимодействий.
2. Прием и обработка РЛ сигналов и измерение их параметров производится, как правило, на фоне различных помех и носит случайный характер.
3. Воздушная и помеховая обстановка из-за неизвестности замысла противника характеризуется высокой степенью априорной неопределенности.
4. Пространственная и временная модуляция помех и сигналов из-за влияния многочисленных нестационарных и стохастических факторов является нестационарной.
5. Изменения функциональных связей между элементами системы из-за технических неисправностей РЛС и огневого воздействия противника не поддаются удовлетворительному прогнозу и строгой оценке.

Таким образом, в силу значительной внутренней сложности, конфликтного характера взаимодействия с внешней средой и существенного влияния на это взаимодействие случайных факторов ЕАРЛС должна рассматриваться как сложная (неравновесная, нелинейная), конфликтная ин-

формационная система с рефлексией. От степени соответствия информационной модели целевой и помеховой обстановки реальному воздушному удару, глубины рефлексии действий воздушного противника, масштаба и обоснованности результатов этой рефлексии в решающей степени зависит выполнение ЕАРЛС своей целевой (информационной) функции. Поэтому модель радиолокационной ЕАРЛС как некоторой целенаправленной системы должна быть иерархической по структуре и развивающейся по функциям. В то же время для целенаправленной системы крайне важно обеспечить заданный уровень эффективности в критических боевых ситуациях при минимальных затратах на ее создание, поддержание в боеготовом состоянии и развитие. Здесь возникает стохастическая задача многофакторного исследования эффективности и параметров качества ЕАРЛС.

2.8. Показатели качества и критерии эффективности ЕАРЛС

Как отмечалось ранее, ЕАРЛС относится к классу сложных целенаправленных систем, объективной мерой целенаправленности которых является *эффективность*. Она определяет существование, перспективу и место системы в надсистеме и объединяет качество системы (степень ее полезности для надсистемы), расход ресурса и время действия. В силу своей внутренней противоречивости, связанной с необходимостью учета свойств не только системы, но и надсистемы, более или менее строгое определение понятия эффективности встречает значительные теоретические трудности.

К настоящему времени в теории эффективности сложных систем сформировались три относительно самостоятельных подхода. *Первый* характеризуется функциональным отношением к обоснованию эффективности и способам ее оценки. Оцениваемая система рассматривается с точки зрения надсистемы, а под эффективностью системы понимается то количественно выраженное положительное влияние, которое система оказывает на функционирование надсистемы. Соответственно показатели качества системы, критерий и мера ее эффективности носят функциональный характер. Конкретное содержание оцениваемой системы отходит на второй план, уступая первенство способу оценки вклада системы в деятельность надсистемы.

Второй подход исходит из возможности введения физически измеряемого критерия эффективности. Предполагается, что поскольку взаимодействие между подсистемами внутри системы, а также системы с надсистемой имеет физическую природу и, следовательно, практически субъект

деятельности имеет дело с физическими величинами, то и понятие эффективности не может не иметь конкретного физического содержания. Задача теории эффективности состоит в обосновании способа обобщения всех факторов взаимодействия с целью образования (путем последовательной декомпозиции) единой физической величины, которая и называется критерием эффективности. Очевидно, что первый подход связан с функциональным описанием модели, а второй – с морфологическим.

Обоим подходам присущ общий недостаток – фрагментарность, поскольку главная часть задачи передается в другую инстанцию в предположении, что эта другая инстанция обладает большей информированностью (первый подход) либо большей компетентностью (второй подход). В то же время проблема оценки эффективности сложной системы не является чем-то внешним по отношению к ней, а представляет собой проблему исследования самой сложной системы и не может рассматриваться ни как внешняя (надпроблема, связанная с деятельностью надсистемы), ни как внутренняя (подпроблема, определяемая одним из аспектов деятельности системы) по отношению к системе. Поэтому узость (неполнота) исходной постановки проблемы эффективности не имеет под собой гносеологических оснований, а вытекает только из стремления исследователя к упрощению, наглядности и привычности описания решаемой системной задачи.

Сущность третьего подхода состоит в построении модели эффективности, включающей как систему, так и надсистему. При этом физический критерий выбирается так, чтобы он был одновременно и функциональным (то есть учитывал вклад системы в деятельность надсистемы).

Следует подчеркнуть, что функциональные критерии эффективности и соответствующие им показатели качества могут носить нормативный (детерминированный) либо статистический (вероятностный) характер. К первым можно отнести, например, допустимый процент снижения боеготовности фрагмента ЕАРЛС после отражения воздушного удара с параметрами, близкими к прогнозируемым, коэффициент использования боевых возможностей ЗРК в условиях воздушного налета высокой плотности и т. д. Ко вторым – математическое ожидание успеха (например, математическое ожидание размера предотвращенного ущерба, который может быть нанесен обороняемым объектам в процессе воздушного удара противника), вероятность достижения цели или решения некоторой системной задачи и др. В наиболее общем виде эффективность той или иной РЛ системы вводится при помощи следующих показателей качества.

Физические: 1. Для отдельной РЛС как некоторой технической подсистемы РЛ системы: а) размеры и форма зоны обнаружения по дальности, азимуту и углу места; б) передающий потенциал (средняя мощность зондирующего сигнала с учетом свойств направленности передающей антен-

ны); в) приемный потенциал (предельная чувствительность РЛ приемника); г) разрешающая способность по основным параметрам и некоторые др. 2. Для РЛ системы как некоторой совокупности РЛС: а) размеры и форма РЛП; б) энергетический потенциал; в) информационный потенциал, помехоустойчивость и т. д.

Функциональные: 1. Для отдельной РЛС: а) параметры зоны обнаружения с учетом целевого (функционального) предназначения РЛС (например, дежурного или боевого режимов, маловысотного поля или дальнего обнаружения и т. д.); б) количество автоматически сопровождаемых целей; в) точностные характеристики, помехозащищенность РЛС и т. д. 2. Для РЛ системы: а) размеры, форма и параметры РЛП в пространстве возможных параметров движения целей; б) пропускная способность (предельное количество обслуживаемых целей); в) полнота, достоверность и точность создаваемой РЛ системой информационной модели воздушной обстановки; г) помехоустойчивость, живучесть, мобильность и т. д.

Эффект действия РЛ системы может определяться такой физической характеристикой, как время обслуживания цели (время определения траектории движения с заданной точностью), либо плотностью потока целей (при заданном законе распределения целей во времени и пространстве), при которой их обслуживание безотказно. *Эффективность РЛ системы* определяется количеством обслуженных целей в течение оперативно обоснованного интервала времени при наличии энергетическом, эксплуатационном и людском ресурсе.

Поскольку эффективность РЛ системы существенно зависит не только от внутренних параметров, но и от параметров обстановки (варианта построения воздушного удара, типов и характера пространственно-временного распределения целей и помех, тактики огневого воздействия на РЛ средства и др.), постольку ее числовое значение имеет ограниченное применение. Иногда эффективность РЛ системы характеризуют широкими качественными категориями: «весьма высокая», «высокая», «не очень высокая», «низкая», «очень низкая».

Если критерии эффективности подсистем взаимно стимулирующие – система супераддитивна, если согласованы – система аддитивна, если противоречивы – система субаддитивна. Зависимость эффективности системы от числа подсистем может быть с одним максимумом либо многоэкстремальной. Характер этой зависимости в основном определяется степенью сложности строения (морфологии) системы. При этом подсистемы сложной (неравновесной или диффузной) системы *не могут одновременно иметь экстремумы целевых функций, так как достижение экстремальных значений переменных одной подсистемы выводит за допустимые пределы переменные другой подсистемы*. В целом невозможно достичь гло-

бального экстремума целевой функции всей неравновесной системы, так как это нарушает нормальное функционирование ее подсистем.

Таким образом, эффективность произвольной РЛ системы есть физически измеряемая положительная характеристика целенаправленной деятельности этой системы на заданном интервале времени, учитывающая расход ресурса. Критерий эффективности определяется диалектическим единством целевых функций самой РЛ системы и надсистемы.

Специфика ЕАРЛС состоит в том, что она уже существует, а для оценки ее эффективности в военной науке сложилась определенная методика качественного анализа, которая в течение длительного времени обеспечивала удовлетворительные результаты. В рамках этой методики целевая функция «идеальной» ЕАРЛС по добыванию РЛИ формулируется как *максимально полное, безошибочное и точное отображение и прогнозирование трасс воздушных объектов и выявление их признаков (принадлежности, класса, количества в группе и др.) в реальном масштабе времени*. Соответственно к основным функциональным показателям качества РЛ системы (которые одновременно являются и информационными) относят (рассмотренные в подпараграфе 1.3.4) *полноту и достоверность отображения воздушной обстановки, точность отображения трасс, условные показатели качества соответствующей некоординатной информации* и др.

Многомерный параметрический критерий $\{\mu, \chi, \sigma_{xy}\}$ нагляден, а требования к его составляющим достаточно просто обосновываются: $\mu \geq 0,9$; $\chi \leq 0,1$; $\sigma_{xy} \cong 10^2 \dots 10^3$ м.

Вместе с тем, если сравнить этот многомерный параметрический критерий с приведенным выше определением эффективности сложной системы, можно прийти к выводу, что он носит явно выраженный односторонний характер. Помимо его ориентации на заданную (априори известную) модель воздушной обстановки (например, модели воздушного удара), что в реальной практике, как правило, не соответствует действительности, этот критерий не учитывает такой важнейший компонент анализа эффективности системы, как ее наличный ресурс. Поэтому он оказывается не приспособленным к количественному многофакторному анализу не только информационных возможностей ЕАРЛС, но и вещественно-энергетических, материально-технических, финансовых и кадровых затрат государства на ее создание и поддержание в боеготовом состоянии.

За пределами этого параметрического критерия остается и достоверная оценка важнейших характеристик конфликтного информационного взаимодействия ЕАРЛС и СВН противника, каковыми являются интенсивность и специфика обмена этих систем *потоками энтропии* (потоками информационной неопределенности относительно собственного состояния и поведения). Отсутствие же адекватной параметрической модели РЛ сис-

темы не позволяет проводить достоверный анализ ее эффективности и проводить разработку научно обоснованных рекомендаций по обеспечению ее устойчивого функционирования, совершенствования и развития. Поэтому проблема выбора и формализации критерия эффективности и разработки математической модели ЕАРЛС является весьма актуальной.

2.9. Информационная и статистическая модели радиолокационной системы

Как было показано в предыдущих параграфах, эффективная организация, обеспечивающая выживание РЛ системы в условиях конфликтного взаимодействия со средой, определяется противоречивыми требованиями устойчивости и изменчивости. Оптимальное соотношение между этими требованиями, отражаемое в структуре РЛ системы, зависит от степени нестационарности среды и характера взаимодействия системы со средой. Чем более изменчива, динамична среда и чем более случайный, неопределенный и антагонистичный характер носит рассматриваемое взаимодействие, тем более гибкой и в то же время прочной (устойчивой) должна быть структура РЛ системы. Поэтому статистическая модель такой системы в попытке отразить с ее помощью и случайные параметры среды, и случайные параметры РЛ системы с максимальной точностью оказывается функцией множества стохастических переменных. Это основная трудность в разработке адекватной статистической модели РЛ системы, которая, на первый взгляд, не имеет приемлемого решения по причине своей многомерности.

Выход из методологического тупика связан с тем, что на самом деле внешняя среда, определяющая структуру и пространство решений ЕАРЛС, сколько бы случайной она ни была, обладает определенными закономерностями (на языке синергетики – обладает избыточностью). Наличие некоторой избыточности (определенных закономерностей) в поведении внешней среды (в рассматриваемом случае – СВН противника) позволяет достаточно сложной системе устойчиво функционировать в данной среде, выжить, благодаря обнаружению и использованию этих закономерностей.

Избыточность среды, отражающая ее инвариантные характеристики, так же важна для устойчивости системы, как и ее собственная избыточность (внутренние закономерности системы). Поэтому разработка статистической модели ЕАРЛС связана с решением не только многофакторных задач в рамках одного качества, как на это неоднократно указывалось ранее, но и с решением задач в рамках различных качественных состояний:

а) с установлением количественных соотношений между избыточностью среды и способностью системы к выживанию в этой среде и б) с установлением параметрической зависимости между функциональной (информационной) эффективностью РЛ системы и затратами ресурсов надсистемы на ее функционирование. В первом случае речь идет о разработке **информационной (системно-кибернетической) модели**, то есть модели, отражающей специфику взаимодействия ЕАРЛС и воздушного противника на уровне потоков информационной неопределенности. Во втором случае речь идет о разработке **статистической модели**, отражающей специфику энергоинформационного взаимодействия ЕАРЛС с надсистемой и средой, то есть зависимость между ее функциональной эффективностью и основными параметрами внешней среды, а также собственными параметрами системы и надсистемы.

С целью упрощения задачи разработки соответствующей модели, ограничимся рассмотрением одной из подсистем ЕАРЛС – радиолокационной системы РТВ. Очевидно, что полученные здесь результаты могут быть распространены и на ЕАРЛС в целом.

Рассматривая внешнюю среду РЛ системы как неотъемлемый компонент поставленной аналитической задачи, необходимо подчеркнуть, что физической внешней средой РЛ системы РТВ является приземное (воздушное) пространство, в котором в соответствии с неизвестным для Войск ПВО замыслом противника находятся СВН и ложные объекты, противостоящие им самолеты истребительной авиации и ВВС Вооруженных сил России, зенитные ракеты ЗРК на маршрутах подлета к СВН противника, распространяются радиоволны, обеспечивающие локацию объектов, наведение ракет, передачу информации внутри системы, а также источники помехового фона: пассивно переизлучающие отражатели (неоднородности среды распространения), источники посторонних (мешающих) излучений и объекты, обладающие поражающим действием на элементы РЛ системы как естественного происхождения, так и создаваемые противником.

Описание внешней среды включает в себя системные характеристики варианта воздушного удара, индивидуальные характеристики объектов локации, источников помех, общее (интегральное) описание ожидаемой воздушной и помеховой обстановки и среды распространения радиоволн для отдельной РЛС (подразделений) и для группировки РТВ, а также системные характеристики информационных и огневых сил и средств ПВО, охваченных всеми видами взаимодействия со средой. Это описание характеризуется различной степенью априорной неопределенности, которое относительно среды (воздушного противника) в поставленной задаче необходимо минимизировать, а относительно своих сил и средств – максимизировать.

Информационная модель РЛ системы РТВ.

Рассмотрим среду и систему как носителей соответственно разнообразия возмущающих воздействий со стороны среды и рационального принятия решений со стороны системы. Взаимодействие системы и среды представляет ситуацию антагонистического конфликта, в котором система стремится сохранить устойчивость (постоянство внутренней среды) в обстановке разнообразия возмущающих воздействий, угрожающих целостности системы. С этой точки зрения РЛ система РТВ может рассматриваться как система с самоуправлением, которая в соответствии с тем или иным вариантом поведения воздушного противника вырабатывает сигналы управления своими подсистемами и собственным поведением в целом. Обеспечивая такое поведение РЛ системы, которое позволяет избегать угрожающих воздействий противника, эти сигналы уменьшают, в частности, разнообразие внешних возмущений до безопасной величины.

В рамках стохастического характера решаемой задачи естественно допустить, что воздействия воздушного противника на РЛ систему РТВ носят случайный характер, в силу чего его поведение можно описывать распределением $p(x)$ внешних возмущений x . Очевидно, что в качестве меры разнообразия воздействий противника на РЛ систему (возмущений среды) выступает энтропия этого распределения, определяемая известным соотношением Шеннона: $H(x) = -\sum p(x) \ln p(x)$.

Здесь важно подчеркнуть, что энтропийный критерий разнообразия является более общим по отношению к дисперсии σ_{xy} многомерного параметрического критерия $\{\mu, \chi, \sigma_{xy}\}$, так как он зависит в явном виде только от вероятности случайных исходов, а дисперсия – от распределения значений случайной величины (функции исходов).

Пусть некоторое управляющее воздействие РЛ системы y , нейтрализуя угрожающие воздействия противника, уменьшает разнообразие внешних возмущений, действующих на систему, до величины, измеряемой условной энтропией:

$$H(x|y) = -\sum p(x|y) \ln p(x, y) \leq H(x),$$

где $p(x|y)$ – распределение внешних возмущений при наличии управляющих воздействий.

Тогда в качестве меры «количества» этого управления, вносимого в РЛ систему для обеспечения ее устойчивого функционирования, естественно принять степень уменьшения разнообразия действий (степень уменьшения потока энтропии) со стороны противника: $W = H(x) - H(y)$.

В рамках информационного подхода величину W можно трактовать как *пропускную способность* РЛ системы РТВ, определяющую ее возможности по обработке соответствующей информации и своевременному выбору адекватного решения по уменьшению потока энтропии¹¹¹. Тогда $H(x|y)$ будет представлять собой остаточное разнообразие действий противника при некотором априорном разнообразии $H(x)$ и пропускной способности системы W . Переписав представленное выше выражение следующим образом: $H(x|y) = H(x) - W$, получаем меру эффективности (качества управления) РЛ системы, характеризующую предельные возможности этой системы по уменьшению разнообразия воздействий (уменьшению потока энтропии) со стороны противника. Отсюда следует, что оптимальный выбор вариантов поведения РЛ системы, наиболее эффективно уменьшающих разнообразие действий противника до малой величины $H(x|y)$ и обеспечивающих тем самым собственное устойчивое функционирование, определяется *величиной ее пропускной способности W и априорным разнообразием поведения противника $H(x)$* . Очевидно, что *увеличение пропускной способности РЛ системы позволяет снизить требования к объему априорных сведений о противнике, а наличие исчерпывающей информации о последнем позволяет снизить пропускную способность РЛ системы РТВ*.

Так как в реальной ситуации всегда имеются физические, научно-технические, ресурсные и другие ограничения на пропускную способность W , то возможности РЛ системы по успешному «самоуправлению» в условиях обмена с противником потоками энтропии (потоками информационной неопределенности) оказываются ограниченными. Очевидно, что оценка этих возможностей может быть произведена одним из изложенных ранее методов исследования операций, если рассматривать процесс самоуправления РЛ системы (процесс минимизации потока энтропии) как естественный процесс поиска наиболее эффективного решения в определенном пространстве возможных решений, размеры которого зависят от разнообразия действий противника. Таким образом, *при фиксированной пропускной способности РЛ системы W уменьшение остаточного разнообразия $H(x|y)$, обеспечивающее ее устойчивость, может происходить только за счет обнаружения определенных закономерностей в разнообразии действий противника, позволяющих уменьшить априорное разнообразие $H(x)$* .

¹¹¹ В общем плане пропускная способность системы характеризует скорость совершения каких-либо действий с информацией. Под пропускной способностью РЛ системы РТВ будем понимать скорость приема, обработки, отождествления, хранения (отображения) и передачи боевой и разведывательной информации на разведывательно-информационный центр КП соединений (объединений) ПВО и на КП частей ЗРВ и ИА.

В реальной воздушной обстановке предварительная оценка разнообразия среды $H(x)$ может быть слишком высокой. Может сложиться впечатление, что эффективное управление системой в таких условиях невозможно. Как писал по этому поводу У. Эшби, «...дальнейшее исследование среды может, однако, показать, что составляющие не являются независимыми, что существует ограничение разнообразия и что действительное разнообразие возмущений среды значительно ниже первой нашей оценки. Мы можем обнаружить, что при данной пропускной способности регулятора это меньшее разнообразие может быть регулируемо и что осуществимо полное регулирование и управление в системе. Таким образом, открытие ограничений разнообразия может превратить ситуацию «регулирование невозможно» в ситуацию «регулирование возможно». Если пропускная способность регулятора фиксирована, то это – единственный путь»¹¹².

Последнее обстоятельство (каким бы оно парадоксальным не представлялось) лишний раз указывает на приоритетность (первичность) задач, решаемых РЛ системой РТВ, относительно задач, решаемых огневыми средствами ПВО (ЗРВ и ИА), поскольку она является тем самым регулятором, пропускной способностью которого ограничивается общая эффективность всей системы ПВО. В соответствии с приведенной выше системной терминологией подобный регулятор *является слабой (болевой) точкой ядра системы ПВО*.

Ограничения разнообразия действий противника обычно выступают в виде инвариантов, то есть определенных закономерностей, сужающих область вариантов его поведения, что принципиально облегчает поиск соответствующих решений. Использование этих инвариантов позволяет сократить пространство этих решений, а тем самым и время их поиска, например, путем сведения исходной задачи к задаче меньшей размерности. Наконец, такие проявления ограничений разнообразия (то есть структурной избыточности противника), как корреляция между параметрами, изотропность во времени или воспроизводимость пространственно-временной структуры того или иного воздушного удара, приводят к возможности учета прошлого опыта, то есть к такому важнейшему способу использования избыточности, как *обучение РЛ системы РТВ*.

Полученная выше энтропийная мера $H(x|y) = H(x) - W$ позволяет произвести оценку эффективности поведения РЛ системы РТВ в различных условиях априорной неопределенности относительно действий противника. При этом основная трудность такой оценки связана с выявлением закона распределения событий x , поскольку объем статистических данных,

¹¹² Эшби У.Р. Введение в кибернетику. М. : Изд-во иностранной литературы, 1959. С. 349.

удовлетворительным образом отражающий характер возможного поведения воздушного противника при очередном ударе, все еще недостаточен. Поэтому здесь пока допустим произвол в выборе такого закона распределения.

В то же время в процессе разработки и оценки эффективности сложных систем возникает необходимость их сравнения не только по эффективности, но и по уровню структурной организации (по уровню структурности, сложности) в одних и тех же условиях априорной неопределенности. При этом оказалось, что избыточность как раз и представляет собой меру структурной организации (меру структурности, сложности) этих систем.

Понятие избыточности как относительной меры структурности того или иного множества (применительно к информационному сообщению) было введено Шенноном. Оно представляется следующим эмпирическим соотношением:

$$R = 1 - \frac{H}{H_{\max}},$$

где $H = -\sum_i p_i \ln p_i$ – энтропия заданного множества сообщений; p_i – вероятность i -го состояния сообщения, $i = 1, 2 \dots$; H_{\max} – максимально возможная энтропия, характеризующая «бесструктурное» множество данной совокупности сообщений.

В общесистемном плане избыточность есть отражение ограничений, накладываемых структурой на множество возможных состояний совокупности элементов, объединенных в систему. Эти ограничения «могут носить самый различный характер: от гвоздей, скрепляющих скамейку и исключаящих тем самым другое положение досок, до законов природы, ограничивающих, например, возможные положения небесных тел при исследовании их движения»¹¹³. Значение как самого понятия избыточности, так и его формального представления состоит в том, что оно позволяет подойти с количественной точки зрения к трудно формализуемым качественным понятиям и в наибольшей степени приспособлено к описанию порядка. Дело в том, что структурные связи, обеспечивающие нужную организацию сложной системы, выступают при этом в роли избыточности, повышающей надежность функционирования этой системы. Другими словами, порядок, чем бы он ни был, в основе своей представляет избыточность структуры. Система в такой же степени стабильна, в какой она

¹¹³ Яблонский А.И. Модели и методы исследования науки. – М. : Эдиториал УРСС, 2001. – С. 322.

является избыточной. Только за счет избыточности системы можно получить ее надежность.

Представляя собой меру структурной организации (меру избыточности сложных систем), данное выражение удовлетворяет естественным физическим требованиям, которым должна удовлетворять подобная мера. В случае максимального беспорядка (бесструктурности) энтропия системы максимальна ($H = H_{\max}$), значение $R = 0$ независимо от «абсолютной» меры беспорядка H_{\max} . И, наоборот, в случае максимального порядка (энтропия системы минимальна, то есть $H = 0$) мера избыточности равна единице. Относительный характер меры позволяет сравнить по степени организации системы с разными значениями H_{\max} , что было бы невозможно при измерении структуры абсолютными значениями энтропии.

Конкретизируем задачу. Пусть некоторая совокупность возможных вариантов поведения воздушного противника задает множество из n возможных состояний РЛ системы РТВ, а ее внутренняя структурная организация выступает в виде вероятностной меры, определенной на этом множестве. Тогда энтропия РЛ системы определяется величиной

$$H_{\text{РЛсист}} = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i,$$

где p_i – вероятность i -го состояния. Очевидно, что максимальная неопределенность поведения РЛ системы возникает при равновероятных возможностях ее нахождения в любом из n состояний (при равновероятных вариантах действий противника), то есть максимальная энтропия имеет место, если все $p_i = 1/n$, $i = 1, 2, \dots, n$. Поэтому

$$H_{\max \text{ РЛсист}} = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \ln \frac{1}{n} = \ln n,$$

где $n \geq 1$. Отсюда выражение для меры системной организации РЛ системы РТВ имеет вид:

$$R_{\text{РЛсист}} = 1 - \left(- \sum_{i=1}^n p_i \frac{\ln p_i}{\ln n} \right). \quad (2.1)$$

Эмпирическое соотношение (2.1) представляет собой энтропийную модель РЛ системы РТВ. Оно позволяет проводить сопоставительный анализ по уровню системной организованности различных вариантов РЛ систем при одних и тех же вариантах поведения противника либо проводить

оценку степени системной организованности (устойчивости к внешним потокам энтропии) одной и той же модели РЛ системы при различных вариантах поведения противника.

Статистическая модель РЛ системы РТВ.

Сложность вывода адекватной статистической модели РЛ системы РТВ связана с необходимостью учета множества противоречивых, часто взаимоисключающих, параметров, описывающих как состояние противника и надсистемы (то есть системы ПВО), так и состояние самой РЛ системы. На первый взгляд удовлетворительное решение такой задачи невозможно и анализ эффективности РЛ системы все-таки следует проводить в соответствии с приведенным ранее векторным параметрическим критерием $\{\mu, \chi, \sigma_{xy}\}$. Однако при более детальном изучении выясняется, что (как и в случае с информационной моделью) степень априорной неопределенности этой задачи не является столь высокой, чтобы препятствовать созданию адекватной статистической модели РЛ системы. Это связано с объективными свойствами среды любой физической природы.

В частности, важнейшей структурной особенностью среды является возможность ее разложения на относительно независимые подсистемы. Это свойство «разложимости» означает, что параметры, которые считались связанными, могут быть преобразованы в относительно независимые, что позволяет путем декомпозиции разделить совокупность параметров на сравнительно независимые группы и свести многомерную задачу к набору задач меньшей размерности. Например, в линейной адаптивной антенной решетке, содержащей m слабонаправленных элементов, для эффективной компенсации активных помех от N внешних источников (как правило, $m > N$) необходимо выполнить Nm^2 операций вычисления элементов матрицы, обратной корреляционной матрице помех. Если же для каждого источника помех выделить остро направленный компенсационный канал, то число векторно-матричных операций уменьшится до NN^2 . Иными словами, m^2 -мерная задача оказалась сведенной к задаче размера N^2 . Подобным образом n -мерная задача описания воздушного удара может быть сведена к n -одномерным задачам описания действий каждой из групп СВН целостного воздушного удара.

Возможность раздельного принятия решений по независимым группам событий воздушного удара является существенным ограничением на возможные значения параметров, описывающих эти события, что *позволяет адекватным образом ориентироваться в боевой обстановке*, обладающей на первый взгляд бесконечной сложностью. В математическом плане свойство разложимости означает, что соответствующая функция, описывающая «поведение» противника или своей надсистемы (системы ПВО), может быть представлена как суперпозиция функций от меньшего

числа переменных, в простейшем случае как аддитивная функция. Объяснение этой парадоксальной «милости» со стороны объективного мира заключается в том, что РЛ система РТВ, возникающая как «отклик» на ту или иную внешнюю среду, отражает в своей структуре избыточность структуры противника, а в своем поведении – его закономерности.

Так, элементы каждой подсистемы РЛ системы сильно связаны друг с другом, а по отношению к другим подсистемам и к противнику выступают как независимое целое. Обобщением этого свойства является иерархичность РЛ системы, сочетающая «разложимость» системы на отдельные уровни и отношение ранговой упорядоченности между этими уровнями. Иерархичность структуры обеспечивает необходимое информационное взаимодействие и управление при ограниченной пропускной способности элементов системы. На высшие уровни поступает лишь часть информации, достаточная для эффективного принятия общих решений, с передачей детализации на низшие уровни. Такой интегрально-дифференциальный характер взаимодействия элементов, связанных в иерархическую структуру, сочетает в себе целостность всей системы с относительной автономией отдельных уровней, что позволяет системе использовать преимущества как централизации, так и децентрализации в процессе самоорганизации и самоуправления.

Таким образом, рассмотренные структурные особенности РЛ системы и противника имеют принципиальное значение для возможности системы выжить в складывающейся обстановке. Без структурной избыточности воздушного противника (внешней среды) РЛ система не смогла бы приспособиться к ней, а без достаточно сложной собственной организации она не смогла бы извлечь и использовать эту избыточность. Открытие инвариантных соотношений и организация поиска решений в соответствии со структурной организацией воздушного противника или, иными словами, извлечение и использование системой избыточности внешней среды (возможные, конечно, лишь при достаточной адекватности их структур) позволяют РЛ системе определить рациональную линию своего поведения при ограниченной пропускной способности. И хотя разные РЛ системы по-разному извлекают избыточность, но для любого варианта их построения этот процесс является необходимым условием устойчивого функционирования.

Извлечение и использование избыточности на информационном уровне становится возможным вследствие «встроенных» в РЛ системы (и в целом в системы ПВО) некоторых аналогов внешнего мира (аналогов вариантов поведения противника) не только в виде физических структур, но и в запрограммированном виде соответствующих алгоритмов принятия решений, управления, построения моделей поведения противника и собственной системы.

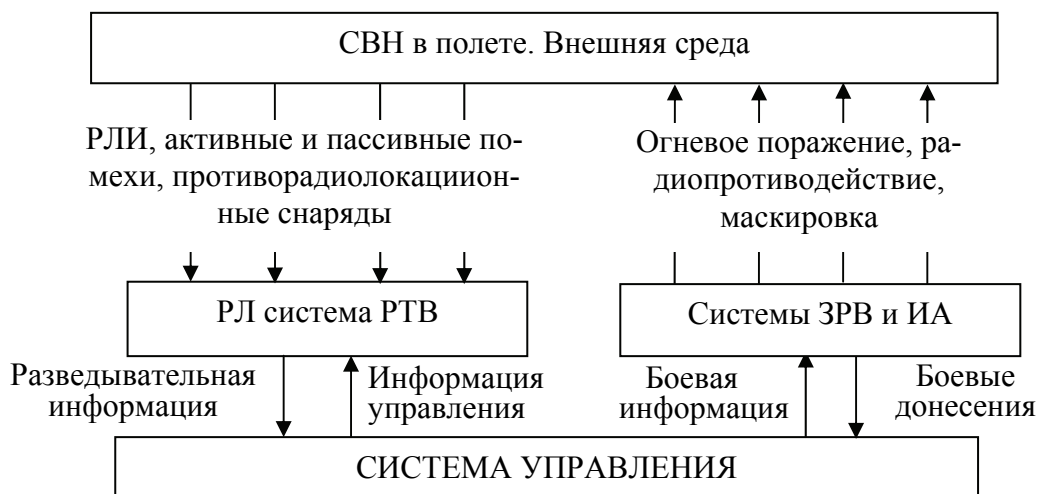


Рис. 2.19. Схема абстрактной системы ПВО

Получим аналитическое выражение, позволяющее проводить количественный многофакторный анализ эффективности системы ПВО и РЛ системы РТВ¹¹⁴. Очевидно, что здесь можно выделить информационные задачи, решаемые РЛ системой РТВ, и боевые задачи, решаемые огневыми средствами системы ПВО на основе полученной от РТВ разведывательной и боевой информации. С этой целью рассмотрим некоторую абстрактную систему ПВО (рис. 2.19), содержащую l огневых подсистем (зенитно-ракетных и истребительно-авиационных полков и бригад), и некоторую подсистему управления. Обобщенный эффект от ее использования будем исчислять посредством размера предотвращенного ущерба, который может быть нанесен обороняемым объектам со стороны противника в процессе воздушного удара.

Вначале рассмотрим специфику аналитического описания РЛ системы. Такие системы принято характеризовать полнотой и точностью создаваемой ими модели воздушной обстановки (модели воздушного удара) либо пропускной способностью, представляющей собой *плотность потока целей, при которой они отображаются с вероятностью, не ниже заданной*.

Пусть на основании информационных данных РЛ системы ПВО решает L самостоятельных и независимых задач. Каждой l -й задаче ($l \in L$)

¹¹⁴ Данная методика в различных вариантах изложена в следующих источниках: Дружинин В.В., Конторов Д.С. Системотехника. М. : Радиосвязь, 1985. С. 97–101; Ботов М.И., Вяхирев В.А. Теоретические основы радиолокационных систем РТВ. Красноярск : Сиб. федер. ун-т; Политехн. ин-т, 2007. С.50–56; Ботов М.И., Вяхирев В.А., Девогач В.В. Проблемы многофакторного анализа сложных технических систем // Современные проблемы развития науки, техники и образования : сб. науч. тр. Красноярск : ИПК СФУ, 2009. С. 339–347.

припишем важность v_l и вероятность P_l . Тогда положительный эффект от решения всех задач может быть представлен соотношением $G = \sum_{l=1}^L P_l v_l$.

Решение l -й задачи, помимо РЛИ, требует расхода некоторого материального ресурса. Если нет информации, то решение невозможно. Соответственно нет и расходов. Ложная информация влечет только расходы, не увеличивая положительного эффекта. Очевидно, что общий ресурс, выделенный для решения всех задач,

$$z_0 = \sum_{l=1}^{L_0} z_l.$$

Здесь z_l – часть ресурса для решения l -й задачи; $L_0 = L_l + L_1$ – общее число решаемых задач, где L_l – число задач, решаемых по ложным данным (ложным трассам целей); L_1 – число задач, решаемых по реальным целям из числа $L > L_0$ (некоторые задачи не решаются, образуется экономия ресурса, которая может быть обращена на решение других задач). Перерасход ресурса воспрещен.

Тогда $L_1 = L_1(\zeta)$, $L_l = L_l(\mu)$, где ζ – полнота отображения обстановки, зависящая от вероятности правильного обнаружения P_0 ; μ – достоверность отображения, зависящая от вероятности ложной тревоги $P_{лт}$. Таким образом, задачи, решаемые системой ПВО, являются функциями переменных, характеризующих качество РЛИ.

Условная вероятность P_{l1} решения l -й задачи (при условии достаточности ресурса) зависит от абсолютных ошибок отображения целей, то есть $P_{l1} = P_{l1}(\langle \delta_j \rangle)$, где $\delta_j = |\theta_j - \hat{\theta}_j|$, θ_j – истинное положение j -й цели; $\hat{\theta}_j$ – оценочное значение положения отметки j -й цели на устройстве отображения РЛИ, $j = \overline{1, M}$, M – число целей.

Полная вероятность P_l правильного решения l -й задачи равна $P_l = P_{l1}(\langle \delta_j \rangle) P_{l2}(z_l)$, где P_{l2} – вероятность решения l -й задачи при ограниченном ресурсе $z_l \leq z_{лд}$; ($z_{лд}$ – достаточный для решения l -й задачи ресурс).

Примем, что

$$P_{l1} = e^{-k_1 \sigma^2}, \quad P_{l2} = \exp \left[-k_2 \left(\frac{z_{лд} - z_l}{z_l} \right)^2 \right], \quad 0 < z_l \leq z_{лд},$$

$L_1 = k_3 P_{лт}$; $\zeta = P_0$; σ^2 – дисперсия ошибок измерения РЛИ. Тогда, считая задачи по обнаружению целей и завязке трасс равноценными по требова-

ниям к РЛИ и назначению ресурса, выражение для положительного эффекта РЛ системы приведем к окончательному виду:

$$G = \sum_{l=1}^L v_l \exp \left\{ - \left[k_1 \sigma^2 + k_2 \left(\frac{z_{лД} - z_l}{z_l} \right)^2 \right] \right\}. \quad (2.2)$$

Здесь $z_l \leq z_0 / (P_0 L + k \mu)$; k_1, k_2 – некоторые коэффициенты, характеризующие соответственно тактико-технические возможности РЛС и общий ресурс РЛ системы; k – коэффициент, характеризующий вероятность того, что на решение задачи по ложной цели будет затрачен некоторый ресурс; значения параметров $z_0, z_{лД}, \sigma, P_0, P_{лТ}$ в зоне РЛ наблюдения Ω предполагаются заданными.

Выражение (2.2) представляет собой обобщенную математическую модель РЛ системы РТВ, которая позволяет проводить ее количественный анализ как относительно самостоятельной подсистемы системы ПВО.

Рассмотрим теперь огневую подсистему системы ПВО. При независимых воздействиях целей по объектам ущерб U , нанесенный противником охраняемым объектам, можно описать выражением

$$U = \sum_{h=1}^Q U_h \left\{ 1 - \prod_{j=1}^M \left[1 - A_j f_{hj}(\theta_{hj}) \prod_{l=1}^{z_j} (1 - P_{lj}) \right] \right\},$$

где Q – число обороняемых объектов; U_h – абсолютная ценность (важность) h -го объекта; M – число атакующих целей, выявленных информационной подсистемой ПВО (то есть РЛ системой РТВ); $A_j \leq 1$ – опасность (поражающая способность) j -й цели; f_{hj} – функция поражения h -го объекта j -й целью; θ_{hj} – расстояние между h -м объектом и точкой атаки j -й цели; P_{lj} – вероятность поражения l -м средством j -й цели; z_j – наряд огневых средств ПВО на уничтожение j -й цели, причем $\sum_{j=1}^{M+\mu} z_j \leq z_0$.

При $P_{lj} = 0$ максимально возможный ущерб $U_{\max} = \sum_{h=1}^Q U_h$, поэтому ущерб, предотвращенный системой ПВО (положительный эффект системы ПВО),

$$G = U_{\max} - U = \sum_{h=1}^Q U_h \prod_{j=1}^M \left[1 - A_j f_{hj}(\theta_{hj}) \prod_{l=1}^{z_j} (1 - P_{lj}) \right]. \quad (2.3)$$

Для упрощения выражения (2.3) положим, что охраняемые объекты равноценны ($U_h = 1$), поражающая способность воздушных целей по всем объектам удара одинакова ($A_j = 1$); вероятность поражения j -й цели l -м средством одна и та же ($P_{lj} = P_j$); $z_j = z$ для обнаруженных и $z_j = 0$ для необнаруженных целей. Тогда

$$G = \sum_{h=1}^Q \prod_{j=1}^{P_0 M} \left[1 - f_{hj}(\theta_{hj})(1 - P_j)^z \right].$$

Поскольку важность охраняемых объектов одинакова, можно считать, что на каждый объект попадает одинаковое число целей $m = M/Q$, для которых $f_{hj} > 0$, а для каждой из остальных $M - m$ целей $f_{hj} = 0$. Число средств, назначенных на уничтожение каждой цели, $z = z_0 / (P_0 M + \rho \mu)$, где ρ – вероятность того, что на ложную цель будет назначено некоторое средство обороны. Примем, что функция поражения h -го объекта j -й целью изменяется по следующему закону¹¹⁵: $f_{hj} = \exp[-k_3 \theta_{hj}^2]$, где k_3 – некоторый коэффициент, характеризующий боевые возможности j -й цели.

Для нападающих целей (при непосредственном огневом воздействии на объект) $\theta_{hj} = 0$ (соответственно $f_{hj} = 1$), для остальных целей θ_{hj} очень велико и $f_{hj} \cong 0$. Примем также, что вероятность поражения j -й цели l -м средством ПВО $P_j = \exp[-k_4 \sigma^2]$, где k_4 – некоторый коэффициент, характеризующий боевые возможности соответствующего огневого средства; σ – точность боевой информации, поступающей от РТВ. Тогда

$$G = P_0 M \left[1 - \left(1 - e^{-k_4 \sigma^2} \right)^{\frac{z_0}{P_0 M + \rho \mu}} \right]^m.$$

Очевидно, что общий затраченный ресурс зависит от затрат на содержание системы ПВО, израсходованного ресурса и боевых потерь: $W = \lambda (P_0 M + \rho \mu) + C + B$. Здесь C – затраты на содержание системы ПВО; B – ее собственные боевые потери; λ – коэффициент, зависящий от ценности объектов обороны. Поэтому эффективность системы ПВО может быть представлена следующим соотношением:

¹¹⁵ Выбор таких законов распределения величин f_{hj} и P_j носит условный характер. При уточнении конечного выражения в качестве варианта можно задействовать распределение Пуассона или показательное (экспоненциальное) распределение. При этом несколько изменятся результаты, но не характер рассуждений.

$$\Theta = \frac{P_0 M \left[1 - \left(1 - e^{-k_4 \sigma^2} \right)^{\frac{z_0}{P_0 M + \rho \mu}} \right]^m}{\lambda (P_0 M + \rho \mu) + C + B}. \quad (2.4)$$

Здесь величины M , m задаются на основании анализа оперативно-тактической обстановки с учетом сложности воздушного удара и параметров РЛП (зоны обнаружения Ω) системы РТВ; P_0 , ρ , μ , σ характеризуют РЛ систему; z_0 и функция f_{hj} определяют боевые возможности (показатели качества) огневых средств ПВО: запас боекомплекта; предельно допустимую плотность потока целей в воздушном ударе, не приводящую к перегрузке системы; вероятность поражения воздушных целей.

Некоторые результаты расчетов эффективности системы ПВО в соответствии с соотношением (2.4) представлены на рис. 2.20–2.22. При проведении расчетов были приняты следующие допущения: а) наземная группировка ПВО (совокупность радиотехнических и зенитных ракетных войск) остается неизменной в течение всего времени налета воздушного противника; б) показатели РЛ группировки (количество обрабатываемой информации о целях, дискретность обновления информации, точность информации о целях, внешняя граница РЛП и др.) остаются постоянными в течение всего налета; в) все воздушные объекты (свои самолеты и воздушные цели) находятся постоянно в РЛП группировки. Данные допущения (с учетом многофакторного характера решаемой задачи) позволяют, с одной стороны, существенно сократить расчеты при проведении оценки эффективности системы ПВО относительно выбранного варианта удара воздушного противника, а с другой – рассчитать минимально необходимое количество РЛ средств и средств огневого поражения для успешного прикрытия охраняемого объекта.

Если в качестве максимального принять значение эффективности $\Theta = 1$, то результаты расчета зависимости эффективности системы ПВО от количества атакующих целей M будут иметь вид кривой, представленной на рис. 2.20. Расчеты проведены в предположении, что остальные параметры соотношения (2.4) имеют следующие значения: вероятность правильного обнаружения $P_0 = 0,5$; коэффициент, характеризующий боевые возможности огневых средств ПВО, $k_2 = 0,9$; точность (условная среднеквадратическая ошибка (СКО) измерения $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$) боевой информации РЛ системы $\sigma = 0,5$; условный огневой запас (боекомплект) средств ПВО $z_j = 60$; вероятность назначения на ложную цель огневой средства ПВО $p = 0,1$; вероятность ложной тревоги $P_{ЛТ} = 10^{-4}$; достоверность боевой информации $\mu = P_0 - l_0 \cdot P_{ЛТ}$; весовой множитель $l_0 = r_{10} p (H_0) / r_{01} p (H_1)$; априорные ве-

роятности соответственно отсутствия и наличия сигнала $p(H_0) = p(H_1) = 0,5$; стоимость ошибок за принятие неправильного решения $r_{10} = r_{01} = 1$; коэффициент, зависящий от ценности объекта $\lambda = 1$; коэффициент, показывающий затраты на эксплуатацию (поддержание вооружения группировки ПВО в боеготовом состоянии и обучение боевых расчетов) $C = 0,9$; количество охраняемых объектов $Q = 5$. Очевидно, что эти параметры могут варьироваться в определенных пределах.

Низкая эффективность системы ПВО при небольшом количестве атакующих целей, подлежащих уничтожению, связана с довольно значительными затратами на поддержание системы в боеготовом состоянии, которые не могут быть скомпенсированы сравнительно малым количеством сбитых самолетов противника (*хотя прорыв авиации к охраняемым объектам и предотвращен, но потенциальные боевые возможности группировки ПВО реализованы не полностью*).

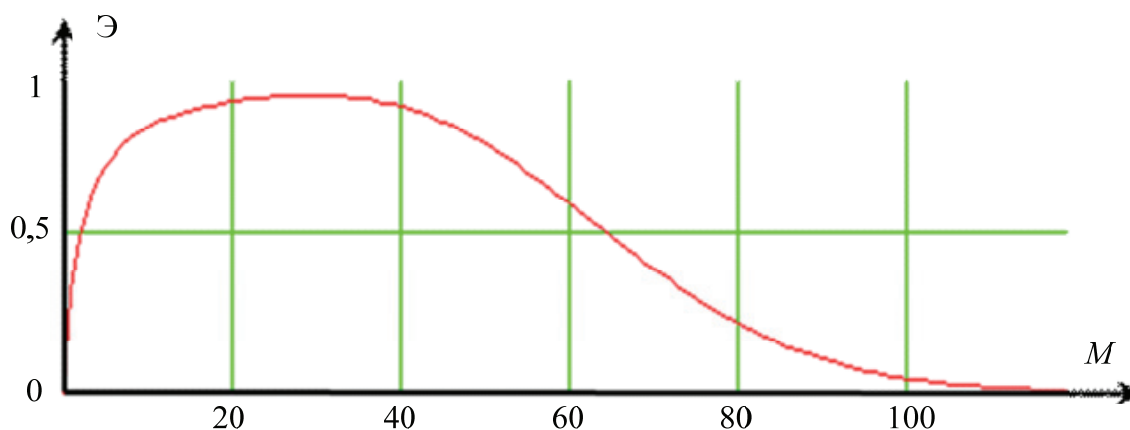


Рис. 2.20. Зависимость эффективности системы ПВО от количества целей, атакующих охраняемые объекты (все остальные параметры фиксированы)

Достаточно высокая эффективность группировки ПВО при $10 < M < 40$ связана с максимальной реализацией ее боевых возможностей в условиях высокой плотности налета воздушного противника (*боевые возможности группировки реализованы полностью, и прорыв авиации противника к охраняемым объектам предотвращен*).

Относительно незначительное снижение эффективности группировки ПВО при $40 < M < 60$ (на границе полного расхода боекомплекта огневыми средствами) связано со следующими факторами: а) для огневого средства ПВО возможно поражение одной ракетой более одного воздушного объекта; б) при применении ИА возможно поражение противника

не только с помощью ракет и снарядов артиллерии, но и с помощью воздушного тарана; в) при большом количестве пораженных воздушных целей возможно наличие паники среди авиации противника; г) в процессе налета не все средства поражения авиации противника (из-за сбоев или технических неисправностей) могут достичь объекты, прикрываемые группировкой ПВО; д) задачи, поставленные перед авиацией противника могут содержать грубые просчеты: ошибочное нацеливание самолёта на объект, который уже уничтожен; невыделение ударных сил на объекты, оставшиеся целыми; координаты объектов, заложенные в программах наведения крылатых ракет, оказались неточными и т. д. В целом данная ситуация соответствует тому, что *боевые возможности группировки ПВО реализованы полностью, а прорыв авиации противника к охраняемым объектам в основном предотвращен.*

Существенное снижение эффективности группировки ПВО при $M > 60$ объясняется тем, что плотность потока целей существенно превышает ее боевые возможности (*боевые возможности группировки ПВО реализованы полностью, но прорыв авиации противника к охраняемым объектам в основном не предотвращен.*).

Представляется небезынтересным провести сравнение аналитической зависимости эффективности системы ПВО от количества целей, атакующих охраняемые объекты (рис. 2.20), и качественной зависимости выигрыша, обеспечиваемого системой ПВО, от стоимости РЛ системы РТВ $V_{\text{ПВО}} = f(\text{СТ}_{\text{РЛ}})$, представленной на рис. 1.4. Очевидно, что несмотря на явную несовместимость сопоставляемых параметров одной и той же системы и на существенные различия ситуаций сопоставления (в первом случае выявляется зависимость эффективности ПВО от плотности налета воздушного противника, а во втором – зависимость выигрыша ПВО от затрат на РЛ систему РТВ) эти кривые фактически совпадают.

Однако парадокса здесь нет, поскольку для такого совпадения имеются вполне объективные основания. Кривая $V_{\text{ПВО}} = f(\text{СТ}_{\text{РЛ}})$ хотя и отражает зависимость выигрыша от стоимости, но в основу выявления этой зависимости было положено соотношение вероятности РЛО огневых средств со стороны РЛ системы РТВ и вероятности поражения целей огневыми средствами ПВО в зависимости от качества этого РЛО. И то обстоятельство, что качество РЛО было выражено посредством стоимости РЛ системы, не исказило более глубокой закономерности, скрытой за фактически полунитивным анализом системы. В самом деле, кривая, представленная на рис. 1.4, соответствует нескольким базовым точкам, при которых *вероятность РЛО* боевых действий огневых средств со стороны РЛ системы: 1) *минимальная* (РЛ система РТВ отсутствует, затраты на ее содержание близки к нулю, огневые средства ПВО работают в децентрализованном

режиме; эффективность системы ПВО незначительна); 2) *максимальная* (РЛ система РТВ в наличии, затраты на ее содержание соизмеримы с затратами на содержание других родов Войск ПВО, и в этой взаимосвязанной системе осуществляется централизованное РЛО боевых действий огневых средств в полном объеме с требуемым качеством; эффективность системы ПВО максимальна); 3) *вероятность РЛО* характеризуется неопределенностью: затраты на РЛ системы максимальны (стоимость РЛ системы сопоставима со стоимостью ПВО), система ПВО вырождается в чисто информационную систему, то есть в систему, не имеющую огневых средств, и эффективность такой системы равна нулю.

На рис. 2.21 представлена зависимость эффективности группировки ПВО от величины СКО измеряемых координат воздушных целей σ и плотности воздушного налета (числа воздушных целей M , участвующих в налете) при: а) условном коэффициенте затрат на эксплуатацию (поддержание в боеготовом состоянии) группировки ПВО $C = 1$; б) вероятности назначения на ложную цель огневых средств ПВО $p = 0,1$.

Из рисунка видно, что СКО измерения координат воздушных целей оказывают существенное влияние на эффективность системы ПВО. В частности, величина этих ошибок существенно влияет на качество выполнения боевых задач огневыми средствами ПВО (время поиска и захвата цели на автосопровождение, общее время выполнения боевой задачи, вероятность поражения воздушной цели одной ракетой и т. д.). Поэтому при величине СКО меньше некоторого значения (рис. 2.21, для $\sigma \leq 0,2$) рост эффективности существенно ограничен.

Это связано с тем, что эффективное поражение целей огневыми средствами ПВО происходит при некоторой конечной точности измерения координат этих целей. Дальнейшее повышение точности нецелесообразно, так как требует существенного увеличения затрат на создание дорогостоящих высокоточных радиолокационных и огневых средств ПВО, что не приносит дополнительных преимуществ для системы ПВО при решении поставленных задач, но сопровождается ростом затрат на создание таких средств. В то же время существенное снижение эффективности группировки ПВО происходит и при наличии грубых ошибок измерения координат целей ($\sigma > 0,8$). Это связано с увеличением времени поиска и захвата цели на автосопровождение, общего времени выполнения боевой задачи (времени обстрела цели), снижением вероятности огневых поражений воздушных целей (наличием «промахов») и т. д.

Существенно, что степень влияния СКО на эффективность группировки ПВО возрастает по мере увеличения плотности потока целей, участвующих в налете (рис. 2.21). Последнее объясняется тем, что с ростом числа целей, участвующих в налете, рост ошибок определения координат

не может быть скомпенсирован резервом боевого времени, которым располагает группировка в случае воздушного налета меньшей плотности.

На рис. 2.22 представлена зависимость эффективности системы ПВО от условной величины СКО при: а) коэффициенте затрат на эксплуатацию группировки ПВО $C = 1$; б) количестве атакующих целей, подлежащих уничтожению $M = 80$; в) вероятности назначения на ложную цель огневому средству ПВО $p = 0,1$. Данная зависимость интересна тем, что в отличие от сечения пространственной фигуры (рис. 2.21) плоскостью $M = \text{const}$ она не отражает снижения эффективности системы ПВО при $\sigma \rightarrow 0$. Можно предположить, что это обстоятельство подтверждает рассмотренный в разделе теории исследования операций недостаток необоснованной подмены многофакторного анализа стохастической ситуации однофакторным – ограничение в выборе числа переменных сопровождается потерей информации. Вполне вероятно, что и при двухкритериальном исследовании эффективности системы ПВО (рис. 2.21) могли быть утрачены некоторые важные закономерности третьего, четвертого и т. д. порядков поведения РЛ системы, что необходимо учитывать в процессе ее оптимизации.

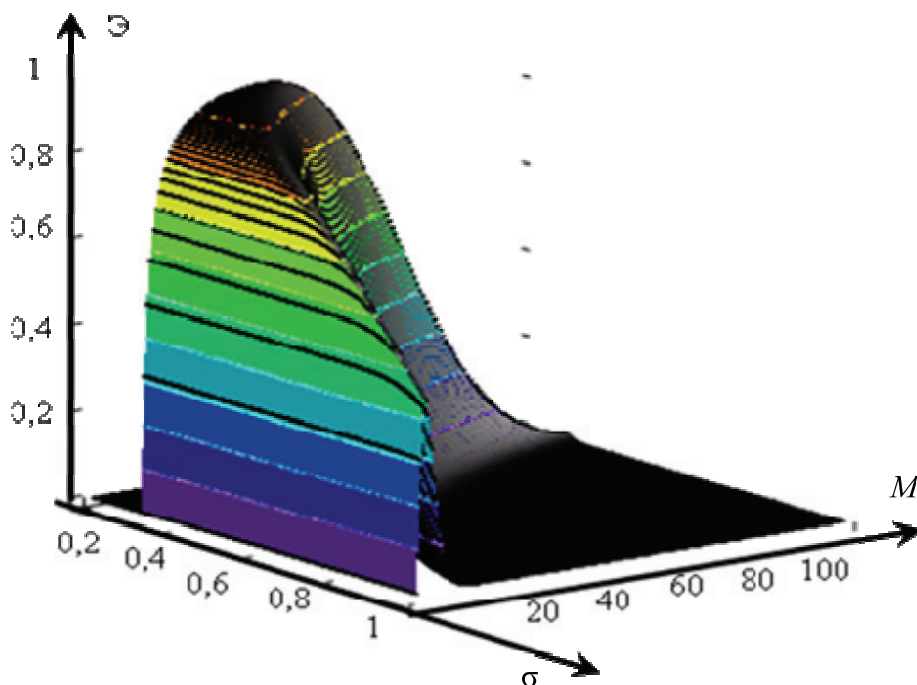


Рис. 2.21. Зависимость эффективности системы ПВО от величины СКО и количества атакующих целей, подлежащих уничтожению

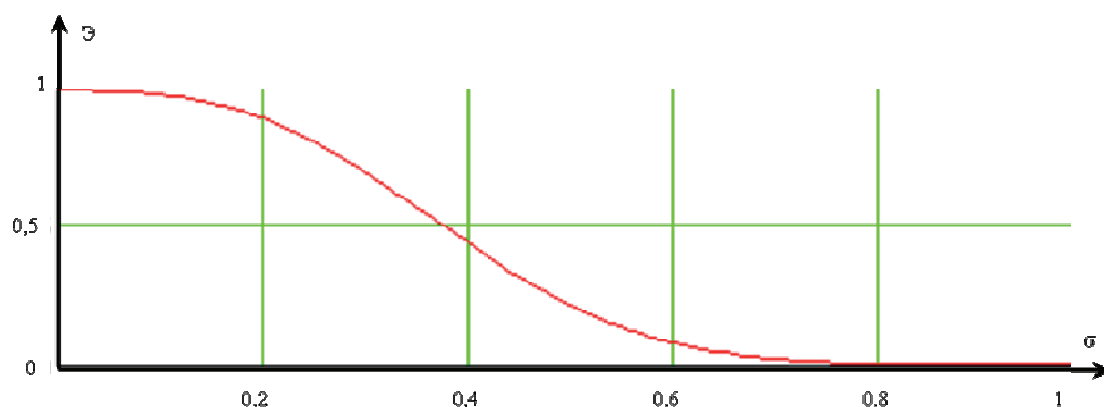


Рис. 2.22. Зависимость эффективности системы ПВО от величины СКО

Варьируя в соотношении (2.4) другими показателями качества системы ПВО и параметрами, характеризующими СВН противника, можно проводить развернутую количественную оценку эффективности последней, то есть более или менее обоснованно решать аналитическим методом многофакторную задачу стохастического характера применительно к различным вариантам удара воздушного противника и моделям построения системы ПВО.

В настоящее время элементы подсистемы РЛП, как правило, работают в режиме последовательного обзора пространства и добывают первичную РЛИ в виде дискретных отсчетов координат и признаков воздушных объектов в реальном масштабе времени. Элементы информационно-управляющей подсистемы объединяют эти отсчеты в трассы, осуществляют вторичную (третичную) обработку РЛИ, управляют работой подсистемы РЛП и потоком РЛИ. Пространственная структура РЛ системы строится по территориально-иерархическому принципу и определяется в первую очередь сетью радиотехнических подразделений, обеспечивающих создание РЛП нужной кратности в требуемых территориальных и высотных границах. Каждое радиотехническое подразделение имеет свои РЛС и КП (объект АСУ) и способно в случае необходимости самостоятельно выполнять боевые задачи.

По высоте РЛП РТВ строится как многоярусное с помощью РЛС маловысотного поля (H_{\max} до 2 000 м) и РЛС больших и средних высот (БСВ). Соответственно различают два типа рлр. Все высотные ячейки РЛП создаются за счет объединения группы смежных рлр (БСВ и нескольких маловысотных рот) в ртб, являющиеся основными источниками РЛИ.

Как уже ранее отмечалось, основная особенность РЛ системы РТВ заключается в том, что она, будучи давно созданной, в настоящее время

носит преимущественно очаговый характер. Поэтому применение к РЛ системе принципа системного подхода предполагает в первую очередь обоснование наиболее вероятных и рациональных путей её развития, которые предусматривают: 1) обновление парка радиолокационного вооружения (РЛВ), 2) совершенствование структуры (группировки) подразделений РТВ и 3) совершенствование внутрисистемных связей. Перечисленные направления развития тесно взаимосвязаны. Расчеты показывают следующее: чтобы система своевременно реагировала на изменения уровня развития СВН противника, ее необходимо пополнять новыми образцами РЛВ и АСУ через каждые 3–4 года, а сама РЛ система должна существенно менять свой облик через 10–15 лет.

Следовательно, постоянное целенаправленное совершенствование РЛС, как основных информационных элементов любой РЛ системы, есть объективно необходимое условие и основное содержание процесса дальнейшего развития РЛ системы РТВ, а в целом и всей ЕАРЛС Российской Федерации. Важнейшей стороной этого процесса является преемственность, совместимость новых образцов РЛВ с существующим парком. По опыту советского периода развития РЛ системы РТВ на разработку, испытание, серийное производство новых образцов РЛВ уходит около 5–10 лет; рациональный срок эксплуатационного цикла образцов РЛВ доходит до 20 и более лет. Поэтому в процессе функционирования РЛ системы неизбежна совместная эксплуатация разнотипных РЛС. В этих условиях и стратегия развития РЛ системы РТВ как сложной системы, и стратегия подготовки инженеров в области радиолокации должна учитывать сравнительно большой временной интервал (20 и более лет), в пределах которого будут совместно функционировать образцы РЛВ, значительно отличающиеся между собой как по принципам построения, боевым возможностям, так и по элементной базе.

В то же время, хотя целенаправленное выявление способов упорядочения связей компонентов РЛ системы, обеспечивающих достижение системного (сверхсуммарного) эффекта, важно и самоценно, однако не менее важным и ценным является совершенствование и развитие уровня технической организации самих компонентов (элементов) системы. Речь идет о теории радиолокации, ее методологии и применении этих отраслей науки к решению масштабных задач синтеза перспективных РЛС с тем, чтобы наиболее адекватным образом отразить не только *системную форму* организации (структуру), но и *радиолокационно-информационную (технологическую) сущность* рассматриваемой системы. В этой связи самостоятельную научную и практическую ценность представляют теория и методология радиолокации как относительно самостоятельной научной дисциплины в научно-дисциплинарном комплексе радиотехнических наук.

Раздел 2
СОДЕРЖАНИЕ И СТРУКТУРА
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ
СИСТЕМОТЕХНИКИ

Глава 3. РАДИОЛОКАЦИЯ КАК НАУЧНАЯ ДИСЦИПЛИНА. СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ ТЕОРИИ РАДИОЛОКАЦИИ

3.1. Радиолокация как передовая отрасль радиотехники

Наука как целостный социально-культурный феномен возникла и исторически развивалась следующим образом: естественные науки, включая математику, технико-технологические науки и социально-гуманитарные науки. К настоящему времени все три научно-дисциплинарных комплекса находятся в тесной взаимосвязи и взаимозависимости, при которой технико-технологические науки в диалектически снятом виде включают в себя часть теоретических выводов, методологических схем и практических следствий естественных наук, а социально-гуманитарные науки – соответствующие теоретические выводы, схемы и следствия естественных и технических наук. Существует и обратная взаимосвязь, являющаяся одним из наиболее существенных признаков современной (постнеклассической) научной рациональности.

Генетическая зависимость технических наук относительно естественных дала повод некоторым науковедом отождествлять их с прикладным естествознанием, подчиняя процесс становления и развития этого уникального явления совокупной науки жестким принципам и закономерностям развития естественно-научного знания. Это отождествление не позволяло понять специфику предмета технических наук, особенности их функционирования и развития, отличия структуры технической теории от естественно-научной, что на протяжении длительного времени существенно сдерживало процесс самоопределения этой специфической отрасли современной науки.

Однако по мере проникновения науки в сферу общественного производства и услуг, что принято называть научно-технической революцией, естественные и технические науки стали рассматриваться как равноправные научные дисциплины и в них, подобно естествознанию, стали постепенно проявляться и фундаментальные, и прикладные исследования. К настоящему времени существует более или менее устоявшееся представление о том, что технические науки, хотя и возникли в качестве прикладных областей исследования естественных наук, составляют особый класс научных (научно-технических) дисциплин, которые не только используют, но

и значительно видоизменяют заимствованные из естествознания теоретические схемы, развивая исходное знание. Более того, это не был единственный способ их возникновения. Важную роль здесь сыграла математика.

Таким образом, технические науки к началу XX столетия составили сложную иерархическую систему знаний – от весьма систематических наук до собрания правил в инженерных руководствах. Некоторые из них выводились непосредственно из естествознания и часто рассматривались в качестве особой отрасли физики, другие развивались из непосредственной инженерной практики. Однако и в одном, и в другом случае инженеры заимствовали как теоретические и экспериментальные методы науки, так и многие ценности и институты, связанные с их использованием.

Радиотехника не стала исключением. Именно из естественных наук, в первую очередь из теоретической физики, в радиотехнику были транслированы исходные теоретические положения, способы представления объектов исследования и проектирования, основные понятия, а в последующем (хотя и на интуитивном уровне) были заимствованы сам идеал научности, структура научной рациональности, а также установка на теоретическую организацию радиотехнического научного знания, построение идеальных моделей объектов и их математизацию. В то же время нельзя не видеть, что в радиотехнике все заимствованные из теоретической физики элементы претерпели существенную трансформацию, в результате чего и возник новый тип организации теоретического знания, позволяющий говорить о радиотехнике как об относительно самостоятельной научно-технической дисциплине.

С середины XX века развитие радиотехники проходило преимущественно в двух направлениях: а) в направлении совершенствования элементной базы радиотехнических устройств с одновременным формированием частных радиотехнических теорий (теории генерирования, передачи и приема радиосигналов, теории антенн, теории генераторных приборов, теории радиотехнических цепей, теории радиосигналов и т. д.); б) в направлении предметной дифференциации радиотехники, сопровождавшейся формированием ряда ее новых отраслей (радиоуправление, телевидение, телеуправление, радионавигация и др.). Особое место в этом предметном радиотехническом комплексе заняла методика и техника обнаружения объектов на основе эффекта вторичного отражения радиоволн – **радиолокация**.

Возникновение этой отрасли радиотехники оказало революционизирующее влияние на ее развитие и вычленение из этой формирующейся инженерной дисциплины собственной теоретической составляющей. Открытие и последующее практическое применение явления вторичного излучения, сопровождающегося затуханием энергии отраженной волны, пропорциональным четвертой степени дальности до объекта локации, пространственное перемещение этого объекта со значительными скоростями, а также ряд дру-

гих специфических особенностей этого явления, существенно отличающих его от явления радиосвязи, создали мощный импульс для дальнейшего развития упомянутых выше частных радиотехнических теорий и появления некоторой новой отрасли радиотехнического знания, отражающего общие принципы радиолокационного наблюдения объектов (статистическая теория обнаружения радиосигналов, статистическая теория измерения параметров объектов, теория адаптивной обработки сигналов и др.).

Посредством возникновения теоретических основ радиолокации радиотехника стала более интенсивно обособляться от теоретической и экспериментальной физики, приобретая свое более или менее устойчивое предметное поле и собственные методологические и теоретические основания. Одновременно с развитием перечисленных отраслей предметной радиотехники происходило интенсивное развитие ряда частных радиотехнических теорий. Например, в теории приема и передачи сигналов появились разработки по высокочастотным малошумящим усилителям, фазоманипулированным и частотно-модулированным сигналам, а также очень важные для практики радиолокационного наблюдения разработки по эффекту согласованной фильтрации и сжатия сигналов. Теория антенн приобрела статистическую основу, а в качестве ее отдельного направления стала успешно развиваться теория пространственно-временной обработки сигналов на базе ФАР.

В настоящее время радиотехника и как техническая теория, и как инженерная деятельность по разработке и изготовлению радиотехнических устройств и систем проходит этап дисциплинарной организации и охвачена двумя, на первый взгляд, взаимоисключающими процессами. *С одной стороны*, продолжается предметная дифференциация и формирование радиотехнического научно-дисциплинарного комплекса, перечень дисциплин в котором к настоящему времени уже не поддается строгой оценке. Только в радиолокации количество вновь формирующихся частных дисциплин приближается к десяти – общая радиолокация, специальная или военная радиолокация, авиационная радиолокация, космическая радиолокация, подземная или подповерхностная радиолокация и т. д. Можно обнаружить и другие формирующиеся предметные области радиолокации, требующие дальнейшей специализации инженерной деятельности. *С другой стороны*, углубление процессов специализации и дифференциации радиотехнического научно-дисциплинарного комплекса стало сопровождаться рядом методологических проблем в междисциплинарном языковом общении, систематизации и уплотнения радиотехнического знания и т. д. и, следовательно, вызвало в его структуре прямо противоположную тенденцию – интеграцию, то есть поиск и формирование теоретического компонента, общего для всего дисциплинарного комплекса. Стали формироваться

такие теоретические дисциплины, как общая радиотехника, статистическая радиотехника, теоретические основы статистической радиотехники, статистическая теория радиосистем и т. д., объектно-предметные области которых в значительной степени перекрываются и остаются подвижными до настоящего времени.

Кроме того, существенное усложнение прикладных задач, особенно тех из них, которые по своему масштабу оказались соизмеримыми с задачами национального характера, поставили формирующуюся теорию и методологию радиотехники в такую познавательную ситуацию, при которой накопленные научные знания, разработанные ранее теоретические схемы объекта, а также наиболее распространенные образцы научно-исследовательской и инженерной деятельности оказались малоэффективными технически и весьма затратными с точки зрения материальных ресурсов и финансово-экономических средств государства.

В качестве примера можно привести историю разработки устройств подавления внешних коррелированных помех, количество компенсационных каналов в которых наращивалось пропорционально ожидаемому в зоне РЛ обнаружения, радионавигации или радиосвязи числу источников помех. Последующие же исследования показали, что такие системы из-за статистической взаимосвязи сигналов помехи в компенсационных каналах уже при трех источниках оказываются малоэффективными, а кардинальное решение этих проблем связано с переходом от многоканальных автокомпенсаторов к оценке матрицы, обратной корреляционной матрице помех. При этом на осознание отмеченных недостатков потребовалось без малого двадцать лет интенсивных опытно-экспериментальных исследований и колоссальные затраты материальных и интеллектуальных ресурсов страны, которых можно было избежать при выборе более адекватного методологического подхода в рамках самой радиотехники и радиолокации как наиболее развитого компонента радиотехнического дисциплинарного комплекса.

В этих условиях представители радиотехнической науки и ее наиболее развитой отрасли – радиолокации – вынуждены были сместить фокус внимания с познания сущностных и инженерных аспектов радиотехники на разработку более фундаментальных теоретических схем объекта и более эффективных методологических подходов к их анализу и прикладной интерпретации, то есть на область радиотехнического знания, которую иногда называют *научной радиотехнической рефлексией*¹¹⁶. Рефлексивный

¹¹⁶ Под научной рефлексией в науковедении принято понимать процессы самопознания науки, то есть процессы осознания ею собственной структуры, нормативов и механизмов эффективной организации научных исследований, самоорганизации и систематизации научного знания, координации, упорядочения, регуляции и критического анализа полученных результатов.

компонент научно-исследовательской деятельности постепенно вычленился из онтологического (сущностного) и приобрел относительно самостоятельный научный статус. Поэтому перед своим совокупным субъектом радиотехническая наука выступает как некоторая *нормативная система с рефлексией*. Однако это методологическое и гносеологическое явление в радиотехнике до сих пор не получило должного осмысления. В первую очередь это касается объекта познания и предмета исследования, комплекса решаемых проблем и задач, обобщенной структуры самой радиотехнической науки и ее теории, вопрос относительно которых до сих пор остается открытым.

Естественно, что рассмотренные науковедческие проблемы находят свое отражение в сфере профессионального образования инженеров по радиотехнике. Помимо задач разработки, проектирования и технической эксплуатации сложных радиотехнических (радиолокационных) систем, интеграции этих систем в более сложные надсистемы и управления ими, важнейшее место в их профессиональной деятельности начинают занимать задачи методологического и науковедческого характера. Сами инженерные задачи становятся комплексными, и при их решении необходимо учитывать самые различные аспекты, которые раньше казались второстепенными, например, экологические, эргономические или социальные аспекты. Современная радиотехническая наука, преобразовавшись к концу XX века в весьма обширный комплекс относительно независимых дисциплин, в настоящее время переживает этап междисциплинарного исследования совершенно нового уровня. А поскольку будущее развитие науки и техники закладывается в процессе подготовки и воспитания профессионалов, в этот период возникла необходимость формирования нового стиля инженерно-научного мышления именно в процессе инженерного образования, которое все в более выраженной форме стало принимать контуры **инженерно-научного образования**.

В этой связи необходимо подчеркнуть, что советская система инженерного радиотехнического образования достаточно своевременно и весьма эффективно отреагировала на отмеченные выше существенные изменения в специфике развития радиотехники, по времени совпавшие с проникновением в технические науки идеалов и норм постнеклассической научной рациональности. В первую очередь это касается системы подготовки военных инженеров по радиотехнике, поскольку военно-прикладная специфика этой отрасли научного знания по совершенно объективным обстоятельствам фиксировала профессиональное образование инженеров в непосредственной близости к передовому краю научных исследований. Здесь можно с высокой степенью точности указать даже дату этого примечательного события – сентябрь 1975 года, когда помимо традиционной подготовки воен-

ных инженеров по радиотехнике в течение пяти лет, был открыт особый – двухлетний – курс подготовки военных инженеров из числа военных специалистов с высшим инженерным образованием.

До указанной даты система подготовки военных специалистов в области радиотехники была представлена: а) средними военными радиотехническими училищами, готовящими радиотехников; б) высшими инженерными радиотехническими училищами, готовящими инженеров по радиотехнике преимущественно из числа гражданской молодежи и в) инженерными радиотехническими академиями, осуществляющими подготовку инженерных кадров из числа выпускников средних радиотехнических училищ (из числа радиотехников). Система же подготовки научных и научно-педагогических кадров в интересах развития собственно радиотехнической науки (адъюнктура и докторантура) занимала в этой системе особое место, а сама подготовка такого рода специалистов носила едва ли не «штучный» характер. По уровню подготовки и характеру предстоящей деятельности выпускников адъюнктуры (с определенной долей условности) можно было назвать *учеными-инженерами*.

В 1975 году система подготовки военных специалистов по радиотехнике претерпела существенные изменения. Средние радиотехнические училища, осуществляющие подготовку радиотехников, были преобразованы в высшие командные училища радиоэлектроники. На них была возложена задача подготовки в течение четырех лет на базе выпускников средних школ инженеров по эксплуатации РЛ средств (современный бакалавриат). Высшие инженерные радиотехнические училища продолжили пятигодичную подготовку инженеров по радиотехнике из числа гражданской молодежи. В то же время при радиотехнических академиях была создана двухлетняя система *инженерно-научного образования*, получившая условное название «факультет руководящего инженерного состава» (современная магистратура). По функциональному назначению выпускники факультета относились к кандидатам на замещение должностей заместителей командиров радиотехнических и зенитно-ракетных полков и бригад по вооружению, преподавателей высших командных училищ радиоэлектроники, военных представителей на оборонных промышленных предприятиях, научных сотрудников военных НИИ и КБ радиотехнического профиля. По уровню же профессиональной подготовки эти выпускники образовали новую формацию специалистов в области радиотехники – формацию *инженеров-ученых*.

Система подготовки научных и научно-педагогических кадров в интересах развития радиотехнической науки (адъюнктура и докторантура) претерпела не только качественные, но и количественные изменения, отразив тем самым существенные изменения в теоретическом и дисциплинар-

ном статусе радиотехники. Если подготовка докторов наук по радиотехнической специальности все еще носила «штучный» характер, то подготовка кандидатов наук по этой специальности была фактически поставлена на «поток»¹¹⁷.

В последующих параграфах при изложении обобщенной структуры радиолокации будет показано, что подобные изменения в характере профессиональной подготовки инженерных и научных кадров носили закономерный характер и были детерминированы не только запросами конкретной инженерной практики, но и существенными качественными изменениями в самом радиотехническом научно-дисциплинарном комплексе, в первую очередь – в радиолокации. Очевидно, что такие качественные изменения должны были найти свое отражение и в системе подготовки военных инженеров по радиотехнике. Для такого рода специалистов особенно важна междисциплинарная и методологическая подготовка, в которой существенная роль принадлежит техническому науковедению, включая философию науки и техники.

Здесь можно привести достаточно интересное высказывание на этот счет известного отечественного науковеда академика В.С. Степина. «Можно ли работать в сфере науки, – пишет ученый, – не понимая, что она собой представляет? Вероятно, можно, хотя и до определенных пределов. В такой же степени, например, можно завинчивать какой-нибудь болт на конвейере автозавода, не имея ни малейшего представления ни о производственном процессе в целом, ни о том, что такое автомобиль... Именно поэтому философия науки не нужна научному ремесленнику..., но подлинная творческая работа, как правило, выводит ученого на проблемы философии и методологии. Он нуждается в том, чтобы посмотреть на свою область со стороны, осознать закономерности ее развития, осмыслить ее в контексте науки как целого...»¹¹⁸.

Очевидно, что в рамках современного этапа развития радиотехники возникла острая необходимость исследовать ее через методологическую призму общей теории науки и науковедения. В этом случае будем считать радиолокацию наиболее развитой отраслью радиотехники, полагая, что собственно радиотехника (с поправкой на специфику протекающих в ней интеграционных процессов) может быть рассмотрена подобным образом.

¹¹⁷ Это утверждение применительно к Военной инженерной радиотехнической академии ПВО им. маршала Л.А. Говорова было высказано заместителем начальника академии по учебной и научной работе генерал-лейтенантом Александром Степановичем Челпановым в середине 80-х годов XX века.

¹¹⁸ Степин В.С., Горохов В.Г., Розов М.А. Философия науки и техники. М. : Гардарика, 1996. С.13.

3.2. Радиолокация как научная дисциплина

3.2.1. Признаки дисциплинарной организации научного знания

Исторически термин «дисциплина» (лат. *disciplina* – учение) обозначал школьное преподавание, включая обязательную совокупность подлежащих усвоению знаний в некоторой сфере человеческого опыта и сам процесс обучения. Внутри науки процессы дисциплинарной организации были подготовлены развитием представлений о научном методе и специфике «экспериментальной философии» в трудах Р. Декарта и Ф. Бэкона. Организационное закрепление и оформление новых идей здесь связано с введением новых принципов построения учебных предметов (дисциплин) и программ обучения естествознанию, а также с появлением светских учебных заведений.

Так, наряду с профессионализацией естественно-научной деятельности, развитие университетского преподавания естествознания оказало решающее влияние на дифференциацию самого естественно-научного знания и оформление отдельных научных дисциплин. Развитый университетский курс уже не мог создаваться в форме некоторой серии сообщений о тех или иных отдельных достижениях естествоиспытателей. Его построение предусматривало *систематическое изображение* каждой отрасли науки в виде поддающейся усвоению некоторой системы знания, включающей все основные содержательные компоненты соответствующей отрасли науки и свойственные ей способы наблюдения и эксперимента. В свою очередь, подобное построение дисциплинарных курсов обеспечивало систематическую подготовку профессионалов, специализирующихся в определенных отраслях естествознания и способствующих его дисциплинарной организации. Поэтому современная наука и имеет дисциплинарную форму организации.

В рамках классической научной рациональности в качестве основной формы существования тех или иных отраслей научного знания выступали отдельные научные теории. С переходом в неклассический этап научной рациональности сформированные ранее научные теории стали принимать явные признаки дисциплинарной организации, то есть стали выступать не только как система научного знания, но и как система научной деятельности, направленная на добывание этого знания, а также как система научной организации, в рамках которой осуществляется эта деятельность. В зарождающейся постнеклассической научной рациональности все развивающиеся и вновь возникающие отрасли научного знания стали в обяза-

тельном порядке рассматриваться сквозь «призму» признаков дисциплинарности, а сам список этих признаков постоянно совершенствовался и расширялся.

К настоящему времени в список признаков, позволяющих придать той или иной отрасли научного знания статус научной дисциплины, принято включать наличие в ней:

- фиксированного корпуса соответствующего научного знания;
- определенных категорий или эмпирических областей, явления которых считаются «законными» объектами дисциплинарного изучения;
- набора эмпирических и теоретических исследовательских средств (включая определенные методики изучения и языки описания);
- набора теорий и предположений о природе исследуемой реальности, а также подходы к ее изучению;
- типичных схем взаимодействия, обычных для исследовательской деятельности в данной дисциплине (соотношение между теоретическим и эмпирическим уровнями научного знания, экспериментом и наблюдением и т. п.);
- единой, зафиксированной специалистами, истории успехов и неудач исследовательской деятельности и представлений о перспективах ее развития (включая как сам набор проблем, так и определенное направление развития в их постановке и изучении);
- определенных форм, средств и каналов информационных коммуникаций между учеными;
- сферы специальной подготовки соответствующих научных кадров и критериев определения профессиональной принадлежности ученых;
- набора профессиональных институтов, ассоциаций, журналов и других признаков, отражающих специфику той или иной отрасли научного знания.

Таким образом, *научная дисциплина представляет собой исторически сложившуюся структурную единицу целостной науки, которая своими механизмами саморегуляции обеспечивает коллективную научную исследовательскую деятельность, систематизацию и организацию выработанного научного знания, коммуникацию ученых и воспроизводство научных кадров.*

Рассмотренные признаки дисциплинарной организации представляют собой своеобразную методологическую «сетку», которая позволяет методологу радиолокационной науки выявить: а) обобщенную структуру радиолокации как относительно самостоятельной отрасли научного знания в радиотехническом научно-дисциплинарном комплексе; б) компонентный состав и структурно-функциональные характеристики научного радиолокационного знания; в) уровень дисциплинарной организации радиолока-

ционной науки и степень ее развитости относительно лидирующих отраслей научного знания (в первую очередь – относительно естественно-научного знания); г) формы интеграции радиолокационной науки с другими научными дисциплинами радиотехники; д) на этой основе определить основные познавательные (методологические и науковедческие) задачи в рамках отрасли научного радиолокационного знания, адекватные уровню ее развития, что позволяет оптимизировать основные направления, пути и методы совершенствования радиолокации как научной дисциплины.

В последующих параграфах основное внимание будет уделено уточнению понятия научной рациональности, изложению обобщенной структуры радиолокационной науки, структурно-функциональных характеристик научного радиолокационного знания, оснований радиолокационной науки, а также рассмотрению ряда практических приложений научной радиолокационной теории к решению задач адаптивного обнаружения и измерения параметров радиолокационных сигналов в условиях априорной неопределенности относительно параметров внешних помех и неинформативных параметров сигнала.

3.2.2. Научная рациональность и ее структура

Понятие научной рациональности.

Необходимость обращения к понятию научной рациональности возникает всякий раз, как только субъект научного исследования¹¹⁹ ставит перед собой задачу разграничения знания научного и знания обыденного (стихийно-эмпирического или методического). Проблема такого разграничения характерна для всего научно-дисциплинарного комплекса, но в наибольшей степени она проявляется в отрасли технических наук, где уровень концептуализации накопленного знания находится преимущественно на начальной стадии, а в методологии научного исследования все еще преобладает метод проб и ошибок или инженерная интуиция.

В общей теории техники последний тип знания называют техническим (в отличие от научно-технического). Для некоторых частных задач технико-технологического проектирования этого знания оказывается достаточно. Однако подавляющее большинство современных научных задач

¹¹⁹ В науковедении принято различать два термина: «научное познание» и «научное исследование». Первый отражает объективный характер функционирования и развития науки безотносительно к предметным областям или субъектам научной деятельности. Второй выступает как форма осуществления научного познания индивидуальным или коллективным субъектом, отражающая конкретный процесс разрешения обусловленных практикой научных проблем, получение и систематизацию нового научного (научно-теоретического и научно-эмпирического) и методологического знания об объектах и способах их освоения.

в области совершенствования и развития техники может быть успешно решено только профессионально через общие механизмы научной рациональности, рациональные нормы научно-технического исследования и проектирования, обоснованные соответствующей научной, инженерной и технической практикой. Отсутствие же строгих логических критериев, методологических принципов и механизмов организации научных исследований нивелирует научно-техническую деятельность к повседневной технической, снижая эффективность этих исследований и выводя проблему научно-дисциплинарного статуса технической отрасли знания в ранг наиболее актуальных.

На протяжении длительного времени, охватывающего так называемый додисциплинарный этап развития науки, когда в качестве основной единицы методологического анализа выступали отдельные научные теории, к научной рациональности было принято относить совокупность *критериев научности знания*, включающую его доказательность, обоснованность, достоверность, непротиворечивость, эмпирическую подтверждаемость, концептуальную связанность (системную организованность), предсказательную силу (степень эвристичности) и практическую эффективность.

С переходом к дисциплинарно организованной науке, когда в качестве основной единицы методологического анализа стали рассматривать целостную научную дисциплину, выяснилось, что не только собственно научное знание, но и формы взаимодействия субъектов этой деятельности, и способы применения средств научного познания, и формы организации работы научных учреждений, и система ценностей науки, и, наконец, процедуры системной организации собственно научного знания предполагают наличие определенных норм (принципов, требований, правил, методических схем и др.). Поэтому в рамках научной деятельности стали разграничивать: а) исторически устоявшиеся критерии рациональности научного знания и ценностей науки и б) критерии эффективности научного метода и методологических схем и образцов деятельности самих ученых.

Поэтому современное представление о научной рациональности можно сформулировать следующим образом. Научная рациональность – относительно устойчивая в рамках данной исторической эпохи *совокупность правил, норм, стандартов, эталонов научной деятельности, критериев научности знания как результатов этой деятельности (упомянутой совокупности критериев доказательности, обоснованности, достоверности, непротиворечивости, эмпирической подтверждаемости, концептуальной связанности, предсказательной силы и практической эффективности), а также совокупность ценностных установок и мировоззренческих ориентиров*, общепринятых, однозначно понимаемых большинством членов научного сообщества, зафиксированных в научном языке, образцах научной

деятельности или образцах системной организации научного знания и транслируемых научным сообществом от поколения к поколению посредством специальных организационных форм и целенаправленной научно-методической деятельности.

В науковедении научная рациональность подразделяется на классическую, неклассическую и постнеклассическую. Каждый тип научной рациональности характеризуется особым состоянием научной деятельности, направленной на постоянное производство и воспроизводство объективно-истинного знания. Наиболее же существенная их специфика связана с формой системной организации науки и различной глубиной научной рефлексии по отношению к самой научной деятельности и ее результатам.

В центре внимания *классической научной рациональности* (конец XVIII – первая половина XIX века) находится собственно объект, при теоретическом описании и объяснении которого исключается все, что относится к субъекту, средствам и операциям его деятельности. Другими словами, в классической научной рациональности доминировала идея, согласно которой объективность и предметность научного знания достигаются только тогда, когда из описания и объяснения исключается все, что относится к субъекту и процедурам его познавательной деятельности. Эти процедуры понимались как раз навсегда данные и неизменные.

Неклассическая научная рациональность (конец XIX – середина XX века) учитывает связи между знаниями об объекте и характером средств и операций деятельности субъекта. Выявление этих связей рассматривается в качестве условий объективно-истинного описания и объяснения мира. Этот тип научной рациональности характеризуется пониманием относительности истины и картины природы. В противовес рассмотренному ранее идеалу единственно истинной теории, «фотографирующей» исследуемые объекты, допускается истинность несколько отличающихся друг от друга конкретных теоретических описаний одной и той же реальности, поскольку в каждом из них может содержаться момент объективно-истинного знания. Осмысливаются взаимосвязи между онтологическими (сущностными) постулатами науки и характеристиками метода, посредством которого осваивается объект. В связи с этим принимаются типы объяснения и описания, которые в явном виде содержат ссылки на средства и операции познавательной деятельности.

Постнеклассический тип научной рациональности (вторая половина XX века по настоящее время) расширяет поле рефлексии над деятельностью. Он учитывает соотношенность получаемых знаний об объекте не только с особенностью средств и операций деятельности, но и с ценностно-целевыми структурами. Интенсивное применение научных знаний во всех сферах социальной жизни, революция в средствах хранения и получения знаний (компьютеризация науки) меняют характер научной деятельно-

сти. Наряду с дисциплинарными исследованиями на первый план выдвигаются междисциплинарные и проблемно-ориентированные формы исследовательской деятельности. В результате усиливаются процессы взаимодействия принципов и представлений картин реальности (так называемых научных картин мира), формирующихся в различных науках. Все чаще изменения этих картин протекают не столько под влиянием внутродисциплинарных факторов, сколько путем идей и гипотез, *транслируемых из других отраслей научного знания или научных дисциплин*.

Последнее обстоятельство имеет фундаментальное методологическое значение для становления и развития радиолокации как научной дисциплины, поскольку позволяет существенно упростить, оптимизировать и ускорить процесс ее концептуализации и формирования общетеоретического компонента.

Научная рациональность в технических науках.

Научная рациональность в технике первоначально сливалась с рационализацией технической деятельности (деятельности по разработке и изготовлению тех или иных технических устройств) и собственно с рациональным обобщением технических проблем, идей или гипотез как некоторым прообразом теоретического знания в рассматриваемой области. Со становлением и развитием ремесленного производства появилась необходимость в накоплении и передаче ремесленного опыта и знаний (то есть в формировании так называемого рационального обобщения) в рамках сменяющихся поколений ремесленных мастеров. Поэтому в формировании технической научной рациональности обычно выделяют четыре ступени рационального обобщения.

Первая ступень была связана с необходимостью обучения специалистов в рамках каждого отдельного вида ремесленной технологии. Она нашла свое отражение в различных справочниках и пособиях, которые хотя и не носили научного характера, но уже вышли за пределы мифологической картины мира. На этой основе общество стало осознавать необходимость создания системы регулярного обучения ремеслу. Дальнейшее развитие рационализации технической деятельности могло идти уже только по пути научного обобщения. Однако инженеры хотя и ориентировались на научную картину мира, но в реальной технической практике все еще господствовала идея «приблизительности». Образцы же точного расчета демонстрировали только ученые-естествоиспытатели, разрабатывая все более совершенные научные инструменты и приборы, которые лишь впоследствии попали в сферу инженерной деятельности производства техники.

Вторая ступень рационального обобщения техники заключалась в обобщении всех существующих областей ремесленной техники. Это было осуществлено в так называемой «Общей технологии» (1777 г.) Иоганна

Бекманна и его школы, которая была первой реальной попыткой обобщения приемов технической деятельности различного рода, а также во французской «Энциклопедии» – системном описании всех существовавших к тому времени наук и ремесел. Однако и эта ступень рационального обобщения, независимо от ее претензии на научность, была всего лишь рациональным обобщением накопленного технического опыта на уровне здравого смысла. Именно к такому уровню рационального обобщения можно отнести, например, идею создания радиолинии В. Крукса, в основе которой находился опыт построения практической схемы электротелеграфа.

Третья ступень рационального обобщения находит свое выражение в появлении технических наук (технических теорий). Такое теоретическое обобщение отдельных областей технического знания в различных сферах техники происходит, прежде всего, в целях научного образования инженеров при ориентации на естественно-научную картину мира. При этом *научность техники* первоначально означала лишь применение к технике теоретических положений и практических рекомендаций естествознания. В XIX веке техническое знание освободилось от вековых ремесленных традиций и стало частью науки. Техническое сообщество, которое было все еще ремесленным и мало отличалось от средневекового, становится «кривозеркальным двойником» научного сообщества.

На передних рубежах технического прогресса ремесленники были заменены новым поколением ученых-практиков. Устные традиции, переходящие от мастера к ученику, заменили систематическим обучением в учебном заведении, а профессиональную организацию и техническую литературу *создали по образцу научной*. Техника стала научной, но не в том смысле, что безропотно выполняет все предписания естественных наук, а в том, что вырабатывает специальные – технические – науки. Эти науки, которые формировались, прежде всего, в качестве приложения различных областей естествознания к определенным классам инженерных задач, в середине XX века образовали особый класс научных дисциплин, *отличающихся от естественных наук* как по объекту, так и по внутренней структуре, но также обладающих дисциплинарной организацией.

Это отличие связано с двойственным (объективно-субъективным) характером техники. С одной стороны, все технические объекты создаются из естественного материала, а в самих этих объектах задействованы определенные силы природы и протекают модифицированные природные процессы. В этом качестве техника и процессы ее разработки (научно-технический синтез) опираются на некоторые фрагменты естественно-научной теории, определенным образом преобразованные в соответствующую *научную техническую теорию*. Однако, с другой стороны, эти же технические объекты являются продуктом сознательной целенаправленной человеческой

деятельности и с этой точки зрения процессы ее разработки подчиняются теории и методологии *инженерной деятельности* (как и теории деятельности вообще). Поэтому, наряду с отражением тех или иных фрагментов модифицированного объективного мира в форме научной технической теории в соответствии с критериями истинности научного технического знания (по образцу естественных наук), технические науки одновременно ориентированы и на разработку принципов, методов и норм инженерной деятельности¹²⁰ по созданию новых объектов и систем техники в соответствии с критериями эффективности.

В этой связи обобщенная схема (концептуальная модель) технических наук, в отличие от наук естественно-научного цикла, принимает двухуровневую структуру: на первом («верхнем») уровне протекают процессы переработки тех или иных положений, выводов и рекомендаций естественно-научной теории в основные идеи, законы и закономерности научной технической теории, а на втором («нижнем») уровне – процессы переработки основных положений, выводов и рекомендаций научной технической теории в принципы, методы и нормы соответствующей инженерной деятельности¹²¹.

Четвертую и высшую на сегодня ступень рационального обобщения в технике представляют: на первом уровне (уровне научной технической теории) – общая теория техники при ее ориентации на естественно-научную картину мира; на втором уровне (уровне инженерной деятельности) – *системотехника* как попытка комплексного теоретического обобщения принципов, методов и норм инженерной деятельности во всех отраслях современной техники и технических наук при ориентации на *системную картину мира*. Системотехника представляет собой особую деятельность по созданию сложных технических систем и в этом смысле она является, прежде всего, современным видом инженерной деятельности, высшей формой ее развития. Наряду с традиционной инженерной деятельностью, в ней функционирует и развивается деятельность, направленная на организацию, научно-техническую координацию и руководство всеми видами инженерной

¹²⁰ Инженерную деятельность как профессию принято связывать с регулярным применением научных знаний в технической практике. Если цель технической (ремесленной) деятельности – непосредственно задать и организовать изготовление системы, то цель инженерной деятельности сначала определить материальные условия и искусственные средства, влияющие на природу в нужном направлении, заставляющие ее функционировать так, как это нужно для человека (уровень технической теории), и лишь потом на основе полученных знаний задать требования к этим условиям и средствам, а также указать способы и последовательность их обеспечения и изготовления (уровень системотехники).

¹²¹ Объектом естественных научных дисциплин выступают те или иные фрагменты объективной реальности, которые отражаются и фиксируются в соответствующих естественно-научных теориях. Приложения этих теорий в инженерной практике – не их задача. Поэтому обобщенная структура естественных наук содержит всего лишь один – теоретический – уровень строения и функционирования.

деятельности, включая: а) проектирование компонентов, конструирование, отладку технических устройств и систем техники, разработку соответствующих технологий; б) стыковку и интеграцию частей проектируемой системы в единое целое. Последнее составляет ядро системотехники, определяет ее специфику и системный характер, поскольку сами инженерные задачи становятся комплексными и при их решении необходимо учитывать самые различные аспекты, которые раньше казались второстепенными.

В то же время системотехника включает в себя и особую научную деятельность, поскольку является не только сферой приложения научных технических знаний первого уровня технической науки, но и сферой выработки новых научных знаний – знаний *о методологии инженерной деятельности*. Поэтому системотехника, подобно технической науке, сама имеет двухуровневую структурную организацию: 1) уровень *системотехнической методологии* (уровень теории инженерной деятельности, вырабатывающей схему метода и методические средства системотехнической деятельности); 2) уровень собственно *инженерной деятельности*, включающей: а) упоминавшуюся выше совокупность принципов, методов и норм проектирования, конструирования, отладки технических устройств; б) совокупность принципов и методов стыковки и интеграции частей проектируемой системы в единое целое; в) саму инженерную деятельность, направленную на разработку, проектирование, конструирование, производство и экспериментальное исследование опытных образцов технических устройств или систем техники.

Очевидно, что с учетом рассмотренной специфики технических наук претерпевают изменения представления как о научной технической дисциплинарности, так и о структуре научной технической рациональности, которые были сформулированы выше с ориентацией на естественные науки. Истинность и дисциплинарная организованность научного технического знания, адекватно отражающего тот или иной фрагмент технической реальности, ценны не сами по себе (как это имеет место для естественных научных дисциплин), а только лишь в контексте их положительного влияния на качество и эффективность соответствующей системотехнической деятельности.

В технической науке теория представляет собой не только вершину исследовательского цикла и ориентир для дальнейшего исследования, но и основу системы правил, предписывающих ход оптимального технического действия. Поэтому *научная техническая дисциплина представляет собой исторически сложившуюся структурную единицу целостной технической науки, которая своими механизмами саморегуляции обеспечивает: а) коллективную научно-техническую исследовательскую деятельность; б) системную организацию выработанного научного знания в форме технической теории и методологии инженерной (системотехнической) деятельности; в) преобразование этого знания в совокупность принципов,*

методов, норм проектирования, конструирования, отладки технических устройств, принципов и методов стыковки и интеграции частей проектируемой системы в единое целое; г) коммуникацию ученых и инженеров; д) воспроизводство научно-инженерных и инженерно-научных кадров. Необходимость в последних возникла с появлением системотехники как высшей формы развития инженерной деятельности.

Соответственно научная рациональность технических наук (*научно-техническая рациональность*), помимо критериев истинности научно-технического знания, *должна содержать совокупность критериев эффективности системотехнической деятельности и ее методологии.*

Особенности научной рациональности в радиолокации.

Становление дисциплинарной организации современного научного радиолокационного знания и соответствующей ей научной рациональности в силу исторической необходимости совпало с временными рамками постнеклассической научной рациональности, когда основные признаки технических наук в целом были уже сформированы. Поэтому структура радиолокации как научной дисциплины и существенные признаки ее научной рациональности фактически ничем не отличаются от соответствующих признаков дисциплинарности и рациональности технических наук, сформулированных выше. Здесь находит свое проявление формально-логический принцип подчинения (логического соответствия) признаков видового понятия признакам родового понятия.

Более того, коль скоро в рамках постнеклассической научной рациональности становление и развитие той или иной отрасли научного знания (как уже отмечалось) протекает не столько под влиянием внутридисциплинарных факторов, сколько под действием идей и гипотез, заимствуемых из других отраслей научного знания или научных дисциплин, появляется реальная возможность построения обобщенной структуры радиолокационной науки, выявления структурно-функциональных характеристик научного радиолокационного знания, разработки оснований, норм и идеалов радиолокационной науки по образу и подобию наиболее развитых отраслей научного и научно-технического знания.

3.2.3. Обобщенная структура и функции радиолокационной науки

Идея радиолокационного метода, возникнув в качестве рабочей гипотезы у немецкого физика Герца и получив подтверждение как побочный продукт экспериментального исследования А.С. Поповым канала радиосвязи между двумя военными кораблями, вызвала к жизни целую систему специ-

фической инженерной деятельности, включающей проектирование, конструирование, непосредственное изготовление и техническую эксплуатацию первичных радиолокационных устройств и соответствующих технологий.

Первоначально эта система деятельности протекала в рамках предшествующего инженерного опыта в сфере радиосвязи и электротехники на основе позаимствованных отсюда частных методических и теоретических схем. Однако очень скоро выяснилось, что закономерности и соответствующие принципы радиолокационного взаимодействия весьма существенно отличаются от закономерностей и принципов радиоинформационного обмена, а технология радиолокационного наблюдения и соответствующая ей структура радиолокационного канала оказались значительно более сложными, чем в случае с радиосвязью.

Коль скоро радиоканал является частной и далеко не самой сложной разновидностью радиолокационного канала, а основной метод радиолокации оказался связанным не с направленным переизлучением, а с диффузным отражением радиосигнала от некоторого объекта, то главная проблема адекватной реализации радиолокационного наблюдения сместилась с инженерно-технических разработок конкретных радиолокационных устройств как компонентов более сложных радиолокационных систем на разработку теоретических схем этих устройств и их стыковку, а также на преобразование закономерностей распространения и отражения зондирующего сигнала в принципы радиолокационного обнаружения и измерения (принципы преобразования вещественно-энергетического взаимодействия в информационное).

Теория радиолокации далее стала развиваться на собственном эмпирическом, методологическом и теоретическом базисе. Радиоканал вошел в структуру радиолокационного канала в качестве частного технического решения, принцип радиосвязи оказался в системе принципов радиолокации, а фундаментальная теоретическая схема радиосвязи (уравнение радиосвязи) вошла в теорию радиолокации в качестве ее частной теоретической схемы.

Возникнув на стыке экспериментальной проверки практических приложений физики электрических явлений и потребностей общественной практики (преимущественно оборонного характера), радиолокация стала все отчетливее обозначать свои специфические черты, отличающие ее, с одной стороны, от естественно-научных дисциплин (физики), а с другой – от ближайших «родственников» (радиосвязи и электротехники). Она обрела свое устойчивое предметное поле, сформировала собственные средства, методы и логические механизмы научного исследования, свои особые частно-научные картины исследуемой реальности, то есть все то, что позволило в целом говорить о становлении относительно самостоятельной научной дисциплины в радиотехническом научно-дисциплинарном комплексе, включающей: а) систему специального радиолокационного научного зна-

ния, б) систему специфической научной деятельности и ее методологию, направленную на получение упомянутого научного знания и в) систему соответствующих научных организационных форм, в рамках которых осуществлялась эта научная деятельность.

Вместе с тем существенное усложнение прикладных задач, особенно тех из них, которые по своему масштабу оказались соизмеримыми с задачами национального характера, поставили теорию и методологию радиолокации в такую познавательную ситуацию, при которой накопленные научные знания, разработанные ранее теоретические схемы объекта, а также наиболее распространенные образцы и схемы научно-исследовательской деятельности оказались малоэффективными технически и весьма затратными с точки зрения материальных ресурсов и финансово-экономических средств государства. В особой степени эта проблемная ситуация затронула сферу показателей РЛ обнаружения и измерения на фоне внешних помех различной физической природы.

В этих условиях представители теоретической радиолокации, как и радиотехнической науки в целом, вынуждены были сместить фокус внимания с познания сущностных аспектов радиолокационного взаимодействия на разработку более фундаментальных теоретических схем объекта и более эффективных методологических подходов к их анализу и прикладной интерпретации, то есть на область радиолокационного знания, которую по аналогии с радиотехническим научным знанием можно называть *научной радиолокационной рефлексией*. Рефлексивный компонент научно-исследовательской деятельности постепенно вычленился из сущностного (рис. 3.1) и приобрел в рамках теоретической радиолокации относительно самостоятельный научный статус, вызвав соответствующие изменения, при которых радиолокация из обычной нормативной системы трансформировалась в нормативную систему с рефлексией.

Несложно заметить, что представленные на рисунке виды деятельности являются разнопредметными. Если к предмету научной деятельности относится сущность явлений радиолокации, а к продукту (результату) – радиолокационное научное знание, адекватно отражающее эту сущность, то предметом научно-рефлексивной деятельности (и радиолокационной научной рефлексии) выступает собственно научная деятельность со всеми атрибутами, включая методологию, научный метод, ценностно-мотивационную сферу индивидуального (коллективного) субъекта научной деятельности и соответствующий результат (систему радиолокационного научного знания). Обобщенным результатом этой деятельности являются идеалы и нормы радиолокационной науки, признаки ее дисциплинарной организации, а также системные формы организации полученного радиолокационного знания в форме научных концепций и теорий.



Рис. 3.1. Структура научно-технической деятельности

В то же время создаваемые технические теории малоинтересны обществу, если они не обусловлены его интересами, не направлены на совершенствование и развитие общественной практики. Поэтому субъект радиолокационной науки, как и любой технической науки, в своей исследовательской деятельности иногда косвенно, а в наиболее частых случаях напрямую подчинен общественной практике. Это значит, что, во-первых, потребности, мотивы, цель и результаты научно-технической деятельности, несмотря на относительную самостоятельность, детерминированы доминирующей в обществе *социальной рациональностью* и, во-вторых, в ее структуре должен присутствовать особый вид деятельности, обеспечивающий выход радиоло-

кационной теории в непосредственную инженерную практику. Таким видом деятельности является **радиолокационная системотехника**.

Переходя к разработке обобщенной структуры радиолокационной науки, следует иметь в виду, что методологический подход к решению этой науковедческой задачи не лежит на поверхности и оказывается не столь простым. Это связано со спецификой самой радиолокационной науки. Если ее объект представляет собой нечто непосредственно наблюдаемое (реальное) и в пространственно-временном отношении (пусть даже с изрядной долей условности) может быть как-то локализован, то этот эмпиризм мгновенно исчезает, как только радиолокационная наука сама предстает в качестве объекта изучения. Сразу же выясняется, что в пространственно-временном отношении локализовать ее не удастся и какими-либо сведениями о возможности представления научного радиолокационного знания в качестве некоторого эмпирического объекта методология радиолокации не располагает. Да и само понятие радиолокационной методологии до настоящего времени не попало в сферу пристального внимания научной рефлексии. Поэтому объекты, подобные радиолокационной науке, могут выступать как единое целое *только в виде соответствующей теоретической реконструкции*, в виде некоторой теоретической (концептуальной) схемы.

С учетом сказанного, а также с учетом обобщенной структуры научно-технической деятельности радиолокационная наука может быть представлена диалектическим единством двух научных РЛ систем (рис. 3.2)¹²²: а) системы, направленной на выявление и адекватное отражение специфики, сущности и основных закономерностей радиолокационного (энергоинформационного) взаимодействия, основанного на генерировании, излучении и приеме отраженных (переизлученных и/или излученных объектом локализации) электромагнитных волн (*теоретическая радиолокация*); б) основанной на закономерностях радиолокационного взаимодействия системы нормативов, методических схем, приемов инженерной (*системотехнической*) деятельности и ее методологии, направленной на разработку, проектирование, производство и техническую эксплуатацию РЛ систем (*радиолокационная системотехника*).

В свою очередь, каждая из этих важнейших научных РЛ систем имеет сложную внутреннюю структуру. Радиолокационная наука как научная система, отражающая специфику, сущность и основные закономерности радиолокационного взаимодействия представляет собой:

¹²² Ботов М.И., Вяхирев В.А. Методологические проблемы теории радиолокации // Радиолокация, радионавигация и связь : Материалы IX Междун. НК. Воронеж, 2003. С. 1383–1393; Ботов М.И., Вяхирев В.А. Науковедческие проблемы теории радиолокации // Проблемы развития и интеграции науки, профессионального образования и права в глобальном мире : Материалы II Всерос. НК. Красноярск, 2007. С. 243–250.



Рис. 3.2. Теоретическая (концептуальная) схема радиолокационной науки как нормативной системы с рефлексией

1) подсистему исторически развивающегося достоверного *научного радиолокационного знания*, адекватно отражающего элементы, структуру, системную динамику и общие закономерности радиолокационного взаимодействия (взаимодействия «объект радиолокации – зондирующий сигнал») средствами собственного понятийно-категориального и математического аппарата (научного языка);

2) подсистему *радиолокационной научно-исследовательской деятельности* профессионально подготовленных субъектов (ученых, научных групп, научных коллективов), направленной на получение достоверного научного радиолокационного знания;

3) подсистему институционально закрепленных радиолокационных *научно-организационных форм* (научных учреждений и соответствующих организационно-правовых норм), объединяющих, координирующих и регулирующих соответствующие виды научно-исследовательской деятельности;

4) подсистему внутринаучных и социально-культурных ценностей, отражающих мотивационно-ценностные и этические нормы собственно научной деятельности в области радиолокации (так называемый этос радиолокационной науки), а также внешние ценностные ориентиры развивающегося общества;

5) подсистему *научной радиолокационной рефлексии*, направленную на самоорганизацию и саморазвитие радиолокации как научной дисциплины.

Не менее сложную внутреннюю структуру имеет и *радиолокационная системотехника*. С одной стороны, в ней, как и в теоретической радиолокации, можно выделить свои подсистемы научного (конкретнее – научно-методологического) знания, научной деятельности, научной организации и научной рефлексии, с той лишь особенностью, что эти подсистемы связаны не с исследованием сущности радиолокационного (энергоинформационного) взаимодействия, как в первом случае, а с разработкой норм эффективной системотехнической деятельности по практической реализации основных закономерностей этого взаимодействия в форме конкретных РЛ систем и рефлексией самой инженерной деятельности.

С другой стороны, в этой составляющей радиолокационной науки необходимо выделить собственно инженерную деятельность, связанную с синтезом эмпирических схем, разработкой, проектированием, изготовлением опытных образцов и экспериментальной проверкой (эксплуатацией) вновь созданных радиолокационных устройств и систем техники. Ее теоретико-методологическим ядром является радиолокационная системотехника, которая на основании методологических принципов теоретической радиолокации разрабатывает свою фундаментальную теоретическую схему, отражающую предельно общие закономерности системотехнической (инженерной) деятельности. На основе этих закономерностей разрабатываются принципы синтеза эмпирических схем объектов, проектирования, конструирования, практического воплощения и оценки эффективности упомянутых радиолокационных устройств и систем.

В целом системотехническая составляющая радиолокационной науки (**радиолокационная системотехника**) как методология (теория системотехнического метода), а также система нормативов, методических схем и приемов системотехнической (инженерной) деятельности представляет собой:

а) подсистему методологического и инженерно-методического (проективного, конструкторского, частнометодического и эксплуатационно-технологического) научного знания, обеспечивающую синтез эмпирических схем, разработку, проектирование, изготовление опытных образцов и экспериментальную проверку (эксплуатацию) радиолокационных устройств и систем техники;

б) подсистему методологической и методической деятельности профессионально подготовленных субъектов (научных групп, коллективов инженеров-исследователей), направленную на получение эффективного методологического и инженерно-методического радиолокационного знания;

в) подсистему институционально закреплённых *инженерных организационных форм* (проектных лабораторий, конструкторских бюро и других организационно-правовых форм), объединяющую, координирующую и регулирующую соответствующие виды инженерной радиолокационной деятельности;

г) подсистему системотехнической рефлексии, обеспечивающую развитие методологического и инженерно-методического знания, а также эффективность инженерных разработок;

д) собственно инженерную (системотехническую) деятельность, связанную с синтезом эмпирических схем, разработкой, проектированием, изготовлением опытных образцов и экспериментальной проверкой (эксплуатацией) радиолокационных устройств и систем техники.

Эти абстрактные объекты (теоретическая радиолокация и радиолокационная системотехника, а также их компоненты) во взаимосвязи и взаимозависимости составляют теоретическую схему (**концептуальную модель**) радиолокации как научной дисциплины, которая отражает основные признаки дисциплинарной организации радиолокационного знания, даёт целостное представление об обобщённой структуре радиолокации и позволяет развернуть многочисленные и многоуровневые программы ее исследования.

Очевидно, что начальный этап развития радиолокации проходил в рамках простых методических схем «нижнего этажа» этой концептуальной модели, который по мере усложнения радиолокационных устройств и соответственно самой инженерной деятельности приобрёл относительную самостоятельность и стал постепенно складываться в подсистему инженерно-методического знания. Эта подсистема радиолокационного знания непрерывно усложнялась, развивалась и к середине XX века приобрела явные контуры знания научно-методического.

С возникновением более сложных системотехнических задач сформировавшееся научно-методическое знание вошло с этими задачами в глу-

бокое противоречие, оказавшись неспособным не только описать и адекватно объяснить вновь возникающие радиолокационные феномены, поскольку имело не сущностный (онтологический), а нормативно-деятельностный характер, но и успешно решать вновь возникающие задачи системотехники. Появилась необходимость, с одной стороны, в научном знании методологического уровня, а с другой – в научном знании принципиально иной природы, которое бы отражало не методологию, методику и нормы инженерной деятельности по синтезу, разработке, проектированию и т. д. радиолокационных устройств, а сущность природных процессов, вовлеченных в энергоинформационное взаимодействие и специфику их преломления в те или иные радиолокационные объекты.

Уровень методологического знания современной радиолокационной науки представлен радиолокационной системотехникой, а уровень сущностного (онтологического) знания – теоретической радиолокацией. Так возник «верхний этаж» радиолокационной науки, основная научная функция которого состоит в выработке научно-теоретического знания, отражающего сущность упомянутых природных процессов, и которое на уровне названного нами «нижнего этажа» могло быть переработано в методологию и более совершенные методики инженерной (системотехнической) деятельности.

Здесь следует заметить, что отсутствие в структуре радиолокационной науки (на этапе ее становления) явно выраженного теоретического уровня вовсе не означает, что радиолокационная инженерная деятельность протекала за пределами определенных теоретических представлений о характере РЛ взаимодействия и его специфики. Такое теоретическое знание несомненно присутствовало, но не в виде развитой радиолокационной научной теории, а виде некоторых обобщенных теоретических представлений, которые в современной науковедческой терминологии можно назвать научной радиолокационной картиной мира (НРЛКМ). Как пишет в этой связи В.С. Степин, «существует множество ситуаций, когда наука начинает исследовать соответствующую предметную область, не имея средств и возможностей создать конкретные теоретические схемы для ее объяснения. В таких ситуациях наука изучает свою область эмпирическими методами, накапливая необходимые опытные факты. Принципы картины мира ставят задачи исследованию, целенаправляют наблюдения и эксперименты и дают им объяснения»¹²³. Такая форма теоретического знания является составным компонентом наиболее общих теоретических представлений, называемых **основаниями радиолокационной науки**.

Взаимосвязь теоретической радиолокации с радиолокационной системотехникой и основаниями радиолокационной науки представлена на

¹²³ Стёпин В.С. Теоретическое знание. М., 2003. С. 249.

рис. 3.3. Очевидно, что каждый из уровней радиолокационной науки имеет относительную самостоятельность. Для них характерны свои специфические предметы научного исследования, свои научные теории с соответствующей эмпирической и концептуальной (теоретической) интерпретацией, свои научные картины мира, свои исследовательские процедуры и основания, свои внутренние взаимопереходы эмпирического знания в теоретическое и наоборот (взаимопереходы по вертикали) и свои формы научной рефлексии.

В то же время эти компоненты радиолокационной науки, сохраняя свою относительную самостоятельность и подчиняясь внутренним системным законам собственного функционирования и развития, оказываются охваченными сложной системой внешних связей и диалектических взаимопереходов (согласно рис. 3.3 – взаимопереходы по горизонтали). При этом радиолокационное *научно-теоретическое знание* как результат анализа фундаментальной теоретической схемы объекта в виде логически упорядоченной совокупности радиолокационных понятий и категорий, теоретических фактов, обобщений, законов, следствий и утверждений, *соответствующих критериям истинности*, трансформируются в методологические принципы системотехнической деятельности. Одновременно с этим системотехническое знание в форме эмпирических фактов, обобщений, идей и гипотез, снятых в процессе разработки, экспериментальной проверки и доводки новых РЛ систем, технологий или методик, *соответствующих критериям эффективности*, трансформируются в системотехническую основу радиолокационной теории.

Если системотехнический материал, снятый в процессе разработки и экспериментальной проверки вновь созданных РЛ систем и устройств, не противоречит основным утверждениям и следствиям теории радиолокации, она продолжает развиваться в рамках сложившейся фундаментальной теоретической схемы, всесторонне развиваясь и обогащаясь новыми эмпирическими фактами, идеями и гипотезами.

Если же этот материал начинает противоречить основным утверждениям и следствиям теории, происходит пересмотр, переработка теоретических конструктов или системы связей фундаментальной схемы теоретической радиолокации, вплоть до изменения оснований самой радиолокационной науки или НРЛКМ с последующей разработкой новой фундаментальной теоретической схемы, выдвижением новых научных радиолокационных идей и гипотез, их экспериментальной проверкой и согласованием с имеющимся и вновь возникающим системотехническим материалом. Этот сложный исторически противоречивый процесс взаимодействия и диалектических взаимопереходов двух относительно самостоятельных форм существования РЛ науки отражает бесконечную спираль ее функционирования и саморазвития.

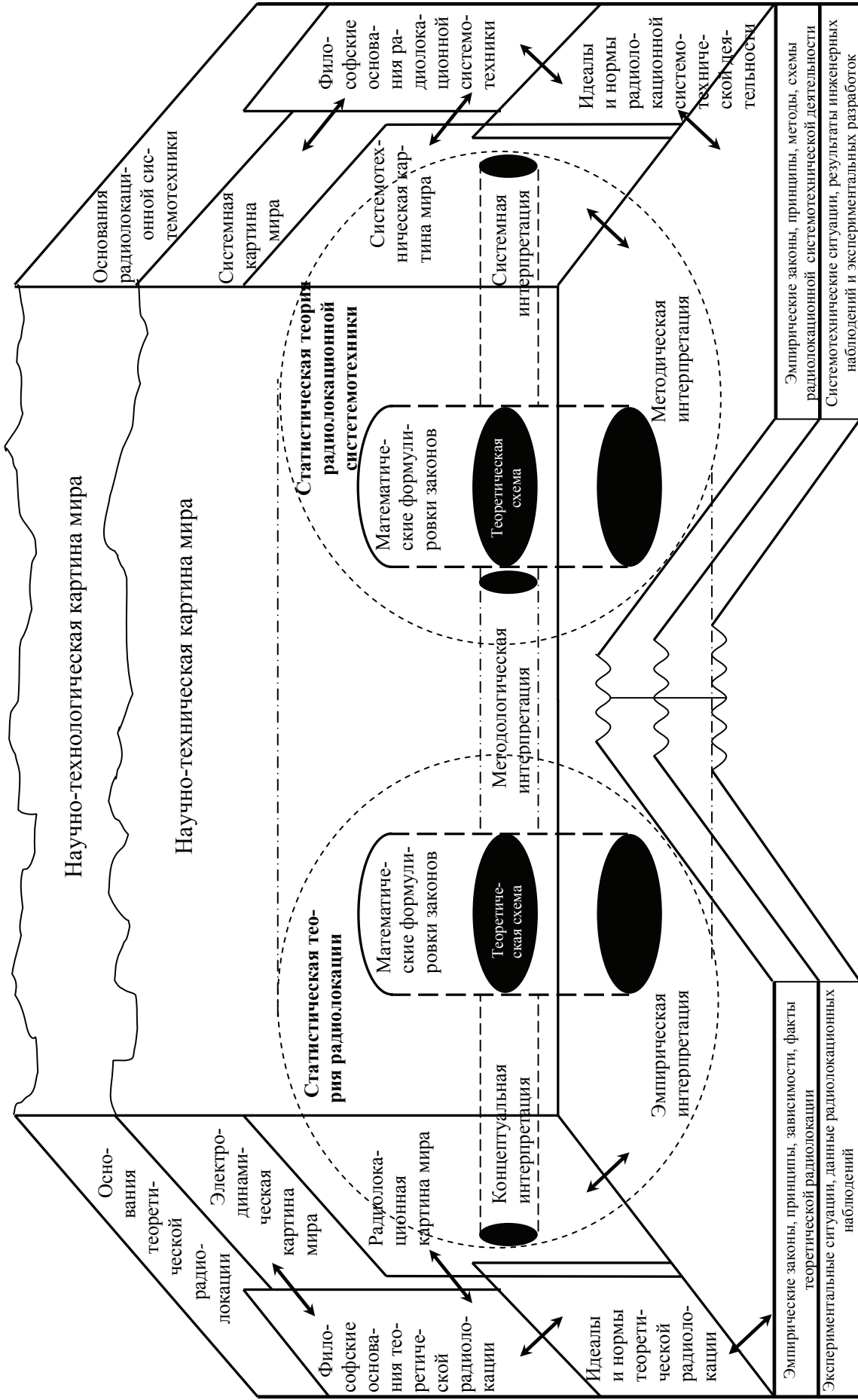


Рис. 3.3. Взаимосвязь теоретической радиолокации с радиолокационной системотехникой и основаниями радиолокационной науки

Таким образом, помимо рассмотренных взаимопереходов научного знания «верхнего этажа» (теоретической радиолокации) в научное знание «нижнего этажа» (радиолокационной системотехники) и наоборот, в каждом из этих «этажей» существуют внутренние взаимопереходы теоретического знания в эмпирическое и наоборот, *невероятно усложняя* (по сравнению с естественно-научными дисциплинами) понимание структуры радиолокационной науки, ее основных закономерностей функционирования и развития.

Исследуя взаимосвязь теоретической радиолокации с радиолокационной системотехникой и основаниями радиолокационной науки, представленной на рис. 3.3, необходимо сделать еще одно важное замечание.

Очевидно, что формирующаяся вокруг этой системы взаимосвязей отрасль научного радиолокационного знания носит явно выраженную рефлексивную природу. Она неуклонно расширяет свою предметно-проблемную область, выделяя в них в качестве относительно самостоятельных: а) проблему разработки онтологических и ценностных оснований радиолокационной науки (проблему разработки научных радиолокационных картин мира, идеалов научности и философских оснований); б) проблему разработки познавательных (методологических) оснований (норм организации научно-исследовательской деятельности, объяснения и описания объекта, доказательности и обоснованности научного радиолокационного знания); в) проблему разработки когнитивных (знаниево-рефлексивных) оснований (норм организации и систематизации научного радиолокационного знания); г) проблему разработки системы нормативов, регулирующих радиолокационную системотехническую деятельность и обеспечивающих ее *эффективность*; д) проблему разработки социальных оснований, включающую проблему социальной организации радиолокационной науки и проблему этики научной радиолокационной деятельности; е) проблему взаимосвязи фундаментальных схем радиолокационных теорий (статистической теории теоретической радиолокации и статистической теории радиолокационной системотехники) со своими научными картинками мира; ж) проблему концептуальной, эмпирической и инженерной интерпретации соответствующих фундаментальных теоретических схем. Некоторые фрагменты этой рефлексивной отрасли радиолокационного знания, в частности, основания радиолокационной науки, будут рассмотрены ниже.

В рамках обобщенной структуры радиолокационной науки (рис. 3.2, 3.3) можно указать на конкретные сферы инженеров в области радиотехники и радиолокации. Очевидно, что теоретическая радиолокация является предметом упомянутых выше *ученых-инженеров* (кандидатов и докторов наук). Методология системотехнической деятельности и принципы ее

трансформации в проектную деятельность являются предметом *инженеров-ученых* (магистров). Деятельность, связанная преимущественно с синтезом эмпирических схем, разработкой, проектированием, изготовлением опытных образцов и экспериментальной проверкой радиолокационных устройств и систем техники, является предметом *инженеров по радиотехнике* с пятигодовым сроком обучения (в современной терминологии – специалистов). Наконец, деятельность, связанная преимущественно с эксплуатацией радиолокационных устройств и систем техники, является предметом *инженеров по эксплуатации* с четырехлетним сроком обучения (бакалавров).

В контексте нашего дальнейшего исследования из всей представленной выше структуры радиолокационной науки наибольший интерес представляет радиолокация как система научного знания, в которой основополагающее значение имеют его формы и структура. Получению же научного знания предшествует *проблемная ситуация*, представляющая собой совокупность отношений между необходимостью и возможностью возникновения нового научного радиолокационного знания, достигших формы противоречия: с одной стороны, имеющийся массив и уровень развития научного радиолокационного знания, а с другой – необходимость и невозможность на его основе описать и объяснить вновь открытые явления радиолокации, фрагменты радиолокационной реальности и/или радиолокационной системотехники.

Рассмотрим формы и структуру научного радиолокационного знания, полагая, что соответствующие признаки радиолокационного системотехнического знания могут быть исследованы аналогично.

Формы научного радиолокационного знания включают:

1) *научный радиолокационный факт* – форма объективно-достоверного научного знания о сущности радиолокационного взаимодействия в виде некоторого предложения (позитивного утверждения). Определенная совокупность таких фактов выступает в качестве эмпирического основания (базиса) радиолокационной науки;

2) *научная радиолокационная проблема* – форма научной задачи, обязательным условием которой является разрешение противоречия между необходимостью новых научных радиолокационных знаний и невозможностью их получения на базе существующих теоретических представлений, средств и методов научно-технического познания;

3) *научная радиолокационная гипотеза* – форма вероятно достоверного научного радиолокационного знания в виде предположений, догадок или предсказаний о существовании неизвестных ранее радиолокационных явлений, скрытых причинах их возникновения, закономерных связях и отношениях;

4) *научная радиолокационная идея* – выраженная аналитическим или понятийно-категориальным языком радиолокации форма научного знания, эвристически и целостно объясняющая сущность энергоинформационного (радиолокационного) взаимодействия или объекта исследования теоретической радиолокации на уровне основных принципов или общих закономерностей радиотехнической науки;

5) *научная радиолокационная метафора* – форма неявного (первоначального, эмпирического) научного радиолокационного знания, обеспечивающая перенос некоторой системы смыслов методом аналогии из смежных областей науки в область радиолокации с целью экономии ресурсов и усилий специалистов при формировании теоретических представлений о сущности энергоинформационного взаимодействия;¹²⁴

6) *научный радиолокационный закон* – одна из высших форм научного радиолокационного знания, отражающая существенные, устойчивые, повторяющиеся и инвариантные связи между радиолокационными явлениями, выраженная отношениями (системой) понятий и категорий теоретической радиолокации или некоторым аналитическим выражением;

7) *научная радиолокационная концепция* – системная форма организации научного радиолокационного знания, отражающего сущность того или иного фрагмента радиолокационной действительности или совокупности фрагментов этой действительности; неразвитая, незрелая форма научной радиолокационной теории (предтеория). Научная концепция вводит в формирующееся радиолокационное знание определенный способ дисциплинарного видения упомянутых фрагментов действительности и соответствующие допущения, которые далеко не всегда четко описываются, истолковываются и понимаются (что было особенно заметно на начальном этапе становления радиолокации как научной дисциплины), но без которых невозможно либо существенно затруднительно развертывание представляемой идеи в концептуальной основе теории и, следовательно, основного массива теоретического знания, адекватно описывающего и объясняющего рассматриваемые фрагменты радиолокационной реальности в системе понятий и категорий;

8) *научная радиолокационная теория* – высшая системная форма организации научного радиолокационного знания, всесторонне, достоверно

¹²⁴ Научные метафоры составляют весьма значительную часть понятийно-категориального аппарата (научного языка) теоретической радиолокации. Они позволяют без строгого логического определения соответствующих понятий сформировать достаточно четкое и исчерпывающее представление (описание) сущности энергоинформационного взаимодействия с помощью общеизвестных слов. Пример: «радиолиния», «плотность вероятности», «радиолокационный канал», «радиолокационное поле», «радиолокационная цель», «радиолокационное наблюдение» и др.

и адекватно описывающая и объясняющая сущность радиолокационного (энергоинформационного) взаимодействия сигнала и объекта локации собственными аналитическими средствами или средствами понятийно-категориального аппарата (научного языка) радиолокации.

9) НРЛКМ – исторически сложившаяся система образно-модельных представлений о радиолокационной реальности, выработанная научным радиолокационным познанием и выраженная в некоторой системе понятий, категорий, принципов, эмпирических законов и гипотез радиолокационной науки, имеющих для частных отраслей радиолокации междисциплинарный статус. Она представляет собой обобщенную схему или образ радиолокационного взаимодействия (картину радиолокационной реальности), определяющую: а) фундаментальные объекты, из которых при последующем их развертывании могут быть построены все другие объекты радиолокационной науки; б) типологию изучаемых объектов; в) общие закономерности их взаимодействия; г) специфику взаимосвязи радиолокационной науки с другими науками радиотехнического дисциплинарного комплекса. Поэтому НРЛКМ выступает, с одной стороны, как обобщенная системная характеристика предмета исследования радиолокационной науки, а с другой – как исходная (предельно общая) форма системной организации научного радиолокационного знания, органически включающая радиолокационную теорию в широкой радиотехнический и естественно-научный контекст.

Известно, что рост теоретического знания радиолокационной науки, подобно развитым отраслям естественно-научного знания, осуществляется не просто как накопление и обобщение опытных фактов, но как использование в этом процессе некоторых теоретических понятий и структур, развитых в предшествующих теориях и применяемых при обобщении опытных данных. И только по этой причине современная научная радиолокационная теория постепенно перерастает в целостную динамическую систему, взаимодействующую со своими эмпирическими фактами и, следовательно, нуждающуюся в некотором системообразующем факторе, который бы закрепил, конституировал эту целостность научного радиолокационного знания. В качестве такого системообразующего фактора как раз и выступает НРЛКМ.

Структура научного радиолокационного знания такова, что каждая из приведенных выше форм в диалектически снятом виде включает в себя все предыдущие формы знания, а субъекты радиолокационной науки (ученый-исследователь, инженер-исследователь и др.), независимо от того, осознают они это или нет, вынуждены строить свою научную деятельность таким образом, чтобы последовательно проходить эти этапы становления и развития научного радиолокационного знания.

На основании представленных выше рассуждений можно сформулировать **обобщенные функции** радиолокационной науки. Очевидно, что они имеют некоторый инвариант, соответствующий любой естественнонаучной дисциплине. К этому инварианту следует отнести *описательную, объяснительную и предсказательную (прогностическую)* функции. В то же время, объектом радиолокационной науки, в отличие, например, от теоретической физики, является (как уже отмечалось) не сущность природных процессов и явлений самих по себе, а возможные формы, методы и технологии включения этих природных процессов и явлений в целесообразную техническую деятельность человека. Поэтому помимо упомянутого инварианта, радиолокационная наука имеет свои специфические функции, к которым следует отнести *преобразующую, социально-культурную и прагматическую* функции.

3.2.4. Понятие оснований радиолокационной науки

Рассмотренное выше научное радиолокационное знание представляет собой целостную исторически развивающуюся систему. Как всякая система это научное знание нуждается в системообразующем факторе, который призван отразить специфику взаимодействия двух уровней радиолокационной теории (статистической теории радиолокации и статистической теории радиолокационной системотехники) с радиолокационными эмпирическими фактами, гипотезами, эмпирическими закономерностями, принципами и закономерностями системотехнической деятельности, обеспечивая целостность радиолокационной науки и ее теории. Таким системообразующим фактором выступают **основания радиолокационной науки**, которые включают: а) научную радиолокационную картину мира, б) идеалы и нормы радиолокационного научного познания, в) философские основания радиолокационной науки (рис. 3.3). Эти компоненты выражают общие представления о специфике предмета научного радиолокационного исследования, об особенностях радиолокационной познавательной деятельности, осваивающей тот или иной тип объекта радиолокации, а также представления о характере связей радиолокационной науки с радиотехническим научно-дисциплинарным комплексом и базовой естественнонаучной теорией. Они же, во взаимосвязи с этическими нормами научной деятельности, выступают и как ценности радиолокационной науки.

Понятие научной радиолокационной картины мира.

В современном науковедении *научная картина мира* рассматривается одновременно и как форма научного теоретического знания, репрезентирующая (представляющая, отражающая) предмет исследования той или иной научной дисциплины соответственно определенному историческому

этапу ее развития (так называемая дисциплинарная онтология), и как некоторая форма интеграции, посредством которой происходит системная организация конкретных научных знаний, полученных в процессе научного поиска.

Вводя понятие НРЛКМ, важно иметь в виду рассмотренную ранее двухуровневую структуру радиолокационной науки: а) уровень теоретической радиолокации, где протекают процессы переработки тех или иных положений, выводов и рекомендаций базовой естественно-научной теории в основные идеи, законы и закономерности научной радиолокационной теории; б) уровень радиолокационной системотехники, где протекают процессы переработки основных положений, выводов и рекомендаций научной радиолокационной теории в принципы, методы и нормы системотехнической деятельности. Соответственно этому и НРЛКМ (в отличие от научной картины мира естественных наук) оказывается представленной двумя уровнями (разновидностями): научной радиолокационной картиной мира теоретической радиолокации и б) научной картиной мира радиолокационной системотехники (рис. 3.3).

НРЛКМ теоретической радиолокации представляет собой исторически сложившуюся систему образно-модельных представлений о сущности радиолокационного взаимодействия, выработанную научным радиолокационным познанием и выраженную в некоторой системе радиолокационных понятий, категорий, принципов, эмпирических схем, радиолокационных законов и гипотез, имеющих для частных отраслей радиолокации общетеоретический (общедисциплинарный) статус. Другими словами, она представляет собой обобщенную схему или образ радиолокационного взаимодействия (картину радиолокационной реальности), определяющую: а) фундаментальные объекты радиолокационного взаимодействия, из которых при последующем их развертывании могут быть построены все другие объекты радиолокационной науки; б) типологию этих объектов; в) общие закономерности их взаимодействия в процессе зондирования пространства; г) специфику взаимосвязи радиолокационной науки с другими науками радиотехнического дисциплинарного комплекса, а также с базовой естественно-научной теорией.

Рост радиолокационного теоретического знания, подобно развитым отраслям естественных наук, осуществляется не просто как накопление и обобщение опытных фактов, но как использование в этом процессе некоторых теоретических понятий, развитых в предшествующих теориях и применяемых при обобщении опытных данных. В то же время современная научная радиолокационная теория, постепенно перерастая в целостную динамическую систему, взаимодействующую со своим эмпирическим базисом, остро нуждается в некотором системообразующем факторе, кото-

рый бы закрепил, конституировал целостность научного радиолокационного знания. Поэтому, как и научная картина мира вообще, НРЛКМ теоретической радиолокации выступает, с одной стороны, как обобщенная системная характеристика предмета исследования радиолокационной науки (системная характеристика сущности радиолокационного взаимодействия), а с другой – как исходная (предельно общая) форма системной организации научного радиолокационного знания, органически включающая радиолокационную теорию и в общую теорию радиотехники, и в базовую естественно-научную теорию.

Научная картина мира радиолокационной системотехники представляет собой исторически сложившуюся систему образно-модельных представлений: а) о сущности, обобщенной структуре, наиболее общих закономерностях построения, функционирования и развития устройств и систем радиолокации (так называемой радиолокационной технической реальности); б) о методологии преобразования научного знания теоретической радиолокации в совокупность принципов, методов, норм системотехнической деятельности; в) об обобщенной схеме метода радиолокационной системотехники, связанного с проектированием, конструированием, отладкой технических устройств, стыковкой и интеграцией частей проектируемой системы в единое целое.

Если НРЛКМ теоретической радиолокации опирается на естественно-научную картину мира, то научная картина мира радиолокационной системотехники – на системную картину мира (рис. 3.3).

Понятие идеалов и нормы научного радиолокационного познания.

В силу двойственного характера радиолокационной науки (радиолокация как система научного знания о сущности радиолокационного взаимодействия и радиолокация как системотехническая деятельность) идеалы и нормы научного радиолокационного познания (идеалы и нормы научности) также имеют двухуровневую структуру, включающую: а) установку на получение *истинного* знания о сущности радиолокационного взаимодействия и установку на развитие, рост этого знания; б) установку на обеспечение *эффективности* радиолокационной системотехнической деятельности.

В первом случае (уровень теоретической радиолокации) в идеалах и нормах научного радиолокационного познания можно выделить два взаимосвязанных блока, характеризующих радиолокационную науку как познавательную деятельность: а) познавательные установки, которые регулируют процесс воспроизведения сущности радиолокационного взаимодействия в различных формах научного радиолокационного знания; б) познавательные и методологические установки самой научной исследовательской деятельности.

В свою очередь, в блоке познавательных (когнитивных) оснований радиолокационной науки можно выделить следующие основные идеалы и нормы: 1) объяснения и описания объектов радиолокационной науки; 2) доказательности и обоснованности радиолокационного знания; 3) построения и системной организации радиолокационного знания. Эти идеалы и нормы в совокупности образуют своеобразную схему метода (познавательные и методологические установки) научной исследовательской деятельности, обеспечивающего добывание научного знания о сущности радиолокационного взаимодействия.

Во втором случае (уровень радиолокационной системотехники) речь идет о некоторой системе нормативов, регулирующей радиолокационную системотехническую деятельность и обеспечивающей ее *эффективность*. Эта система характеризуется нормой, объектом нормативного управления и регуляции, субъектом нормирования, а также содержанием, характером, условиями приложения и функциями нормы.

Норма радиолокационной системотехнической деятельности включает: а) исторически обусловленную систему руководящих начал, правил, предписаний или образцов, регулирующих деятельность субъектов радиолокационной науки (упоминавшихся ранее инженеров-ученых, инженеров-системотехников и др.) по теоретическому синтезу, проектированию, конструированию, отладке технических устройств, стыковке и интеграции частей проектируемой системы в единое целое; б) процедуру оценки результатов и эффективности этой деятельности.

Объект нормативного управления и регуляции – средства и методы системотехнической деятельности.

Субъект нормирования – представители радиолокационной науки различных форм и уровней системной организации.

Содержание нормы – некоторая система конкретных действий, операций и т.д., непосредственно раскрывающая состав и структуру основных видов системотехнической деятельности.

Характер нормы – признак, указывающий на предписывающую, разрешительную или запретительную направленность соответствующей нормы.

Условия приложения нормы – совокупность познавательных или проективно-технологических обстоятельств, в которых должна или не должна выполняться системотехническая деятельность.

Функция нормы – организация и регуляция деятельности по теоретическому синтезу, проектированию, конструированию, отладке технических устройств, стыковке и интеграции частей проектируемой системы в единое целое, а также по оценке результатов и эффективности системотехнической деятельности.

Рассмотренные выше идеалы и нормы теоретической радиолокации и радиолокационной системотехники характеризуют радиолокационную науку как познавательную и системотехническую деятельность. Вместе с тем радиолокационная наука как любая научная дисциплина представляет собой и некоторый социальный институт. В этом своем качестве она, помимо рассмотренных когнитивных оснований, опирается на социальные основания, которые включают: а) этику научных радиолокационных исследований (проблемы мотивации прихода именно в радиолокационную науку, выбора объекта, предмета, темы и методов исследования, выбора гипотезы и процедур ее подтверждения или опровержения, процедур проверки результатов и экспертизы); б) этику научных публикаций по радиолокационной тематике (проблемы соавторства, цитирования и рецензирования, достаточности для подтверждения научности и приоритета); в) этику научной дискуссии, полемики и критики как свободного и корректного столкновения системы идей противоположных научных школ, направлений, подходов, идей, точек зрения, научных гипотез и т. д.

Социальные основания в опоре на когнитивные отражают самоорганизацию и самоуправление деятельности ученых, научных коллективов и учреждений как компонентов человеческого общества. В рамках этих оснований профессиональная деятельность ученых исторически вырабатывает свои идеалы и нормы саморегуляции науки, выступающие в форме некоторых этических кодексов, называемых этосом радиолокационной науки.

Обобщая сказанное, *под идеалами и нормами радиолокационной науки* будем понимать (рис. 3.1) совершенную (концептуальную) цель и прообраз некоторого множества соответствующих этой цели норм организации и саморегуляции: а) научно-исследовательской и научно-рефлексивной видов деятельности, их эмпирических и теоретико-методологических оснований; б) радиолокационной системотехнической деятельности, связанной с разработкой проектов новых радиолокационных систем и технологий; в) социально-психологических, этических, информационных и других отношений в социальной организации, интеграции и функционировании научного радиолокационного сообщества и социального института радиолокационной науки в целом. Эта структура идеалов и норм репрезентирует радиолокационную науку как некоторую нормативную систему с рефлексией, в которой теоретический и проективно-технологический (системотехнический) компоненты составляют единое целое, а разработка более эффективных радиолокационных систем, технологий и методик их применения выступает главной научно-радиолокационной целью и ценностью.

Понятие о философских основаниях радиолокационной науки.

Философские основания радиолокационной науки обеспечивают «стыковку» НРЛКМ, ее идеалов и нормативных структур с идеалами нау-

ки, сложившимися к данному этапу ее развития, а также с мировоззренческими представлениями о сущности радиолокационного взаимодействия. В них принято выделять две взаимосвязанные подсистемы: а) онтологическую, представленную системой категорий «вещь», «свойство», «отношение», «взаимодействие», «движение», «качество – количество», «причина – следствие», «необходимость – случайность» и т. д., которые служат своеобразной матрицей познания и понимания сущности исследуемых радиолокационных объектов, и б) эпистемологическую (знаниевую), выраженную категориальными схемами, которые характеризуют познавательные процедуры и их результат (понимание истины, системотехнического метода, научного радиолокационного знания, объяснения, доказательства, радиолокационной теории, факта и т. д.).

Каждая категория представленных подсистем отражает соответствующие фрагменты радиотехнической реальности, а также ступени ее познания и заслуживает отдельного обсуждения. Однако, как это указывалось в параграфе 1.1, центральное место в этих категориальных структурах принадлежит категории **«радиолокационное взаимодействие»**, так как возникновение, функционирование и развитие любого объекта связано с взаимным воздействием среды на объект, а объекта – на среду, то есть с их взаимодействием. Поэтому сущность радиолокации и как некоторого технико-технологического феномена, и как научной дисциплины может быть понята только с выявлением специфики взаимодействия тех природных объектов и процессов, которые задействованы в соответствующих радиолокационных устройствах и системах. Рассмотрим специфику радиолокационного взаимодействия более подробно.

Как известно, при соответствующем выборе взаимодействующих систем характер взаимодействия безотносительно к природе этих систем (физической, химической, биологической или социальной) может принимать одну из двух возможных форм: а) одна сторона оказывает преимущественно действие (воздействие), а вторая, воспринимающая и отражающая это внешнее для нее воздействие, входит в режим самодвижения; б) собственно взаимодействие, когда вторая сторона под этим внешним воздействием изменяется и своим изменением преобразует первую сторону (систему).

Первый (статический) тип отражения подчиняется действию упоминавшейся ранее физической причинности, основанной на *вещественно-энергетическом* взаимодействии. Второй (динамический) тип отражения подчиняется действию сигнально-информационной причинности и основан на *информационном* взаимодействии. Эти два типа отражения находятся в диалектической взаимосвязи, при которой второй тип отражения органически включает в себя первый.

При втором типе отражения передача информации может происходить также в двух вариантах. Первый вариант – обратным воздействием отражателя на внешнее воздействие можно пренебречь, то есть отражающая система взаимодействует со средой по линейному закону. При этом количественные отношения и структуры передаются в неизменном виде, а информационное взаимодействие принимает форму *информационного воздействия*. Вторым вариантом – вектором обратного воздействия пренебречь невозможно или нецелесообразно, то есть отражающая система взаимодействует со средой по нелинейному закону. Информация от объекта к активной системе и обратно передается в этом случае в преобразованном виде, а отмеченное взаимодействие выступает в форме собственно *информационного взаимодействия*.

Таким образом, всякое взаимодействие сопровождается *отражением*, характер которого связан с *видом* взаимодействия и *природой* взаимодействующих объектов (систем). Для отражательных систем (эргатических систем и биологических систем, в первую очередь людей) основной формой взаимодействия является *взаимодействие информационное*, основной предмет и цель которого – информация.

Очевидно, что в основу функционирования радиолокационных устройств положены оба вида взаимодействия. При этом второй вид взаимодействия оказывается ведущим, поскольку в диалектически преобразованном виде включает в себя и первый вид взаимодействия. Так, объект радиолокации (например, воздушная цель) может проявлять свойство пассивного диффузного отражателя в ответ на облучение его зондирующим сигналом (активная радиолокация с активным ответом). Этот же объект может проявлять свойства динамического направленного отражателя, подчиняющегося действию сигнальной информационной причинности (переизлучение эхо-сигнала в случае активной локации с активным ответом). Наконец, он же может оказывать на РЛС и энергоинформационное воздействие в случае постановки активных или пассивных помех в ответ на попытку его обнаружения со стороны РЛ системы.

Очевидна и физическая природа взаимодействующих объектов. С одной стороны, – это собственно воздушные, наземные и другие объекты радиолокации, помещённые в реальную внешнюю среду со всеми характерными для этой среды нелинейными эффектами. С другой стороны, это зондирующий сигнал электромагнитной природы, основным параметром которого является энергия. Последнее обстоятельство нашло теоретическое отражение в уравнении радиолокации, где энергетические характеристики зондирующего сигнала относятся к основным параметрам радиолокационного канала, а также в специфике радиолокационного взаимодействия, которое носит явно выраженный **энергоинформационный** характер. Это же

обстоятельство, в конечном счёте, предопределяет и уровень структурной организации, и энергоёмкость радиолокационных систем: если основные компоненты, например, радиoliniи (передатчик и приёмник) в технической реализации представлены несколькими блоками радиоаппаратуры, то эти же компоненты радиолокационного канала – несколькими шкафами или многотонными автомобильными прицепами с соответствующей аппаратурой.

В то же время необходимо иметь в виду, что рассматриваемое нами взаимодействие является не результатом действия стихийных сил природы, подобно действию потоков воздуха земной атмосферы на облако гидрометеоров, а носит специально организованный характер. Поэтому радиолокационное взаимодействие, как всякое организованное человеком взаимодействие (помимо естественных законов и соответствующих принципов физической и информационной причинности), подчиняется определённым законам **технологии** человеческой деятельности (принципу технологической причинности, рассмотренному ранее).

Именно **двойственный характер** радиолокационного взаимодействия (одновременное подчинение и естественным законам, и законам технологии человеческой деятельности) предопределяет рассмотренные выше двухуровневый характер радиолокационной науки и двойственную природу радиолокационных систем. С одной стороны, радиолокационные системы в своем строении и функционировании задействуют модифицированные объекты природы или преобразованные природные процессы и в этом своем качестве опираются на естественно-научное в первую очередь физическое знание. В этом случае дисциплинарной онтологией (научной картиной мира) для радиолокационной науки выступает естественно-научная (физическая) картина мира. С другой стороны, любая радиолокационная система выступает как некоторое средство человеческой деятельности и строится по законам технологии этой деятельности. Поэтому радиолокационная наука в этом своем качестве опирается на технологическое знание. Дисциплинарной же онтологией в этом случае выступает технологическая (в более частном случае – системная и системотехническая) картина мира, а развитие радиолокационных систем подчиняется общим законам технологии.

На рис. 3.3 последнее обстоятельство нашло свое отражение в том, что системотехническая картина мира оказалась «вложенной» в системную, системная – в техническую, а техническая, в свою очередь, – в технологическую. Доминирование технологической научной картины мира над технической связано с первичностью технологии относительно техники: прежде чем построить некоторое техническое устройство или систему, необходимо разработать соответствующую технологию. По этой причине

радиолокационная техника представляет собой не что иное, как материализованную технологию использования человеком природных (электромагнитных, электрических, механических и т. п.) процессов с целью получения информации об интересующих его объектах с помощью методов и средств радиолокации.

Из принципа технологической причинности вытекает и еще одно важное свойство радиолокационного взаимодействия и, следовательно, специфика развития радиолокационных систем и радиолокационной науки. Как отмечалось в параграфе 1.1, *качественное изменение* в технологическом процессе (что является основным законом технологии) связано с *изменением характера взаимодействия на уровне элементарного технологического взаимодействия*, то есть на уровне той части технологического средства, которое непосредственно воздействует на предмет технологического воздействия и вызывает в нем соответствующие изменения. Это означает, что принципиальные изменения качественных показателей (боевых возможностей) радиолокационных систем связаны: а) с принципиальными изменениями в характере технологического взаимодействия на уровне «зондирующий сигнал – объект радиолокации», б) с принципиальными изменениями в структуре самого технологического средства (зондирующего сигнала). В первом случае речь идет о применении различных методов радиолокации, включая разнесенный прием отраженных или излученных целью сигналов многопозиционными системами. Во втором случае речь идет о совершенствовании структуры и параметров самого зондирующего сигнала. Например, применение в радиолокации сверхширокополосных сигналов позволило не только улучшить показатели качества обнаружения объекта, но и придать РЛ системе новое функциональное качество – разрешение сигналов и распознавание классов объектов. Понятно, что появление новых функций предполагает и структурное усложнение радиолокационной системы.

Факт принципиальной зависимости боевых возможностей радиолокационных систем от соответствующих изменений в характере радиолокационного взаимодействия и структуре самого технологического средства (зондирующего сигнала) предопределяют (как уже отмечалось) двухуровневую структуру радиолокационной науки, один из уровней которой (уровень теоретической радиолокации) как раз и отражает общие закономерности рассмотренного энергоинформационного взаимодействия.

Итак, рассмотренные выше представления об основаниях радиолокационной науки, то есть устойчивая к настоящему времени система теоретических, методологических и отчасти мировоззренческих идей радиолокационной науки, а также норм, правил и принципов радиолокационной системотехнической деятельности, составляют *стиль современного инженерного радиолокационного мышления*.

3.3. Структура и функции теории радиолокации

3.3.1. Обобщенная структура теории радиолокации

Теория радиолокации является высшей системной формой организации научного радиолокационного знания, обеспечивающего достоверное и адекватное описание и объяснение закономерностей радиолокационного наблюдения объектов средствами собственного понятийно-категориального и математического аппарата (научного языка). Как всякая научная теория она характеризуется совокупностью *существенных признаков* (предметностью, адекватностью, интерпретируемостью, проверяемостью, истинностью, системностью), наделена соответствующими *функциями* (описательной, объяснительной, систематизирующей, эвристической и прогностической) и имеет свою *структуру*.

Структура теории радиолокации в наиболее общих и существенных признаках включает в себя (рис. 3.4):

1. *Исходную эмпирическую основу* – множество эмпирических фактов, обобщений, классификаций, типологий и эмпирических законов радиолокационного взаимодействия, часть из которых может выполнять функцию принципов, на которых формируется теория радиолокации.

2. *Концептуальную основу*, включающую теоретические модели (схемы) исследуемого объекта (радиолокационного взаимодействия). Теоретическая модель строится из элементарных абстрактных объектов (теоретических конструктов). Различные связи и отношения между абстрактными объектами образуют теоретические схемы или математические модели, совокупность которых и составляет концептуальную основу научной теории радиолокации.

3. *Смысловую языковую основу*, включающую: исходные понятия (научные метафоры), промежуточные и завершающие понятия и категории теоретической радиолокации, частные аналитические выражения, первичные гипотезы, постулаты (аксиомы), принципы, общие законы теории, в совокупности описывающие и объясняющие ее (теории) абстрактные объекты, теоретические схемы и математические модели.

4. *Логико-методологическую основу*, включающую совокупность допустимых в рамках теоретической радиолокации принципов, правил, методических схем рационального преобразования исходного эмпирического материала в теоретические конструкты и абстрактные схемы объекта, а также совокупность правил логического вывода и доказательств, включая механизмы построения и развития научного радиолокационного знания.

5. *Основной массив научно-теоретического радиолокационного знания*, включающий совокупность выведенных в теории законов, принципов, следствий и утверждений с их доказательствами.

Концептуальная основа в форме развернутой теоретической модели (схемы) исследуемого объекта (рис. 3.4) выполняет роль системообразующего структурного каркаса радиолокационного знания. Она опирается на эмпирическую основу теории (совокупность результатов наблюдений тех или иных приборных ситуаций и соответствующих им частных *эмпирических* схем) и строится из элементарных абстрактных объектов (теоретических конструкторов), устойчивые, существенные, повторяющиеся связи и отношения которых создают частные *теоретические* схемы.

Каждой из этих теоретических схем соответствует определенная закономерность, представленная в форме аналитического выражения. На основании этих закономерностей выводится основной массив теоретического знания, формулируются принципы, с помощью которых: а) разрабатываются методы радиолокационной системотехники; б) создаются частные теоретические схемы более высокого уровня абстракции и идеализации, направленные на внутреннее развитие теории и формирование *фундаментальной теоретической* схемы объекта теоретической радиолокации.

3.3.2. Фундаментальные теоретические схемы радиолокации и их практические приложения

Фундаментальная схема любой научной теории является логически предельным уровнем обобщения ее частных теоретических схем. Она включает в себя исходные принципы, универсальные для данной теории законы с их аналитическим описанием, основные смыслообразующие категории, понятия, аналитические выражения, их связи и отношения. Функционирование этой схемы направлено на следующее: формирование основного массива теоретического знания; развертывание теории в соответствии со строгими закономерностями дедуктивного синтеза и силлогизма как важнейшей формы движения мысли от абстрактного к мысленно конкретному; непосредственное генерирование и более или менее полную систематизацию основного массива научного знания внутри теории¹²⁵.

В фундаментальной теоретической схеме теоретические конструкторы (предельно общие категории данной научной дисциплины и их математические аналоги), в силу формально-логических операций абстрагирования и идеализации, теряют непосредственную связь с эмпирической основой теории и, следовательно, в значительной степени лишены онтологической (сущностной) «нагрузки». Поэтому в схеме и в целом в структуре научной теории они выполняют чисто познавательные (гносеологические) функ-

¹²⁵ Ботов М.И., Вяхирев В.А. Фундаментальная теоретическая схема радиолокации и ее практические приложения // Проблемы развития и интеграции науки, профессионального образования и права в глобальном мире : Материалы II Всерос. НК. Красноярск, 2007. С. 250–255.

ции, создавая соответствующий познавательный инструмент и язык описания, которые обеспечивают последовательный переход от одного уровня теоретической работы к другому.

Материал предшествующих глав представляет собой последовательное описание тех или иных приборных ситуаций и наблюдений, обобщение и анализ которых приводит к соответствующим эмпирическим схемам и закономерностям (рис. 3.4). Любой разрешенной проблемной ситуации, например, расчету зоны обнаружения РЛС или разработке системы защиты от пассивных помех, соответствуют свои приборные ситуации, свои результаты наблюдения и свои частные эмпирические схемы. Отсюда и вероятностная достоверность полученных результатов.

Очевидно, что постепенное обобщение частных эмпирических схем и соответствующих эмпирических фактов, эмпирических закономерностей и принципов создает предпосылки для построения той или иной частной теоретической схемы, теоретико-методологические возможности которой несоизмеримо богаче предыдущей. В логическом пределе можно выйти на проблему построения фундаментальной теоретической схемы. Этим эволюционным путем построения собственных теорий, включая построение собственных фундаментальных теоретических схем, прошли многие естественно-научные и технические дисциплины, затратив на него многие столетия.

В современной же теории и методологии науки, наконец, выяснили, что в подавляющем большинстве задач построения научных теорий фундаментальные теоретические схемы могут быть позаимствованы из смежных, более развитых отраслей науки, с последующей их проверкой логическими средствами и практическим опытом. Это позволяет многократно ускорить процесс теоретизирования в рамках данной научной дисциплины. Теоретическая радиолокация не является исключением. Фундаментальная теоретическая схема в качестве научной гипотезы здесь может быть позаимствована или из теоретической физики, или из математической статистики и проверена на достоверность и соответствие радиолокационному эмпирическому базису в процессе дедуктивного развертывания теории и синтеза соответствующих радиолокационных систем. Это развертывание (обратное движение) теории радиолокации отражено на рис. 3.4 пунктирными стрелками и пунктирными прямоугольниками.

В целом в представленной на рисунке обобщенной структуре радиолокационной теории каждой из приведенных выше локальных расчетных ситуаций или группе схемных решений соответствует своя частная эмпирическая или теоретическая схема, совокупность которых составляет основной массив научного радиолокационного знания. Уровень же абстракции, точность описания информационной неопределенности и форма связи теоретических конструкторов упомянутых схем определяют уровень

развития (эмпирический или теоретический) радиолокации и, следовательно, эвристические возможности ее теории.

Вместе с тем такой принцип построения теории и ее фундаментальной схемы характерен для научных дисциплин естественно-научного цикла. В случае же технической науки, в частности, радиолокации, все оказывается значительно сложнее. Как следует из представленной на рис. 3.2, 3.3 обобщенной структуры, радиолокационная наука имеет две разновидности научных технических теорий – статистическую теорию теоретической радиолокации, отражающую сущность радиолокационного взаимодействия, и статистическую теорию радиолокационной системотехники и ее метода, отражающую совокупность методологических положений, принципов, выводов и рекомендаций, регламентирующих системотехническую деятельность.

Формально-логические структуры этих теорий аналогичны и соответствуют обобщенной структуре теории, представленной на рис. 3.4. Однако на совпадении логических структур их идентичность и заканчивается, поскольку (как неоднократно отмечалось) и предметы, и функции этих теорий принципиально различны. Принципиально различными будут и фундаментальные теоретические схемы этих теорий. И если в процессе развертывания того или иного теоретического материала, в основе которого оказываются задействованными одновременно средства и методы обоих уровней радиолокационной науки, между этими двумя разноплановыми подходами не возникает противоречие, то только лишь потому, что решаемые в этом случае задачи не затрагивали фундаментальных проблем радиолокационного метода. Но стоит этим проблемам измениться в сторону существенного усложнения, сразу же возникает необходимость в «разведении» этих двух уровней радиолокационной науки по двум относительно самостоятельным подуровням с тем, чтобы понять средствами какого их этих подуровней возникшие проблемы и задачи могут быть решены наиболее эффективно.

Одной из таких проблем современной радиолокационной науки является проблема измерения параметров радиолокационных сигналов в условиях адаптации пространственных, поляризационных и времячастотных характеристик измерительного комплекса к внешним помехам, которая в более общем плане сводится к задаче *преодоления априорной неопределенности информативных параметров радиолокационного сигнала относительно параметров внешних помех и неинформативных (мешающих) параметров сигнала* (так называемых параметров обстановки)¹²⁶.

¹²⁶ Под априорной неопределенность в задачах статистического синтеза понимается незнание (полная априорная неопределенность) или неполное знание (неполная или частичная априорная неопределенность) законов распределения различных случайных величин, от которых зависят принимаемые информационными системами решения. Если такие законы известны, ситуация принимает характер полной априорной определенности.

Понятие статистической теории радиолокации и ее фундаментальной схемы.

Статистическая теория радиолокации призвана отразить сущность радиолокационного взаимодействия (взаимодействия зондирующего сигнала РЛС с объектом локации). К настоящему времени она представлена некоторой совокупностью эмпирических и частных теоретических схем, к которым в первом приближении следует отнести:

1. Статистическую теорию нелинейных эффектов при распространении радиоволн в радиолокационном канале (передающая антенна РЛС – радиолокационная цель – приемная антенна РЛС), охватывающую:

- дисперсионные явления (отличия фазовой скорости в реальной среде от соответствующей скорости в свободном пространстве);
- дифракционные явления (искривление направления распространения радиоволн: зависимость ошибок измерения угла места цели от дальности; зависимость полного ослабления в дифракционной зоне от длины волны зондирующего сигнала и высоты полета цели; влияние неоднородностей тропосферы на дальность обнаружения РЛС);
- влияние земной поверхности на распространение электромагнитных волн;
- влияние неоднородностей тропосферы на дальность обнаружения РЛС и др.

2. Статистическую теорию вторичного радиолокационного излучения, включающую:

- эмпирическую теорию эффективной площади рассеяния РЛ целей:
а) точечных целей с детерминированными характеристиками (проблемы моделирования, зависимость свойств и эффективной площади рассеяния (ЭПР) цели от длины волны и поляризации зондирующего сигнала, поляризационная матрица радиолокационного рассеяния и др.); б) точечных целей со случайными характеристиками (модели цели с равноценными блестящими точками и доминирующей блестящей точкой); в) ЭПР целей, распределенных в пространстве (кораблей, планет и т. д.);
- эмпирическую теорию поверхностного рассеяния диполей, гидрометеоров и подстилающей поверхности.

3. Статистическую теорию разрешения целей и распознавания радиолокационных портретов.

4. Другие частные теории и эмпирические схемы, находящиеся в стадии разработки.

Все эти частные теории в той или иной степени вытекают из НРЛКМ, представляющей собой совокупность исходных понятий, категорий и принципов радиолокации, объединенных аналитическим выражением в виде уравнения радиолокации, в котором и свойства вторичного излу-

чения, и поляризационные характеристики объекта локации (цели), и нелинейные эффекты распространения электромагнитных волн (как и ряд других закономерностей радиолокационного взаимодействия) учтены посредством введения ЭПР цели и соответствующих коэффициентов поляризации и нелинейности среды. Любой расчет дальности обнаружения цели, зоны обнаружения или других показателей РЛС связан с учетом перечисленных выше характеристик и свойств радиолокационного взаимодействия. В свою очередь, НРЛКМ определенным образом встроена в электродинамическую картину мира теоретической физики и в собственных онтологических построениях и выводах опирается на нее (рис. 3.3).

В то же время вопрос о фундаментальной схеме статистической теории радиолокации все еще остается открытым. Уравнение радиолокации видимо нельзя воспринимать в качестве фундаментальной схемы, во всяком случае, в современном его виде, когда то или иное свойство радиолокационной цели учитывается без взаимоувязки с другими ее свойствами. Для придания этому уравнению статуса фундаментальной теоретической схемы необходимо, как минимум, увязать в единое целое его основной компонент (дальность обнаружения) со всеми основными параметрами цели, зондирующего сигнала и внешней среды, отражающими специфику радиолокационного взаимодействия.

Поэтому тот факт, что необходимость в разработке фундаментальной схемы статистической теории радиолокации уже возникла, не вызывает сомнений. Здесь, в частности, можно сослаться на статью В.В. Шуверткова, М.В. Захарова с весьма символическим названием «Кризис активной радиолокации».

Авторы статьи, указывая на известные проблемы активной радиолокации, связанные с действием внешних помех, снижением радиолокационной заметности СВН противника, применением ими полетов на малых и предельно малых высотах, противорадиолокационных снарядов для поражения РЛ средств ПВО и т. п., приходят к выводу: «...Картина вырисовывается совсем мрачная. Недаром специалисты приходят к пессимистическому заключению: в развитии активной радиолокации ПВО наступил кризис. А это в свою очередь ставит под вопрос боевую эффективность сложившейся системы обнаружения ПВО и, следовательно, всей системы ПВО в целом».

В качестве варианта преодоления кризиса в радиолокации В.В. Шувертков и М.В. Захаров предлагают переход к зондированию пространства сверхширокополосными импульсами длительностью порядка единиц наносекунд. При этом они отчетливо осознают, что «переход к сверхширокополосному зондированию воздушных объектов будет сопровождаться ломкой традиционных представлений, возникновением и, соответственно,

учетом новых возникающих эффектов. На всех стадиях получения радиолокационной информации – от формирования зондирующего сигнала до обработки принятого отраженного сигнала – неизбежны дисперсионные явления, наличие которых придется учитывать изначально. Анализ протекающих процессов необходимо производить с качественно новых теоретических позиций»¹²⁷.

Представляется достаточно очевидным, что авторы статьи, хотя и не напрямую, ведут речь о создании концептуальной модели теоретической радиолокации, способной адекватно описать и объяснить значительно более широкий класс радиолокационных явлений, включая зондирование воздушного пространства сверхширокополосными радиоимпульсами малой длительности.

Дело в том, что фундаментальная схема теоретической радиолокации, помимо внутренней функции, направленной на формирование основного массива теоретического знания, дедуктивное развертывание теории радиолокации, генерирование и систематизацию научного знания внутри теории, выполняет и важнейшую внешнюю функцию. Эта функция связана с согласованием основных идей, положений, принципов и законов радиолокации с частнонаучной и общенаучной картинами мира (рис. 3.3). Такое согласование обеспечивает не только «встраивание» радиолокации как относительно самостоятельной научной дисциплины и в систему естественно-научного знания, и в систему научно-технического знания более высокого порядка, но и заимствование из этих отраслей знания новых научных идей, теоретических представлений и радиолокационных гипотез.

Возможно, задача построения фундаментальной схемы окажется еще более сложной и потребует выхода на электродинамическую картину мира, в частности, на систему уравнений Максвелла, с последующим уточнением тех специфических особенностей взаимодействия сверхширокополосного зондирующего сигнала малой длительности с поверхностью рассеяния объектов локации, которые не принимались во внимание ранее в силу относительной простоты решаемых радиолокационных задач и эмпирического характера задействованных здесь схем, идей и гипотез. Так или иначе, но проблема разработки фундаментальной схемы теоретической радиолокации становится все более актуальной.

Статистическая теория РЛ системотехники, как и теория радиолокации, включает исходную эмпирическую основу (эмпирический базис теории), концептуальную основу (концептуальный базис теории), смысловую языковую основу (собственный понятийно-категориальный и математический аппарат) и логико-методологическую основу. Однако основной

¹²⁷ Воздушно-космическая оборона. 2005. №2. С. 26–29.

массив генерируемого ею научного знания носит явно выраженный методологический характер и в отличие от научного знания теоретической радиолокации непосредственно направлен на разработку, проектирование, производство и техническую эксплуатацию радиолокационных систем. Все эти подсистемы, в первую очередь, эмпирическая и концептуальная основы теории, охвачены сложной системой взаимосвязей и взаимопереходов, при которых *научно-методологическое знание* (концептуальная основа) как результат анализа фундаментальной теоретической схемы системного (технического) объекта в виде логически упорядоченной совокупности теоретических и методологических понятий и категорий, теоретических фактов, обобщений, методологических законов, следствий и утверждений трансформируется в методические принципы системотехнической деятельности, а *системотехническое знание* (эмпирическая основа) в форме эмпирических фактов, эмпирических обобщений, идей и гипотез, снятых в процессе разработки, экспериментальной проверки и доводки новых радиолокационных систем, технологий или методик, – трансформируется в системотехническую основу радиолокационной теории. Поэтому теория РЛ системотехники представляет собой достаточно сложный научный объект, нуждающийся в отдельном методологическом исследовании, то есть в научной рефлексии. Эти важнейшие проблемы предопределили содержание заключительной главы.

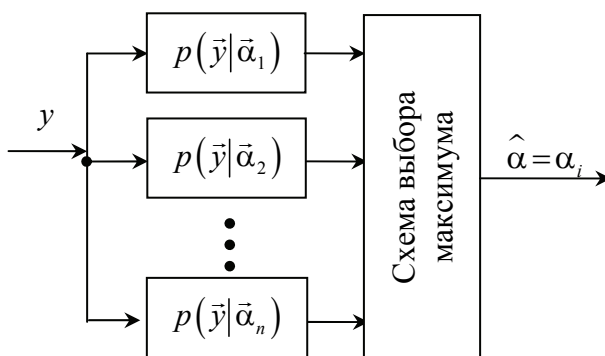
Глава 4. ОСНОВЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМОТЕХНИКИ

4.1. Общие замечания

Как было показано в предыдущих главах, в реальных условиях работы радиолокатора прием и обработка радиолокационных сигналов осуществляется, как правило, на фоне внешних помех. При этом обработка сигналов на фоне внутреннего некоррелированного шума является частным решением этой общей задачи. В целом задача приема и обработки сигналов решается в два этапа: а) этап обнаружения выборки дискретизированного или непрерывного сигналов на фоне коррелированных помех и внутренних шумов приемного устройства; б) этап измерения пространственных, поляризационных и частотно-временных параметров сигнала.

Этап обнаружения сводится к двум основным процедурам: а) вычислению весового (комплексного или корреляционного) интеграла, б) сравнению результата вычисления с порогом. Эта процедура заканчивается формированием оценки признака обнаружения цели $\hat{A}=0,1$. Символ «1» означает обнаружение цели, а символ «0» – ее необнаружение. В этом случае говорят об оптимальной корреляционной обработке сигналов, где под признаком оптимальности помимо согласованной обработки понимается возможность компенсации коррелированных помех.

Если в качестве коррелятора используется согласованный фильтр с импульсной характеристикой $\nu(t_0 - s)$, то говорят о фильтровой обработке сигнала. Если, наконец, обработка сигналов включает в себя последовательные или одновременные процессы корреляционной и фильтровой обработки в M скоростных (доплеровских) каналах (фильтрах) в каждом фиксированном кольце дальности ДД, что имеет место в цифровых РЛС, то говорят о корреляционно-фильтровой обработке. Этап измерения, рассматриваемый независимо от этапа обнаружения, сводится к нахождению максимума весового (корреляционного) интеграла, который пропорционален послеопытной



4.1. Схема оптимального измерителя

плотности вероятности $p(\vec{\alpha}|\vec{y})$ (следящее измерение) или функции правдоподобия $p(\vec{y}|\vec{\alpha})$ при неследящем измерении (рис. 4.1).

При дедуктивном подходе процессы обнаружения радиолокационного сигнала и измерения его параметров рассматриваются совместно, то есть как единая процедура снятия априорной неопределённости сигнала относительно признака наличия или отсутствия цели, параметров внешних помех, а также некоторых неинформативных параметров самого сигнала. Рассмотрим основные принципы этого методологического подхода более подробно.

4.2. Основы статистической теории обнаружения и измерения параметров радиолокационных сигналов на фоне помех

4.2.1. Постановка задачи адаптивного обнаружения и измерения. Модели радиолокационных сигналов и помех

В теории радиолокации универсальным способом статистического описания априорной неопределенности является введение параметрической модели, в которой, наряду с информативным векторным параметром $\vec{\alpha}$, вводят в расчет дополнительный векторный мешающий параметр $\vec{\lambda}$, называемый параметром обстановки. Этот параметр включает в себя неизвестные величины, учет которых в условиях выбранной модели позволил бы определить функцию правдоподобия. Конкретизируем в этой связи модели сигнала и помехи.

Пусть на фиксированном интервале наблюдения $t \in (t_1, t_2)$ на вход измерительной системы поступают колебания $\vec{y}(t)$, состоящие из аддитивной смеси помехи и внутренних шумов $\vec{n}(t, \vec{\lambda}_1)$ и принимаемого сигнала $\vec{x}(t, \vec{\alpha}, \vec{\lambda}_2)$, являющегося некоторой функцией времени и информативного параметра $\vec{\alpha}$, включающего в том числе и признак обнаружения цели. Мешающие параметры $\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2 \in \vec{\lambda}$ учитывают априорную неопределенность: параметр $\vec{\lambda}_2$ – априорную неопределенность относительно неинформативных параметров сигнала, параметр $\vec{\lambda}_1$ – априорную неопределенность от-

носителю параметров внешних помех.¹²⁸ В целом введенная ранее модель сигнала на входе измерительной системы примет вид

$$\bar{y}(t) = \bar{n}(t, \vec{\lambda}_1) + \bar{x}(t, \vec{\alpha}, \vec{\lambda}_2). \quad (4.1)$$

Применительно к *байесовской трактовке* полагаем параметры $\vec{\alpha}$ и $\vec{\lambda}$ случайными с законами распределения $p(\vec{\alpha})$ и $p(\vec{\lambda})$. Требуется определить оператор оптимальной системы, обеспечивающий получение наилучшей (в смысле минимума среднего риска) оценки $\hat{\vec{\alpha}}$ параметра $\vec{\alpha}$ в условиях существенной априорной неопределенности относительно параметра $\vec{\lambda}$, и рассчитать показатели качества полученной оценки (величину систематической и флуктуационной ошибок измерения).

При этом под существенной априорной неопределенностью задачи оценки информативного параметра $\vec{\alpha}$ относительно параметра $\vec{\lambda}$ будем понимать ситуацию, при которой оценка $\hat{\vec{\alpha}}$ по функции правдоподобия $p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda})$ зависит от параметра обстановки $\vec{\lambda}$, и этой зависимостью в общем случае нельзя пренебречь.

Такая ситуация возникает при измерении информативных (угловых, поляризационных и времячастотных) параметров сигнала на фоне коррелированных помех с неизвестными характеристиками. Так, при измерении угловых координат нешумящей цели на фоне активных помех (помех, коррелированных по пространству) первоначально возникает необходимость преодоления существенной априорной неопределенности относительно угловых положений и интенсивности источников активных помех. Эта неопределенность снимается в процессе адаптации обнаружителя-измерителя к внешним помехам. Однако в дальнейшем возникает новая априорная неопределенность, которая становится существенной в процессе формирования провала на источнике помех: от положения этого провала относительно максимума основного лепестка диаграммы направленности (то есть от углового расстояния между нешумящей целью и источником помех) оказывается зависимым отношение сигнал/(шум + помеха), то есть *угловая координата нешумящей цели становится энергетическим параметром*.

В этих условиях, чтобы измерить угловую координату нешумящей цели с минимально возможными систематической и флуктуационной ошибками, необходимо снять априорную неопределенность относительно неизвестной энергии сигнала. Подобная ситуация складывается и в случае

¹²⁸ Репин, В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М. : Сов. радио, 1977. 432 с.

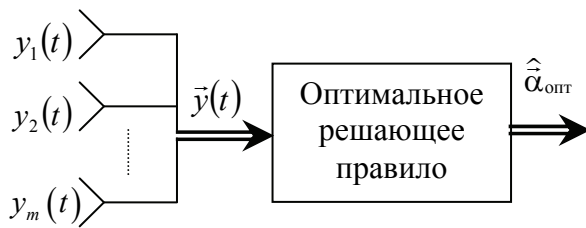


Рис. 4.2. Алгоритм принятия решения
оценки информативного параметра

измерения доплеровской частоты сигнала на фоне пассивных помех (помех, коррелированных во времени), а также в ряде других случаев статистического синтеза радиолокационных систем, рассматриваемых ниже.

Таким образом, *задача теории радиолокационной системотехники применительно к обнаружению и измерению параметров сигнала на фоне помех заключается в выявлении и описании закономерностей снятия существенной априорной неопределенности сигнала относительно параметров внешних помех и неинформативных параметров сигналов*, на основе которых может быть сформулирована последовательная или параллельная процедура (оптимальное решающее правило, системотехнический метод и т. д.) оценки собственно информативных параметров сигнала $\hat{\alpha}_{\text{опт}}$ (рис. 4.2).

Следует ожидать, что такая процедура (системотехнический метод статистического синтеза радиолокационных измерительных систем) в общем случае будет адаптивной, а процессы адаптивного обнаружения сигнала и измерения его параметров сведутся к оценке параметров обстановки и использованию этих параметров при оценке информативных параметров сигнала, то есть процессы обнаружения и измерения параметров сигналов на фоне помех сольются в единый процесс, который в дальнейшем будем называть *адаптивным измерением* (оцениванием).

4.2.2. Общие закономерности обнаружения и измерения параметров радиолокационных сигналов в условиях априорной неопределенности

Для выяснения общих закономерностей обнаружения радиолокационных сигналов и измерения их параметров в условиях априорной неопределенности обратимся к известному соотношению

$$p(\vec{\alpha}|\vec{y}) = k_0 p(\vec{\alpha}) p(\vec{y}|\vec{\alpha}),$$

которое с учетом наличия существенной априорной неопределенности по слеопытной плотности вероятности и функции правдоподобия относительно параметров обстановки $\vec{\lambda}$ примет следующий вид:

$$p(\vec{\alpha}, \vec{\lambda} | \vec{y}) = k_0 p(\vec{\alpha}) p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda}). \quad (4.2)$$

Общая процедура оценки информативного параметра сигнала в этом случае существенно усложняется. Она сводится к усреднению совместной функции правдоподобия $p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda})$ по параметру $\vec{\lambda}$:

$$\int_{\vec{\lambda}} p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda}) d\vec{\lambda} = p(\vec{y} | \vec{\alpha}) \quad (4.3)$$

и определению оценки $\hat{\vec{\alpha}}$ из условия максимума результирующей функции правдоподобия $p(\vec{y} | \vec{\alpha})$, то есть

$$p(\vec{y} | \hat{\vec{\alpha}}) = \max_{\vec{\alpha}} p(\vec{y} | \vec{\alpha}). \quad (4.4)$$

При этом возможны три случая. **В первом** удастся провести интегрирование функции $p(\vec{\alpha}, \vec{\lambda} | \vec{y}) = k p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda})$ по параметрам обстановки $\vec{\lambda}$ и получить распределение $p(\vec{y} | \vec{\alpha})$, как это имеет место при выводе достаточных статистик для моделей сигналов со случайной начальной фазой или со случайной начальной фазой и амплитудой. Здесь $k = \iint_{\vec{\alpha}, \vec{\lambda}} p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda}) d\vec{\alpha} d\vec{\lambda}$ – нормирующий коэффициент. **Во втором случае**

интегрирование функции $p(\vec{\alpha}, \vec{\lambda} | \vec{y})$ по параметрам обстановки $\vec{\lambda}$ провести не удастся, однако априорная неопределенность является несущественной и ею можно пренебречь. Подобная ситуация имеет место, например, в случае оценки угловой координаты нешумящей (прикрываемой) цели при действии источника помех в области дальних боковых лепестков диаграммы направленности, когда оцениваемая координата носит слабовыраженный энергетический характер. **Третий**, более типичный случай в условиях внешних помех (в условиях существенной априорной неопределенности): подобное интегрирование в явном виде провести не удастся, а пренебречь априорной неопределенностью не представляется возможным. В этом случае, полагая измерения регулярными (отношение сигнал/(шум + остаток компенсации помехи) $q^2(\vec{\alpha}, \vec{\lambda}) \gg 1$) и проводя интегрирование с помощью асимптотического метода Лапласа, приходят к следующей системе уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{d\vec{\alpha}} \ln p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda}) - \frac{1}{2} Sp \frac{d\vec{B}}{d\vec{\alpha}} \vec{B}^{-1} = 0 \end{array} \right. \quad (4.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{d\vec{\lambda}} \ln p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda}) = 0, \end{array} \right. \quad (4.6)$$

решение которой является оптимальной оценкой информативного параметра $\vec{\alpha}$ в условиях существенной априорной неопределенности относительно параметра $\vec{\lambda}$. Здесь

$$\vec{B} = \|B_{ij}\|, \quad B_{ij} = \frac{\partial^2 \ln p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda})}{\partial \lambda_i \partial \lambda_j}, \quad (4.7)$$

Sp (шпур) – след матрицы, то есть сумма ее диагональных элементов.

В тех случаях, когда функция правдоподобия может быть аппроксимирована гауссовой поверхностью по всем параметрам $\vec{\alpha}$ и $\vec{\lambda}$, матрица (4.7) в (4.5) не зависит от параметра $\vec{\alpha}$ и правило синтеза (4.5), (4.6) переходит в правило совместного оценивания параметров $\vec{\alpha}$ и $\vec{\lambda}$ по максимуму функции правдоподобия:

$$p(\vec{y} | \hat{\vec{\alpha}}, \hat{\vec{\lambda}}) = \max_{\vec{\alpha}, \vec{\lambda}} p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda}), \quad (4.8)$$

а система (4.5), (4.6) принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{d\vec{\alpha}} \ln p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda}) = 0 \end{array} \right. \quad (4.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{d\vec{\lambda}} \ln p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda}) = 0. \end{array} \right. \quad (4.10)$$

Алгоритм преодоления существенной априорной неопределенности (4.5), (4.6) или ему эквивалентный (4.8) будем называть *неадаптивным*, поскольку в результате решения системы (в результате подстановки оценки (4.6) в (4.5)) приходим к алгоритму оценки параметра $\vec{\alpha}$, инвариантному к мешающим параметрам $\vec{\lambda}$, то есть не содержащему мешающий параметр $\vec{\lambda}$ в явном виде. Оценку параметра обстановки $\vec{\lambda}$, осуществляемую на интервале обработки сигнала, будем называть *однократной*. Очевидно, что ошибки измерения параметра $\vec{\alpha}$, помимо известных факторов, определяются также и дисперсией оценки параметра $\vec{\lambda}$.

В общем виде измерение параметров $\vec{\alpha}$ и разрешение априорной неопределенности относительно параметров $\vec{\lambda}$ происходит на интервале наблюдения, который ограничивается видом сигнала, интервалом его когерентности, а также сложностью помеховой обстановки. Если интервал стационарности параметра $\vec{\lambda}$ превышает интервал измерения $\vec{\alpha}$, имеется возможность накопления оценок параметра $\vec{\lambda}$ и снижения результирующей дисперсии ошибок его измерения. В таких случаях использование сглаженной оценки $\hat{\lambda}$ в алгоритме измерения параметра $\vec{\alpha}$ может привести к повышению его точности. Оценку параметра обстановки $\hat{\lambda}$, являющуюся результатом накопления его n предыдущих и текущей однократных оценок, будем называть многократной. По мере накопления однократных оценок $\hat{\lambda}$ его многократная оценка асимптотически сходится к своему истинному значению. Алгоритм измерения информативного параметра $\vec{\alpha}$ приближается в этом случае к алгоритму измерения с известным параметром обстановки, то есть к алгоритму, дисперсия ошибок измерения которого не зависит от дисперсии ошибок измерения параметра обстановки $\vec{\lambda}$. С учетом сказанного, неадаптивный алгоритм (4.5), (4.6) оценки информативного параметра $\vec{\alpha}$ в условиях априорной неопределенности относительно параметра обстановки $\vec{\lambda}$ примет следующий вид:

$$\begin{cases} p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda}) = \max_{\vec{\alpha}} p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda}) \Big|_{\vec{\lambda} = \hat{\lambda}_{T_{\vec{\lambda}}}} & (4.11) \\ p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \hat{\lambda}) = \max_{\vec{\lambda}} p(\vec{y} | \vec{\alpha}, \vec{\lambda}) & (4.12) \\ \hat{\lambda}_{T_{\vec{\lambda}}} = \frac{1}{T_{\vec{\lambda}}} \int_t^{t+T} \hat{\lambda}(\vec{y}, t) dt, & (4.13) \end{cases}$$

где $T_{\vec{\lambda}}$ – интервал стационарности параметра обстановки $\vec{\lambda}$.

На практике, в ряде случаев, имеется также возможность накопления оценок $\hat{\alpha}$ информативных параметров $\vec{\alpha}$. При этом целесообразно в алгоритм (4.12) вместо однократной оценки информативного параметра $\vec{\alpha}$ использовать многократную оценку $\hat{\alpha}$, определяемую в соответствии с алгоритмом

$$\hat{\alpha}_{T_{\vec{\alpha}}} = \frac{1}{T_{\vec{\alpha}}} \int_t^{t+T} \hat{\alpha}(\vec{y}, t) dt, \quad (4.14)$$

где $T_{\vec{\alpha}}$ – интервал стационарности параметра $\vec{\alpha}$.

В общем случае оценка параметров сигнала $\hat{\alpha}_{T_{\vec{\alpha}}}$ и $\hat{\lambda}_{T_{\vec{\lambda}}}$ может осуществляться с учетом моделей их изменения.

Алгоритм (4.11)–(4.14) измерения информативных параметров в условиях существенной априорной неопределенности относительно мешающих параметров будем называть адаптивными. *Адаптация состоит в том, что по мере накопления однократных оценок параметра обстановки $\vec{\lambda}$ повышается точность оценки информативного параметра $\vec{\alpha}$.* Одновременно алгоритм предусматривает возможность накопления, сглаживания и использования результирующей оценки информативного параметра $\hat{\alpha}_{T_{\vec{\alpha}}}$ при формировании однократных оценок параметра обстановки $\hat{\lambda}$, что повышает точность оценки последнего и, в свою очередь, обеспечивает дальнейшее снижение систематической и флуктуационной ошибок результирующей оценки $\hat{\alpha}_{T_{\vec{\alpha}}}$, приближая эти показатели к условиям обнаружения и измерения параметров сигналов при отсутствии коррелированных помех¹²⁹.

Таким образом, задача снятия априорной неопределенности сигнала относительно параметров обстановки может решаться двумя способами:

1. С помощью неадаптивных алгоритмов или решающих правил (4.5), (4.6), оказывающихся, в конечном счете, инвариантными к параметру $\vec{\lambda}$ за счет разрешения системы (4.5), (4.6) относительно этого параметра. Такой алгоритм по показателям качества измерения (систематической и флуктуационной ошибкам измерения) соответствует однократной оценке мешающего параметра $\vec{\lambda}$.

2. С помощью адаптивного алгоритма (4.11)–(4.12), в котором в процессе разрешения системы (4.5), (4.6) используется не однократная, а сглаженная оценка параметра $\vec{\lambda}$. Такой алгоритм оказывается адаптивным как по параметрам $\vec{\lambda}$, так и по $\vec{\alpha}$. При этом на первом шаге адаптации по параметрам $\vec{\lambda}$ точностные характеристики алгоритма (4.11)–(4.14) совпадают с точностными характеристиками неадаптивного алгоритма (4.5), (4.6). По мере адаптации алгоритма (4.11)–(4.14) к параметрам обстановки $\vec{\lambda}$ его показатели качества приближаются к потенциально достижимым (к точности алгоритмов с известным параметром $\vec{\lambda}$). В дальнейшем будем полагать, что векторный параметр $\vec{\lambda} = \{\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2\}$, где $\vec{\lambda}_1$ – подвектор параметров помех; $\vec{\lambda}_2$ – подвектор неинформативных (мешающих) параметров сигнала.

¹²⁹ Ботов М.И., Вяхирев В.А. Теоретические основы радиолокационных систем РТВ. Красноярск, 2007. 346 с.

Особо подчеркнем, что система уравнений (4.11)–(4.14) представляет собой искомую *фундаментальную теоретическую схему радиолокационной системотехники*. В качестве научной гипотезы с соответствующими изменениями она позаимствована из статистической теории решений и подлежит согласованию, с одной стороны, со статистической теорией радиолокации, а с другой – с эмпирическим базисом собственно радиолокационной системотехники. Покажем, что в процессе последовательного дедуктивного развертывания этой фундаментальной схемы происходит формирование сети частных теоретических и эмпирических схем (рис. 3.4), которые во взаимосвязи и во взаимозависимости с фундаментальной схемой образуют *статистическую теорию радиолокационной системотехники*. Покажем также, что на основе этой статистической теории может быть сформулирован *системотехнический метод* (упомянутое ранее решающее правило), позволяющий, в свою очередь, сформулировать совокупность схем и методик *инженерной (системотехнической) деятельности* по разработке алгоритмов адаптивной обработки сигналов на фоне помех с последующим синтезом и анализом широкого класса измерительных радиолокационных систем. Для успешного решения поставленных задач предварительно введем понятие достаточной статистики основных моделей радиолокационных сигналов.

4.3. Достаточные статистики основных моделей радиолокационных сигналов

Понятие достаточной статистики в теории статистических решений является фундаментальным. Оно связано с фактом существования полных классов решающих правил, для которых характерно то, что оптимальное правило решения оказывается зависящим не от всей совокупности наблюдаемых данных непосредственно, которые могут иметь очень большую или даже неограниченную размерность, а от сравнительно небольшой совокупности величин, являющихся функцией (функционалом) данных наблюдения.

В радиолокационной науке понятия достаточных статистик, как и сами статистические модели тех или иных объектов локации, разрабатываются в рамках статистической теории радиолокации и транслируются на уровень статистической теории системотехники в виде отношения правдоподобия или его логарифма, конкретизированного относительно выбранной модели зондирующего сигнала. Эти достаточные статистики могут быть полными, учитывая всю совокупность входящих в них компонентов,

или неполными, когда достаточная статистика сводится только лишь к квадрату модуля корреляционного интеграла. Первый вариант способен охватить круг проблем статистического синтеза, связанных с полной априорной неопределенностью. Второй же вариант, нашедший широкое применение при построении современных и даже перспективных РЛС РТВ, рассчитан на задачи с несущественной априорной неопределенностью.

Поставим в качестве самостоятельной задачу вычисления полных достаточных статистик (полных выражений логарифмов отношения правдоподобия) наиболее распространенных в радиолокации статистических моделей сигналов, включая те слагаемые упомянутых статистик, которые не зависят от принимаемого сигнала и измеряемых (информативных) параметров. Не оказывая заметного влияния на показатели качества обнаружения сигналов и измерения их параметров в отсутствие внешних помех, эти слагаемые могут оказаться существенными в условиях адаптации РЛС к различным видам помеховых воздействий (в условиях существенной априорной неопределенности задачи статистического синтеза обнаружителей-измерителей относительно параметров внешних помех и неинформативных параметров сигнала).

Для решения поставленной задачи и распространения выявленных в предыдущем параграфе общих закономерностей преодоления априорной неопределенности информативного параметра $\vec{\alpha}$ относительно мешающего $\vec{\lambda}_1 = \{\vec{\lambda}_1^{\text{П}}; \vec{\lambda}_1^{\text{А}}\}$, где $\vec{\lambda}_1^{\text{А}}$, $\vec{\lambda}_1^{\text{П}}$ – вектор параметров соответственно активных и пассивных помех, введем обобщенную модель приемной системы с плоской ФАР (рис. 4.3), в состав которой входит $m_1 \times m_2$ независимых приемных элементов (каналов). На выходах этих элементов в результате наложений собственных шумов и внешних сигналов образуется двухкоординатный (матричный) нормальный случайный процесс $y(t)$ с нулевым средним значением, матрицей комплексных амплитуд (огибающих)

$$\vec{Y}(t) = \begin{pmatrix} Y_{11}(t) & Y_{12}(t) & \dots & Y_{1m_1}(t) \\ Y_{21}(t) & Y_{22}(t) & \dots & Y_{2m_1}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{m_2 1}(t) & Y_{m_2 2}(t) & \dots & Y_{m_2 m_1}(t) \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

и блочной размера $m_2 \times m_2$ квадратной корреляционной матрицей (КМ)

$$\vec{\Phi}(t, s) = \frac{1}{2} \left[\vec{D}(t) \cdot \vec{D}(s)^{*T} \right] \quad (4.16)$$

с подматрицами размера $m_1 \times m_1$ $\vec{\Phi}(t,s)_{i,j} = \left\| \left(\Phi(t,s)_{i,j} \right)_{k,l} \right\|$, элементы которых показывают взаимную корреляцию k -го элемента i -й строки с l -м элементом j -й строки матрицы комплексных амплитуд входного сигнала $y(t)$, а также взаимную корреляцию измеряемых параметров сигнала β и ε вектора $\vec{\alpha}$ в моменты времени t и s .

Здесь $i, j = 1 \dots, m_2$ $k, l = 1 \dots, m_1$, $\vec{D}(t)$ – блочный вектор-столбец размера $m_1 \times 1$ с элементами в виде простых вектор-столбцов $\vec{D}_i = \left\| (D_i)_k \right\|$ размера $m_2 \times 1$, составленных из значений комплексных амплитуд матрицы $\vec{Y}(t)$ (4.15):

$$\vec{D}(t) = \begin{Bmatrix} \vec{D}_1(t) \\ \vec{D}_2(t) \\ \dots \\ \vec{D}_{m_1}(t) \end{Bmatrix}; \quad \vec{D}_1(t) = \begin{Bmatrix} Y_{11}(t) \\ Y_{21}(t) \\ \dots \\ Y_{m_2,1}(t) \end{Bmatrix}, \quad \vec{D}_2(t) = \begin{Bmatrix} Y_{12}(t) \\ Y_{22}(t) \\ \dots \\ Y_{m_2,2}(t) \end{Bmatrix}, \dots, \quad \vec{D}_{m_1}(t) = \begin{Bmatrix} Y_{1m_1}(t) \\ Y_{2m_1}(t) \\ \dots \\ Y_{m_2,m_1}(t) \end{Bmatrix}.$$

На рис. 4.3 формирование блочного вектор-столбца $\vec{D}(\vec{\alpha})$ из элементов матрицы \vec{Y} осуществляется в преобразователе. С учетом специфики матрицы комплексных амплитуд входного сигнала $\vec{D}(t)$ вариант КМ (4.16) для $m_1 = m_2 = 4$ в момент времени t, s имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \vec{\Phi}(t,s) &= \frac{1}{2} \vec{D}(t) \vec{D}^{*\Gamma}(s) = \\ &= \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} Y_{11}(t) \cdot Y_{11}^*(t) + Y_{11}(s) \cdot Y_{11}^*(s) & Y_{21}^*(t) \cdot Y_{11}(t) + Y_{21}^*(s) \cdot Y_{11}(s) \\ Y_{11}^*(t) \cdot Y_{21}(t) + Y_{11}^*(s) \cdot Y_{21}(s) & Y_{21}^*(t) \cdot Y_{21}(t) + Y_{21}^*(s) \cdot Y_{21}(s) \\ Y_{11}^*(t) \cdot Y_{12}(t) + Y_{11}^*(s) \cdot Y_{12}(s) & Y_{21}^*(t) \cdot Y_{12}(t) + Y_{21}^*(s) \cdot Y_{12}(s) \\ Y_{11}^*(t) \cdot Y_{22}(t) + Y_{11}^*(s) \cdot Y_{22}(s) & Y_{21}^*(t) \cdot Y_{22}(t) + Y_{21}^*(s) \cdot Y_{22}(s) \\ Y_{11}(t) \cdot Y_{12}^*(t) + Y_{11}(s) \cdot Y_{12}^*(s) & Y_{11}(t) \cdot Y_{22}^*(t) + Y_{11}(s) \cdot Y_{22}^*(s) \\ Y_{21}(t) \cdot Y_{12}^*(t) + Y_{21}(s) \cdot Y_{12}^*(s) & Y_{21}(t) \cdot Y_{22}^*(t) + Y_{21}(s) \cdot Y_{22}^*(s) \\ Y_{12}(t) \cdot Y_{12}^*(t) + Y_{12}(s) \cdot Y_{12}^*(s) & Y_{12}(t) \cdot Y_{22}^*(t) + Y_{12}(s) \cdot Y_{22}^*(s) \\ Y_{22}(t) \cdot Y_{12}^*(t) + Y_{22}(s) \cdot Y_{12}^*(s) & Y_{22}(t) \cdot Y_{22}^*(t) + Y_{22}(s) \cdot Y_{22}^*(s) \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

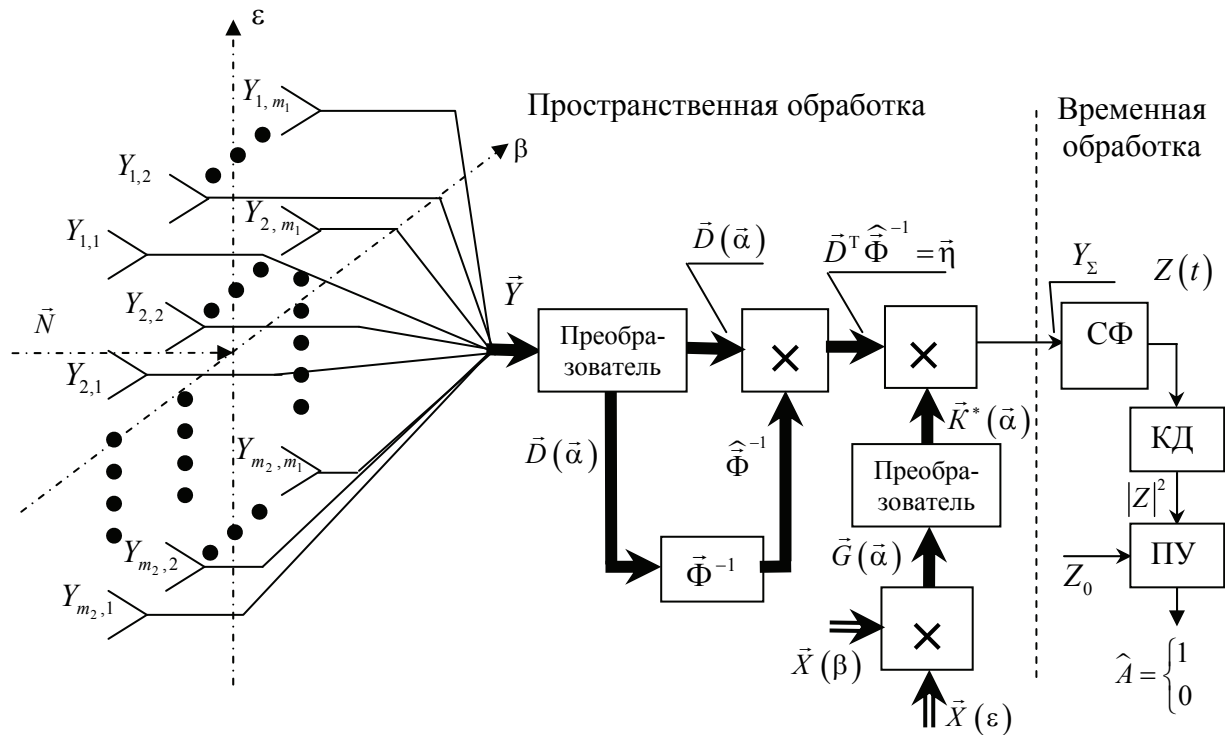


Рис. 4.3. Структурная схема адаптивного обнаружителя на базе плоской ФАР

Столь сложная структура матрицы $\vec{\Phi}(t, s)$ связана с необходимостью учета взаимной корреляции не только элементов каждого из подвекторов $\vec{D}_1(t), \vec{D}_2(t), \dots, \vec{D}_{m_1}(t)$ в отдельности, но и взаимной корреляции элементов всех этих подвекторов между собой. В противном случае в направлении на точечные источники помех в диаграмме направленности адаптивной ФАР будут формироваться не узкие конусообразные провалы, а *сплошные вырезки* плоскостями β, ϵ в форме *креста* с центром в направлении на подавляемый источник помех, что для адаптивной ФАР является неприемлемым, так как приводит к подавлению как помехового, так и полезного сигналов при совпадении одного из параметров¹³⁰. Считая совместный закон распределения компонентов $\vec{Y}_{i,k}(t)$ матрицы $\vec{Y}(t)$ нормальным, предположим далее, что матрица $\vec{\Phi}(t, s)$ аддитивной смеси сигнала, помех и собственных шумов антенны имеет вид

¹³⁰ Напомним, что корреляционная матрица помех (КМП) при условии $s = t$ оказывается эрмитовой: $\vec{\Phi}^T(t, t) = \vec{\Phi}^*(t, t)$. Если же $s \neq t$, то такая матрица является обобщенно-эрмитовой, то есть $\vec{\Phi}^T(t, s) = \vec{\Phi}^*(s, t)$. Это свойство КМП как раз и необходимо учитывать в случае адаптивной плоской ФАР.

$$\vec{\Phi}(t, s) = \vec{\Phi}_{\text{СП}}(t, s) = \vec{\Phi}_{\Pi}(t, s, \lambda_1) + \vec{\Phi}_{\text{C}}(t, s, \vec{\alpha}_n, \vec{\lambda}_2), \quad (4.16a)$$

где $\vec{\alpha}_n$ – вектор измеряемых информативных параметров сигналов с истинными значениями β_n и ε_n ; $\vec{\Phi}_{\Pi}(t, s, \lambda_1)$, $\vec{\Phi}_{\text{C}}(t, s, \vec{\alpha}_n, \vec{\lambda}_2)$ – КМ соответственно помеховой и сигнальной составляющих матрицы комплексных амплитуд $\vec{Y}(t)$ входных воздействий.

Отношение правдоподобия и его логарифм можно получить из соотношений для дискретной выборки сигнала (3.4), (3.5) с заменой КМ дискретных выборок $\vec{\phi}$ матрицей $\vec{\Phi}_{\text{СП}}$ или $\vec{\Phi}_{\Pi}$. При этом логарифм отношения правдоподобия принимает вид¹³¹

$$\ln l = \frac{1}{2} \vec{D}^{*T} \vec{L} \vec{D} - \ln \left(\frac{|\vec{\Phi}_{\text{СП}}|}{|\vec{\Phi}_{\Pi}|} \right) \quad (4.17)$$

Здесь $|\vec{\Phi}_{\text{СП}}|, |\vec{\Phi}_{\Pi}|$ – определители (детерминанты) соответствующих матриц; $\vec{L} = \vec{\Phi}_{\Pi}^{-1} - \vec{\Phi}_{\text{СП}}^{-1}$ – решающая матрица, определяемая из уравнения

$$\vec{\Phi}_{\text{СП}} \vec{L} \vec{\Phi}_{\Pi} = \vec{\Phi}_{\text{C}}. \quad (4.18)$$

Для приведения выражения (4.17) к необходимому виду введем «промежуточную» корреляционную матрицу $\vec{\Phi}_A$ наложения помехи и гауссового сигнала, измененного по амплитуде в \sqrt{A} раз ($0 \leq A \leq 1$) $\vec{\Phi}_A = \vec{\Phi}_{\Pi} + A \vec{\Phi}_{\text{C}}$.

В результате вычитаемое соотношения (4.17) можно представить в виде

$$\ln \left(\frac{|\vec{\Phi}_{\text{СП}}|}{|\vec{\Phi}_{\Pi}|} \right) = Sp \int_0^1 \vec{\Phi}_{\Pi} \vec{L}_A \frac{dA}{A}, \quad (4.19)$$

где $\vec{L}_A = \vec{\Phi}_{\Pi}^{-1} - \vec{\Phi}_A^{-1}$.

Отношение правдоподобия (4.17) с учетом (4.19) преобразуется к виду

$$\ln l = \frac{1}{2} \vec{D}^{*T} \vec{L} \vec{D} - Sp \int_0^1 \vec{\Phi}_{\Pi} \vec{L}_A \frac{dA}{A}. \quad (4.20)$$

¹³¹ Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М. : Радио и связь, 1981. С. 19.

Переходя к многоканальному приему непрерывных колебаний $\vec{Y}(t)$, имея в виду возможность предварительной дискретизации этих колебаний и устремляя к нулю интервал временной дискретизации, выражение (4.20) логарифма отношения правдоподобия, являющегося достаточной статистикой для принятия оптимального решения о значении вектора $\vec{\alpha}_n$, приведем к окончательному виду:

$$\ln l = \frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T \vec{D}^{*T}(t) \cdot \vec{L}(t,s) \cdot \vec{D}(s) dt ds - Sp \int_0^1 \frac{dA}{A} \int_0^T \int_0^T \vec{\Phi}_\Pi(t,s) \cdot \vec{L}_A(s,t) dt ds, \quad (4.21)$$

где T – интервал наблюдения случайного процесса $\vec{Y}(t)$.

Решающая матрица $\vec{L}(t,s) = \vec{L}_A(t,s) \Big|_{A=1}$ определяется из обобщенного интегрально-матричного уравнения Фредгольма, являющегося развитием матричного уравнения (4.18):

$$\int_0^T \int_0^T \vec{\Phi}_A(t,s) \cdot \vec{L}_A(s,\theta) \cdot \vec{\Phi}_\Pi(\theta,\tau) ds d\theta = A \cdot \vec{\Phi}_C(t,\tau). \quad (4.22)$$

При этом $\vec{\Phi}_A(t,s) = \vec{\Phi}(t,s) = \vec{\Phi}_\Pi(t,s) + A \cdot \vec{\Phi}_C(t,s)$.

При записи матрицы $\vec{\Phi}_\Pi(t,s,\lambda_1)$ учтено наличие в ней внутренних шумов элементов антенной решетки.

1. Достаточная статистика для матричного когерентного сигнала с равновероятной начальной фазой и релеевской амплитудой.

Известно, что случайный процесс считается детерминированным (с известными параметрами), если задан закон его распределения. Поэтому сигнал с равновероятной случайной начальной фазой и релеевской амплитудой далее будем называть детерминированным радиолокационным сигналом.

Вначале проведем вывод достаточной статистики рассматриваемой модели сигнала для одномерного варианта его обнаружения на фоне белого шума. Задаваясь скалярными корреляционными функциями сигнала $\Phi_C(t,s) = \frac{1}{2} X(t) \cdot X^*(s)$ и помехи (белого шума) $\Phi_\Pi(t,s) = N_0 \delta(t-s)$, одномерный вариант уравнения (4.22) приведем к следующему виду:

$$N_0 \left[N_0 L_A(t,\tau) + \frac{A}{2} X(t) \int_{-\infty}^{\infty} X^*(s) L_A(s,\tau) ds \right] = \frac{A}{2} X(t) X^*(\tau), \quad (4.23)$$

где $X(t)$ – комплексная амплитуда ожидаемого сигнала. При этом интеграл в левой части уравнения (4.23) принимает значение

$$\int_{-\infty}^{\infty} X^*(s)L_A(s, \tau)ds = A\mathcal{E}_0 X^*(\tau) / N_0(N_0 + A\mathcal{E}_0). \quad (4.24)$$

Здесь $\mathcal{E}_0 = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |X(t)|^2 dt$ – энергия ожидаемого сигнала. (4.25)

При подстановке соотношения (4.24) в (4.23) получаем искомое значение $L_A(t, \tau)$:

$$L_A(t, \tau) = AX(t)X^*(\tau) / 2N_0(N_0 + A\mathcal{E}_0). \quad (4.26)$$

Подставляя уравнение (4.26) в (4.21), вводя параметр обнаружения $q^2 = 2\mathcal{E}_0/N_0$ и нормированный к N_0 комплексный весовой интеграл (4.51) $Z = \int_{-\infty}^{\infty} Y(t)X^*(t)dt / N_0$, получаем достаточную статистику для рассматриваемой модели сигнала¹³²:

$$\ln \ell = \left[|Z|^2 / 4(1 + q^2/2) \right] - \ln(1 + q^2/2). \quad (4.27)$$

Рассмотрим особенности вывода достаточной статистики для матричного когерентного сигнала плоской ФАР.

При известной функциональной связи между сигналами, принимаемыми отдельными элементами антенной системы, КМ сигнала представим в виде

$$\vec{\Phi}_C(t, s, \vec{\alpha}, \vec{\lambda}_2) = 1/2 \vec{K}(t, \vec{\alpha}) \cdot \vec{K}^{*T}(s, \vec{\alpha}),$$

где $\vec{K}(t, \vec{\alpha})$, по аналогии с вектором $\vec{D}(t)$, – блочный вектор-столбец размера $m_1 \times 1$ с элементами в виде простых вектор-столбцов $\vec{K}_i = \|(K_i)_k\|$ размера $m_1 \times 1$, сформированных из столбцов матрицы сигнала $\vec{G}(t, \vec{\alpha})$ (рис. 4.3):

¹³² Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М., 1981. С. 83–89.

$$\vec{K}(t, \vec{\alpha}) = \begin{pmatrix} \vec{K}_1(t, \vec{\alpha}) \\ \vec{K}_2(t, \vec{\alpha}) \\ \dots \\ \vec{K}_{m_1}(t, \vec{\alpha}) \end{pmatrix}; \vec{K}_1(t, \vec{\alpha}) = \begin{pmatrix} X_{11} \\ X_{21} \\ \dots \\ X_{m_2,1} \end{pmatrix}, \vec{K}_2(t, \vec{\alpha}) = \begin{pmatrix} X_{12} \\ X_{22} \\ \dots \\ X_{m_2,2} \end{pmatrix}, \dots, \vec{K}_{m_1}(t, \vec{\alpha}) = \begin{pmatrix} X_{1m_1} \\ X_{2m_1} \\ \dots \\ X_{m_2,m_1} \end{pmatrix},$$

$$\vec{G}(t, \vec{\alpha}) = \vec{X}(t, \beta) \vec{X}^T(t, \varepsilon) = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1m_1} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2m_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{m_2,1} & X_{m_2,2} & \dots & X_{m_2,m_1} \end{pmatrix}.$$

В свою очередь, $\vec{X}(t, \beta)$ – вектор-столбец ожидаемого амплитудно-фазового распределения сигнала в азимутальной плоскости размера $m_1 \times 1$ с параметром β при фиксированном (истинном) значении параметра ε ; $\vec{X}(t, \varepsilon)$ – вектор-столбец ожидаемого амплитудно-фазового распределения сигнала в вертикальной плоскости размера $m_2 \times 1$ с параметром ε при фиксированном (истинном) значении параметра β :

$$\vec{X}(t, \beta) = \begin{pmatrix} X_\beta(t) e^{-j\beta_1} \\ X_\beta(t) e^{-j\beta_2} \\ \dots \\ X_\beta(t) e^{-j\beta_{m_2}} \end{pmatrix}, \vec{X}(t, \varepsilon) = \begin{pmatrix} X_\varepsilon(t) e^{-j\varepsilon_1} \\ X_\varepsilon(t) e^{-j\varepsilon_2} \\ \dots \\ X_\varepsilon(t) e^{-j\varepsilon_{m_2}} \end{pmatrix},$$

$$X_{m_2, m_1} = X_\varepsilon(t) e^{-j\varepsilon_{m_2}} \cdot X_\beta(t) e^{-j\beta_{m_1}}.$$

В этом случае решение интегрального уравнения (4.22) примет вид

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\vec{\Phi}_\Pi(t, s) + \frac{A}{2} \vec{K}(t) \vec{K}^{*T}(s)] \cdot \vec{L}_A(s, \theta) \cdot \vec{\Phi}_\Pi(\theta, \tau) ds d\theta = \frac{A}{2} \vec{K}(t) \vec{K}^{*T}(\tau). \quad (4.28)$$

Введем блочный весовой вектор $\vec{R}(t, \vec{\alpha})$ размера m_1 с подблоками размера m_2 , определяемый интегрально-матричным уравнением

$$\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{\Phi}(t, s) \vec{R}(s) ds = \vec{X}(t).$$

Для случая плоской ФАР это уравнение преобразуется к виду

$$\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{\Phi}_{\Pi}^{-1}(t, s) \vec{R}(t, s) ds = \vec{K}(t, \vec{\alpha}). \quad (4.29)$$

Введем также выражение для параметра обнаружения – отношения сигнал/(помеха + шум):

$$q(\vec{\alpha}) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{K}^T(t, \vec{\alpha}) \vec{R}^*(t, \vec{\alpha}) dt. \quad (4.30)$$

Умножим обе части исходного уравнения (4.28) на $\vec{R}^{*T}(t)/2$ слева и проинтегрируем по t . Учитывая уравнения (4.30), (4.29), получим выражение

$$(1 + Aq^2/2) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{K}^{*T}(s) \cdot \vec{L}_A(s, \theta) \cdot \vec{\Phi}_{\Pi}(\theta, \tau) ds d\theta = \frac{A}{2} q^2 \vec{K}^{*T}(\tau).$$

Подставляя его в формулу (4.28), приходим к равенству

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{\Phi}_{\Pi}(t, s) \cdot \vec{L}_A(s, \theta) \cdot \vec{\Phi}_{\Pi}(\theta, \tau) ds d\theta = \frac{A}{2} \vec{K}(t) \vec{K}^{*T}(\tau) (1 + Aq^2/2),$$

в правую часть которого подставим выражение (4.29). После преобразований получим уравнение

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{\Phi}_{\Pi}(t, s) \cdot \left[\vec{L}_A(s, \theta) - \frac{1}{8} \frac{A}{1 + Aq^2/2} \vec{R}(s) \vec{R}^{*T}(\theta) \right] \cdot \vec{\Phi}_{\Pi}(\theta, \tau) ds d\theta = 0.$$

Это уравнение имеет решение:

$$L_A(s, \theta) = AR(s)R^{*T}(\theta)/8(1 + Aq^2/2). \quad (4.30a)$$

В соответствии с равенством (4.21) оно распространяет отношение правдоподобия (4.27) на многомерный матричный сигнал и случай произвольно коррелированной и нестационарной гауссовой помехи. Входящий в соотношение (4.27) комплексный весовой интеграл Z определяется выражением

$$Z(t, \vec{\alpha}) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{D}^T(t, \vec{\alpha}) \cdot \vec{\Phi}_{\Pi}^{-1}(t) \cdot \vec{K}^*(t, \vec{\alpha}) dt. \quad (4.31)$$

В целом для рассматриваемого случая логарифм отношения правдоподобия примет вид

$$\ln l = \frac{|Z(t, \vec{\alpha}, \vec{\lambda})|^2}{2(1 + q^2(t, \vec{\alpha}, \vec{\lambda})/2)} - \ln(1 + q^2(t, \vec{\alpha}, \vec{\lambda})/2). \quad (4.32)$$

Следует заметить, что в выражении (4.32) учтена зависимость величины энергетического отношения сигнал/(помеха + шум) $q^2(t, \vec{\alpha}, \vec{\lambda})$ от вектора информативных и мешающих параметров. Это указывает на возможный энергетический характер измеряемых параметров сигнала.

Сходство выражения (4.32) с достаточной статистикой (4.27) является внешним. Во-первых, логарифм отношения правдоподобия (4.32) является функцией одновременно двух информативных параметров ($\vec{\alpha}^T = \|\beta \ \varepsilon\|$), что проявляется при синтезе соответствующих измерителей. Во-вторых, составляющие вектора информативных параметров оказываются статистически взаимосвязанными между собой. Эта зависимость проявляется как в процессе адаптации к внешним помехам, так и в процессе адаптации к неинформативным параметрам (в рассматриваемом случае – к энергии ожидаемого сигнала).

При разделении обработки на пространственную и временную векторы $\vec{X}(t, \beta)$, $\vec{X}(t, \varepsilon)$ преобразуются к виду $\vec{X}(t, \beta) = X_{\beta}(t) \vec{X}(\beta)$, $\vec{X}(t, \varepsilon) = X_{\varepsilon}(t) \vec{X}(\varepsilon)$. В этом случае соотношение (4.30), при условии $X_{\beta}(t) = X_{\varepsilon}(t)$, примет следующий вид:

$$q^2(t, \vec{\alpha}, \vec{\lambda}_1^A) = \vec{K}^T(\vec{\alpha}) \vec{\Phi}_{\Pi}^{-1}(s, \vec{\lambda}_1^A) \vec{K}^*(\vec{\alpha}) \int_{-\infty}^{\infty} X^2(t) dt = 2\mathcal{E}_0 v(\vec{\alpha}), \quad (4.33)$$

где по аналогии с уравнением (4.25) $\mathcal{E}_0 = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |X|^2(t) dt$ – энергия ожидаемого сигнала; $v(\vec{\alpha}) = \vec{K}^T(\vec{\alpha}) \vec{\Phi}_{\Pi}^{-1}(s, \vec{\lambda}_1^A) \vec{K}^*(\vec{\alpha})$ – пространственная составляющая отношения сигнал/помеха.

При согласованной обработке (случай отсутствия внешних помех) матрица $\vec{\Phi}_{\Pi}^{-1}$ является единичной и произведение $\vec{K}^T(\vec{\alpha})\vec{K}^*(\vec{\alpha})=v(\vec{\alpha})=m_1m_2$.

Учитывая далее, что $|Z|^2=ZZ^*$, комплексный весовой интеграл (4.31) преобразуется к виду $|Z(t, \vec{\alpha}, \vec{\lambda}_1^A)|^2 = \mathfrak{E}_0 |Z(\vec{\alpha}, \vec{\lambda}_1^A)|^2$, а выражение для полной достаточной статистики (4.32) примет окончательный вид:

$$\ln \ell = \frac{\mathfrak{E}_0 |Z(\vec{\alpha}, \vec{\lambda}_1^A)|^2}{2(1 + \mathfrak{E}_0 v(\vec{\alpha}, \vec{\lambda}_1^A))} - \ln(1 + \mathfrak{E}_0 v(\vec{\alpha}, \vec{\lambda}_1^A)). \quad (4.34)$$

Структурная схема адаптивного обнаружителя на базе плоской ФАР, обеспечивающего вычисление комплексного весового (корреляционного) интеграла $|Z(\vec{\alpha}, \vec{\lambda}_1^A)|^2$, представлена на рис. 4.3. Двойными линиями показаны векторные операции, а жирными – матричные; СФ – согласованный фильтр, реализующий этап временной обработки сигналов; величина Y_{Σ} представляет собой результат пространственной обработки сигналов.

Задача обнаружения сигнала на фоне активных помех здесь сводится: а) к вычислению блочной КМ сигнала и помех $\widehat{\vec{\Phi}}$; б) к ее обращению или вычислению сразу обратной корреляционной матрицы помех ОКМП $\widehat{\vec{\Phi}}^{-1}$; в) компенсации активных помех за счет векторно-матричной операции $\vec{\eta} = \vec{D}^T \vec{\Phi}^{-1}$; г) когерентному суммированию сигналов по элементам ФАР за счет операции векторного перемножения $\vec{\eta}^T \vec{K}^*(\vec{\alpha}) = Y_{\Sigma}(\vec{\alpha})$; д) согласованной фильтрации и квадратичному детектированию сигналов на фоне остатков компенсации помех и внутренних шумов приемного устройства; е) сравнению полученного результата с порогом Z_0 . Элементы вектора $\vec{\eta} = \vec{D}^T \vec{\Phi}^{-1}$ представляют собой выходные сигналы элементов ФАР, очищенные от активных помех, поэтому весовой интеграл $Z(\vec{\alpha})$ не зависит от мешающего параметра $\vec{\lambda}_1^A$.

2. Достаточная статистика квазидетерминированного (некогерентного во времени) радиолокационного сигнала.

Некогерентными называют импульсные сигналы со случайными начальными фазами высокочастотного заполнения в каждом импульсе. В от-

личие от когерентного сигнала статистические свойства некогерентного сигнала, отраженного от цели, являются весьма сложными. Функционал распределения вероятностей флуктуирующего некогерентного сигнала в общем случае вычислить не удастся. В связи с этим не удастся синтезировать и схемы оптимальных измерителей параметров некогерентных радиолокационных сигналов. Поэтому при разработке и анализе измерителей параметров некогерентных сигналов вводятся некоторые ограничения на его априорную структуру.

Квазидетерминированным будем называть полезный сигнал, представляющий собой совокупность s статистически независимых элементарных сигналов с детерминированной временной структурой, что может иметь место, например, при приеме некогерентной импульсной последовательности не перекрывающихся во времени сигналов (некогерентной пачки радиоимпульсов).

Введя указанные ограничения, запишем КМ квазидетерминированного сигнала $\vec{\Phi}_C(t, l)$, принимаемого плоской ФАР в виде

$$\vec{\Phi}_C(t, l) = \sum_{i=1}^s \mathcal{E}_{s_i} \vec{K}_{s_i}(t, \vec{\alpha}) \cdot \vec{K}_{s_i}^{*T}(l, \vec{\alpha}), \quad (4.35)$$

где (как и в случае с рассмотренным ранее детерминированным сигналом) $\vec{K}_{s_i}(t, \vec{\alpha})$ – блочный вектор-столбец размера $m_2 \times 1$ комплексных законов модуляции i -го ($i = 1, \dots, s$) элементарного сигнала с элементами в виде простых вектор-столбцов $\vec{K}_{s_i} = \|(K_{s_i})_k\|$, $k = 1 \dots m_1$, составленный из значений матрицы $\vec{G}_{s_i}(t, \vec{\alpha}) = \vec{X}_{s_i}(t, \varepsilon) \cdot X_{s_i}(t, \beta)$ ожидаемого АФР i -го элементарного сигнала; \mathcal{E}_{s_i} – энергия i -го элементарного сигнала.

В явном виде логарифм отношения правдоподобия для рассматриваемой модели сигнала находят из соотношения (4.21). Для этого введем прямоугольную блочную (размером $m_2 \times s$) матрицу $\vec{K}_\Pi(t) = \|\vec{K}_{s_1}(t) \dots \vec{K}_{s_s}(t)\|$ и квадратную диагональную матрицу $\vec{\mathcal{E}}_s$ порядка s с элементами \mathcal{E}_{s_i} . Тогда, представляя КМ (4.35) в виде

$$\vec{\Phi}_C(t, l) = \vec{K}_\Pi(t) \cdot \vec{\mathcal{E}}_s \cdot \vec{K}_\Pi^{*T}(l) \quad (4.36)$$

и находя из обобщенного интегрально-матричного уравнения (4.22) решающую матрицу $\vec{L}_A(t, s)$, от соотношения (4.21) приходим к выражению

для логарифма отношения правдоподобия квазидетерминированного сигнала:

$$\ln \ell = \frac{1}{2} \vec{Z}_s^{*T}(\vec{\alpha}) \cdot [\vec{I} + \vec{q}_s^2(\vec{\alpha})]^{-1} \cdot \vec{\Xi}_s \cdot \vec{Z}_s(\vec{\alpha}) - \ln \left[\det(\vec{I} + \vec{q}_s^2(\vec{\alpha})) \right], \quad (4.37)$$

где $\vec{Z}_s(\vec{\alpha})$ – s -мерный вектор-столбец комплексных корреляционных интегралов, соответствующих оптимальному обнаружению элементарных детерминированных сигналов с элементами

$$Z_{s_i}(t, \vec{\alpha}) = \int_{-\infty}^{\infty} (\vec{D}_{s_i}^T(t, \vec{\alpha}) \cdot \vec{\Phi}_{\Pi}^{-1}(t)) \vec{K}_{s_i}^{*T}(t, \vec{\alpha}) dt; \quad (4.38)$$

$\det(\vec{A})$ – определитель матрицы $\vec{A} = (\vec{I} + \vec{q}_s^2)$. В свою очередь, \vec{q}_s^2 – квадратная матрица порядка s с элементами

$$q_{s_i}^2/2 = \Xi_{s_i} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{K}_{s_i}^T(t, \vec{\alpha}) \cdot \vec{\Phi}_{\Pi}^{-1}(t, l) \vec{K}_{s_i}^*(l, \vec{\alpha}) dt dl. \quad (4.39)$$

В силу условия неперекрываемости во времени элементарных сигналов некогерентной пачки матрица \vec{q}_s^2 является диагональной.

3. Достаточная статистика для стохастического сигнала.

Другим основным видом некогерентных сигналов являются стационарные процессы с нулевым средним значением и неизвестным энергетическим спектром сигнала. Сигналы такого вида еще называют стохастическими. При выводе достаточной статистики будем полагать, что интервал наблюдения T_n значительно превышает время корреляции и принимаемых полезных, и помеховых колебаний, то есть $\Pi \gg 1/T_n$, где Π – полоса частот рассматриваемых сигналов.

Известно, что при быстрых флуктуациях принимаемых сигналов решающая матрица $\vec{L}_A(s, \theta)$ может быть найдена путем преобразования левой и правой части интегрально-матричного уравнения (4.30a) по Фурье. В связи с этим введем блочные матрицы $\vec{N}(\omega)$ взаимных энергетических спектров помехи и $\vec{N}_C(\omega)$ взаимных энергетических спектров сигнала. Полагая, что полезный сигнал, распространяясь от своего источника, подвергается только регулярным линейным преобразованиям, представим, как

и для предыдущих достаточных статистик, блочную матрицу сигнала $\vec{N}_C(\omega)$ размером $M_2 \times M_2$ с подматрицами размера $m_1 \times m_1$ в виде

$$\vec{N}_C(\omega) = N_C \cdot S_C(\omega) \cdot \vec{\Phi}_0(\omega) \cdot \vec{\Phi}_0^{*T}(\omega). \quad (4.40)$$

Здесь N_C и $S_C(\omega)$ – соответственно спектральная плотность мощности помехи и нормированный энергетический спектр полезного сигнала на выходе приемных элементов; $\vec{\Phi}_0(\omega)$ – блочный вектор-столбец размера $m_2 \times 1$ с элементами в виде простых вектор-столбцов размером $m_1 \times 1$ (то есть $\vec{\Phi}_{0i}(\omega) = \|\Phi_{0ij}\|$, где $i = 1 \dots m_2; j = 1 \dots m_1$), образованный из столбцов матрицы \vec{G} размером $M_2 \times M_1$ ожидаемого амплитудно-фазочастотного распределения полезного стохастического сигнала. Тогда блочная матрица $\vec{N}(\omega)$ размера $m_2 \times m_2$ с подматрицами размера $m_1 \times m_1$ взаимных энергетических спектров помех и собственных шумов элементов плоской ФАР примет следующий вид:

$$\vec{N}(\omega) = \vec{N}_{\text{ш}}(\omega) + \sum_{k=1}^l N_k(\omega) \vec{\Phi}_{\text{пк}}(\omega) \vec{\Phi}_{\text{пк}}^{*T}(\omega), \quad (4.41)$$

где $\vec{N}_{\text{ш}}(\omega)$ – блочная матрица размером $M_2 \times M_2$ взаимных энергетических спектров собственных шумов приёмных элементов с блочными элементами в виде матриц размера $m_1 \times m_1$; $N_k(\omega)$ – энергетический спектр k -го помехового сигнала; $\vec{\Phi}_{\text{пк}}(\omega)$ – блочный вектор-столбец размера $m_2 \times 1$, составленный из матрицы \vec{G}_k размера $m_2 \times m_1$, характеризующий амплитудно-фазочастотное распределение k -го ($k = \overline{1 \dots l}$) источника помех, причём элементы $\vec{\Phi}_{\text{пк}}(\omega)$ представляют собой вектор-столбцы размером $m_1 \times 1$, то есть $\vec{\Phi}_{\text{пк}_i}(\omega) = \|\Phi_{\text{пк}_{i,j}}\| = \|G_{k_{i,j}}\|$. В этом случае достаточная статистика в виде логарифма отношения правдоподобия принимает вид

$$\ln \ell = \frac{N_C}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S_C(\omega)}{\Delta_C(\omega)} \left| \vec{D}_0^T(\omega) \cdot \vec{N}^{-1}(\omega) \cdot \vec{K}_C^*(\omega) \right|^2 \frac{d\omega}{2\pi} - T_H \int_{-\infty}^{\infty} \ln(\Delta_C(\omega)) \frac{d\omega}{2\pi}, \quad (4.42)$$

где $\Delta_C(\omega) = 1 + N_C \cdot S_C \cdot \vec{\Phi}_0^T(\omega) \cdot \vec{N}^{-1}(\omega) \cdot \vec{K}_C^*(\omega)$, $\vec{D}_0(\omega)$ – блочный вектор-столбец размера $m_2 \times 1$ с элементами $\vec{D}_{0_i}(\omega) = \|D_{0_{ij}}(\omega)\|$, составленный из

значений матрицы принимаемых колебаний $\vec{U}_0(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{U}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$;
 $\vec{K}_c(\omega) = \vec{X}_\beta(\omega) \vec{X}_\varepsilon(\omega)$; $\vec{X}_\beta(\omega)$ – вектор размером $m_1 \times 1$, характеризующий
 ожидаемое амплитудно-фазочастотное распределение полезного стохастического сигнала в плоскости β ; $\vec{X}_\varepsilon(\omega)$ – вектор-строка размера $1 \times m_2$, характеризующий ожидаемое амплитудно-фазочастотное распределение полезного стохастического сигнала в плоскости ε .

Обозначив через $h_c(t)$ огибающую импульсной характеристики линейного фильтра с частотной характеристикой $\sqrt{S_c(\omega)/\Delta_c(\omega)}$ и введя скалярный сигнал $W_c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{D}^T(\omega) \cdot \vec{N}^{-1}(\omega) \cdot \vec{K}_c^*(\omega) \cdot e^{j\omega t} dt / 2\pi$, логарифм отношения правдоподобия (4.42) представим в окончательном виде:

$$\ln \ell = \frac{N_c}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |Z_c(t)|^2 dt - T_H \int_{-\infty}^{\infty} \ln(\Delta_c(\omega)) \frac{d\omega}{2\pi}, \quad (4.43)$$

где

$$Z_c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_c(t-\tau) W_c(\tau) d\tau. \quad (4.44)$$

Достаточные статистики для детерминированного (4.34), квазидетерминированного (4.37) и стохастического (4.43) сигналов позволяют перейти к решению задач, поставленных в предыдущем параграфе, а именно: а) осуществить детализацию фундаментальной схемы (4.11)–(4.14)), то есть на основе законов дедукции сформировать сеть частных теоретических и эмпирических схем, которые во взаимосвязи и во взаимозависимости с фундаментальной схемой образуют *дедуктивную статистическую теорию радиолокационной системотехники* (рис. 3.4); б) верифицировать (подтвердить эффективность) сформулированного ранее **системотехнического метода** (упомянутого ранее решающего правила), позволяющего, в свою очередь, выработать совокупность схем и методик **инженерной (системотехнической) деятельности** по синтезу алгоритмов и устройств адаптивной обработки сигналов и измерения их параметров на фоне помех; в) провести исследование на статистической (имитационной) модели измерительной радиолокационной системы основных показателей качества синтезированных адаптивных алгоритмов.

Методику построения дедуктивной статистической теории радиолокационной системотехники рассмотрим на примере измерения угловых,

времячастотных и поляризационных параметров сигнала *со случайной амплитудой и начальной фазой*¹³³ на фоне помех, коррелированных соответственно по пространству, времени и поляризации. В рамках решения поставленной задачи в качестве составляющих параметра $\vec{\lambda}_1$ будут выступать: а) число и угловые положения источников активных помех, а также интенсивности (спектральные плотности мощности) сигналов активных помех; б) доплеровские составляющие частоты и интенсивности пассивных помех; в) время запаздывания и интенсивность импульсных помех, уводящих по дальности; г) поляризационные параметры внешних активных помех. В качестве же составляющих параметра $\vec{\lambda}_2$ будут выступать: а) случайные начальная фаза и амплитуда сигнала; б) энергия ожидаемого сигнала (так как в условиях адаптации к соответствующим видам внешних помех составляющие вектора информативных параметров (угловые координаты, радиальная скорость, время запаздывания и поляризационные параметры сигнала) принимают энергетический характер); в) закон распределения амплитуды эхо-сигнала (так как в некоторых случаях, например, при сопровождении цели с доминирующей блестящей точкой, учет закона распределения амплитуды сигнала при синтезе измерителей оказывается достаточно существенным с точки зрения точности измерения).

Первая (и исходная) задача, которая здесь возникает, связана со снятием априорной неопределенности параметров сигнала относительно параметров активных помех (помех, коррелированных по пространству), так как отсутствие информации о числе, угловых положениях источников и интенсивности активных помех не позволяет приступить к основной задаче радиолокационного наблюдения – задаче оценки признака обнаружения цели \hat{A} , а также к оценке соответствующих информативных параметров сигнала. При этом особенности адаптации измерительного комплекса к пассивным помехам, прицельным по поляризации активным помехам и уводящим по дальности активным импульсным помехам, в силу введенного предположения о разделении обработки на пространственную и временную, будут рассмотрены в качестве относительно самостоятельных задач.

Вторая задача связана с преодолением априорной неопределенности сигнала относительно параметра $\vec{\lambda}_2$ (в первую очередь – относительно

¹³³ Такая статистическая (релеевская) модель сигнала является наиболее распространенной в РЛС обзорного типа и с этой точки зрения – наиболее интересной для рассмотрения. Более сложные модели сигнала, в частности, некогерентная пачка радиоимпульсов и стохастический (шумовой) сигнал (в силу ограниченности объема монографии) будут пока опущены. Тем не менее, закономерности преодоления априорной неопределенности, выявленные на примере релеевской модели сигнала, оказываются справедливыми и для остальных моделей радиолокационных сигналов.

неизвестной энергии ожидаемого сигнала), так как наличие этой неопределенности приводит к возникновению систематических и росту флуктуационных ошибок измерения параметров радиолокационного сигнала.

4.4. Основные алгоритмы и устройства адаптации к активным помехам

Задачу адаптации измерительного комплекса к активным помехам сначала рассмотрим на примере линейной антенной решетки. Это позволит существенно упростить математические вычисления при сохранении общей схемы метода. Переход к плоской ФАР, с выяснением особенностей ее поведения в различных условиях воздушной и помеховой обстановки, будет осуществлен на этапе статистического моделирования полученных адаптивных алгоритмов и устройств обработки.

Применительно к линейной ФАР матрица огибающих входных воздействий (4.15) преобразуется в вектор \vec{Y} размера m , где m – число элементов линейной антенной решетки; вектор двумерного амплитудно-фазового распределения (АФР) $\vec{K}(t, \vec{\alpha})$ преобразуется в вектор линейного АФР $\vec{X}(t, \vec{\alpha}) = X(t) \vec{X}(\vec{\alpha})$, а схема адаптивного обнаружителя на базе плоской ФАР (рис. 4.3) преобразуется к виду, представленному на рис. 4.4. Здесь $\vec{\alpha}$ – векторный информативный параметр применительно к линейной ФАР. От соответствующего векторного параметра, входящего в матрицу $\vec{K}(t, \vec{\alpha})$, он отличается тем, что в нем отсутствует одна из двух угловых координат цели, например, угол места. В линейной адаптивной ФАР (АФАР) вектор $\vec{X}(t, \vec{\alpha})$ используется в качестве вектора АФР по соответствующей координате (конкретнее – по азимуту β). В этом случае будем полагать, что $\vec{X}(\vec{\alpha}) = \vec{X}(\beta) = \vec{X}$.

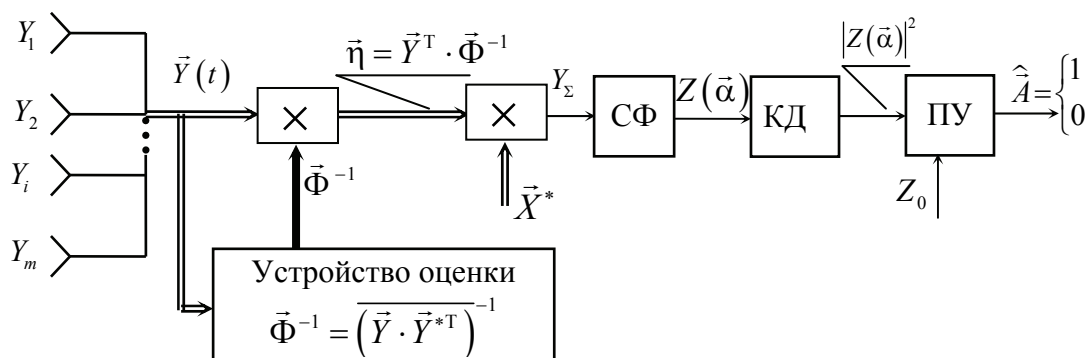


Рис. 4.4. Структурная схема обнаружителя на базе линейной АФАР

Как следует из схемы, представленной на рис. 4.4, техническая реализация адаптивного обнаружителя (системы адаптивной пространственной обработки сигналов или АФАР) связана с оценкой КМП и последующим ее обращением (вычислением ОКМП, $\vec{\Phi}^{-1}$), так как именно обратная матрица содержит в себе всю исчерпывающую информацию об угловых положениях источников и спектральных плотностях мощности излучаемых ими активных помех. В реальных же условиях воздушной и помеховой обстановки могут изменяться как параметры внешних помех, так и параметры самой РЛС, в частности, угловое положение диаграммы направленности ФАР в процессе обзора воздушного пространства. Поэтому реальный интерес представляет текущая (дискретная или непрерывная) оценка изменяющейся во времени КМП или ОКМП. Рассмотрим основные алгоритмы такой оценки.

4.4.1. Дискретное и непрерывное оценивание изменяющейся во времени корреляционной матрицы помех

При решении поставленной задачи будем полагать, что амплитуда эхосигнала значительно меньше интенсивности помехи, поэтому полезный эхосигнал не оказывает существенного влияния на оценку матрицы помехи и сигнала (4.16а), то есть $\vec{\Phi}(t, s) = \vec{\Phi}_{\text{СП}}(t, s) = \vec{\Phi}_{\text{П}}(t, s, \lambda_1)$. В этой связи оценку корреляционной матрицы $\hat{\Phi}$ можно заменить оценкой КМП $\hat{\Phi}_{\text{П}}$ и наоборот¹³⁴. При рассмотрении задачи пеленгации источника активной помехи на фоне сигналов других источников это ограничение будет впоследствии снято.

Пусть на входах линейной ФАР, состоящей из m элементов, действует активная помеха с мгновенными значениями $y_1(t) \dots y_m(t)$, сдвинутыми по фазе от элемента к элементу решетки за счет разности хода $\Delta Д$ на величину $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta Д$, где λ – длина волны принимаемых колебаний. Представим помеховые сигналы на выходе i -го канала в виде набора дискретных отсчетов мгновенных амплитуд y_{il} с периодом дискретизации $T_d = 1/2 f_m$, соответствующим условию теоремы Котельникова (рис. 4.5). Здесь $i = 1, 2 \dots m$; $l = 1, 2 \dots k$, f_m – частота самой высокочастотной составляющей спектра дискретизируемого сигнала.

¹³⁴ Важно подчеркнуть, что в оценках КМП, при всех упрощениях, учет внутренних шумов приемных элементов ФАР является обязательным. В противном случае она не будет иметь обратную матрицу, и алгоритм адаптации будет возбуждаться.

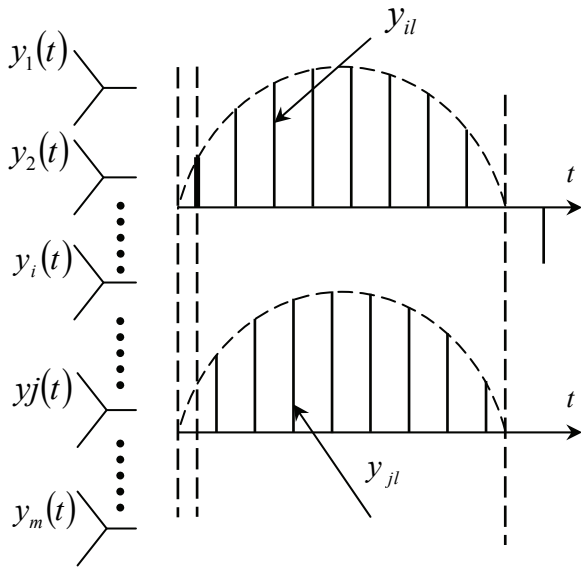


Рис. 4.5. К выводу алгоритма фильтрации КМП

Для определения взаимной корреляции между сигналами i и j каналов (то есть между y_i и y_j) необходимо взять среднееарифметическое значение корреляционных моментов $y_i y_j$ по числу отсчетов l от 1 до k : $\hat{y}_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k y_{il} y_{jl}$.

Введя комплексные амплитуды Y_{il} и Y_{jl} и корреляционный момент $\hat{\Phi}$, получим

$$\hat{\Phi}_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k (Y_{il} Y_{jl}^* / 2). \quad (4.45)$$

Если операцию (4.45) выполнить по всем элементам решетки, то получим оценку КМП:

$$\hat{\Phi} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k (\vec{Y}_l \vec{Y}_l^{T*} / 2) = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k \hat{\Phi}_{yl}, \quad (4.46)$$

где $\hat{\Phi}$ – текущая оценка КМП.

На $k + 1$ -м шаге матрица (4.46) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}_{k+1} &= \frac{1}{1+k} \sum_{l=1}^{k+1} \hat{\Phi}_{yl} = \frac{1}{1+k} \sum_{l=1}^k \hat{\Phi}_{yl} + \frac{1}{1+k} \hat{\Phi}_{y(k+1)} = \frac{k}{1+k} \hat{\Phi}_k + \frac{1}{1+k} \hat{\Phi}_{y(k+1)} = \\ &= \left(1 - \frac{1}{k+1} \right) \hat{\Phi}_k + \frac{1}{k+1} \hat{\Phi}_{y(k+1)} = \hat{\Phi}_k + \frac{1}{k+1} \left(\hat{\Phi}_{y(k+1)} - \hat{\Phi}_k \right). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\hat{\Phi}_{(k+1)} = \hat{\Phi}_k + \frac{1}{k+1} \left(\hat{\Phi}_{y(k+1)} - \hat{\Phi}_k \right). \quad (4.47)$$

Уравнение (4.47) представляет собой рекуррентный алгоритм оценки неизменяющейся во времени матрицы $\hat{\Phi}$. Разность, представленную в круглых скобках этого выражения, называют невязкой. С течением времени (увеличением k) вес невязки убывает до нуля (рис. 4.6), что вполне

закономерно для стационарной помеховой обстановки. В случае оценки изменяющейся во времени КМП необходимо в рекуррентный алгоритм вводить модель изменения матрицы (коэффициент сглаживания оценки), отдавая предпочтение не предыдущей, а текущим оценкам КМП (невязке). Простейшей моделью сглаживания оценок КМП является модель сглаживания «скользящее окно». Такой алгоритм сглаживания оценок КМП можно получить из выражения (4.47), заменив убывающий до нуля коэффициент $1/(1+k)$ коэффициентом $1/\phi$, где $\phi > 0$ – начальное число, определяющее размер «окна» по числу выборок, одновременно участвующих в формировании оценки матрицы. Если помеховая обстановка (в первую очередь пространственное положение источников помех) изменяется достаточно быстро, то значение ϕ уменьшают, если медленно – увеличивают (рис. 4.7).

$$\hat{\Phi}_{(k+1)} = \hat{\Phi}_k + \frac{1}{\phi} (\hat{\Phi}_{y(k+1)} - \hat{\Phi}_k). \quad (4.48)$$

При аналоговой обработке сигналов возникает необходимость в алгоритмах непрерывной оценки матрицы $\hat{\Phi}$, которые можно получить из соотношения (4.46).

Умножив уравнение $\hat{\Phi} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k \hat{\Phi}_{y_l}$ на $\Delta t / \Delta t$, получим $\hat{\Phi}_{k+1} = \frac{1}{k\Delta t} \sum_{l=1}^k \hat{\Phi}_{y_l} \Delta t$

При $\Delta t \rightarrow 0$

$$\hat{\Phi} = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \hat{\Phi}_y(t) dt. \quad (4.49)$$

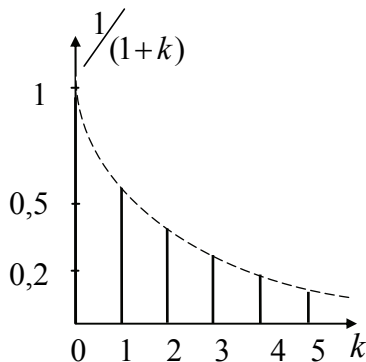


Рис. 4.6. Уменьшение величины невязки в зависимости от увеличения количества шагов оценки при сходящемся алгоритме

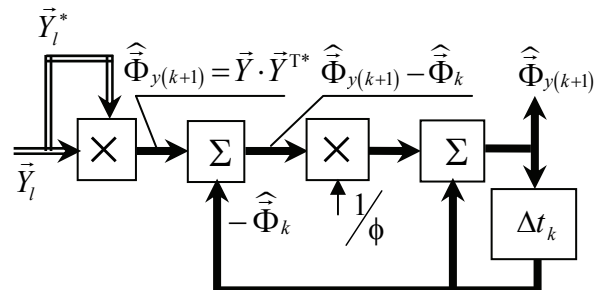


Рис. 4.7. Структурная схема рекуррентного оценивания КМП

Соотношение (4.49) представляет собой решение уравнения

$$T \frac{d\hat{\Phi}(t)}{dt} = \hat{\Phi}_y(t). \quad (4.50)$$

Подобное уравнение для оценки (4.48) имеет вид

$$T \frac{d\hat{\Phi}(t)}{dt} + \hat{\Phi}(t) = \hat{\Phi}_y(t), \quad (4.51)$$

$$T \frac{d\hat{\Phi}(t)}{dt} = \left(\hat{\Phi}_y(t) - \hat{\Phi}(t) \right). \quad (4.52)$$

Иногда более удобным является сглаживание результатов текущих оценок с весами, уменьшающимися по мере старения полученных текущих оценок. Алгоритм (4.52) в этом случае принимает вид¹³⁵

$$T \frac{d\hat{\Phi}(t)}{dt} = \vec{A}\hat{\Phi}(t) + \vec{C}^{-1}\vec{C}_y \left(\hat{\Phi}_y(t) - \hat{\Phi}(t) \right). \quad (4.53)$$

Здесь \vec{A} – динамическая матрица пересчета. Матрицы \vec{C}^{-1} и \vec{C}_y – корреляционная матрица ошибок результирующего измерения и матрица точности текущего измерения соответственно. Структурная схема устройства непрерывной фильтрации матрицы, реализующая алгоритм (4.53), представлена на рис. 4.8. Таким образом, алгоритмы (4.48), (4.53) обеспечивают формирование дискретных и непрерывных оценок матрицы $\hat{\Phi}$ с учетом некоторой модели ее изменения во времени. Вместе с тем техническая реализация таких алгоритмов в реальном масштабе времени оказывается достаточно сложной, так как помимо емких векторно-матричных операций вычисления КМП здесь требуются дополнительные, не менее емкие, операции обращения матрицы $\hat{\Phi}$.

В то же время векторно-матричная операция компенсации коррелированных активных помех $\vec{\eta} = \vec{Y}^T \cdot \vec{\Phi}^{-1}$ связана с предварительным вычислением не КМП, а ей обратной, то есть ОКМП $\vec{\Phi}^{-1} = \overline{(\vec{Y} \cdot \vec{Y}^{*T})}^{-1}$ (рис. 4.5).

¹³⁵ Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М. : Радио и связь, 1981. С. 348–350; Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / Ширман Я.Д. [и др.]; ред. Я.Д. Ширман. М., 1998. 828 с.; Бакулев П.А. Радиолокационные системы. М., 2007. 376 с.

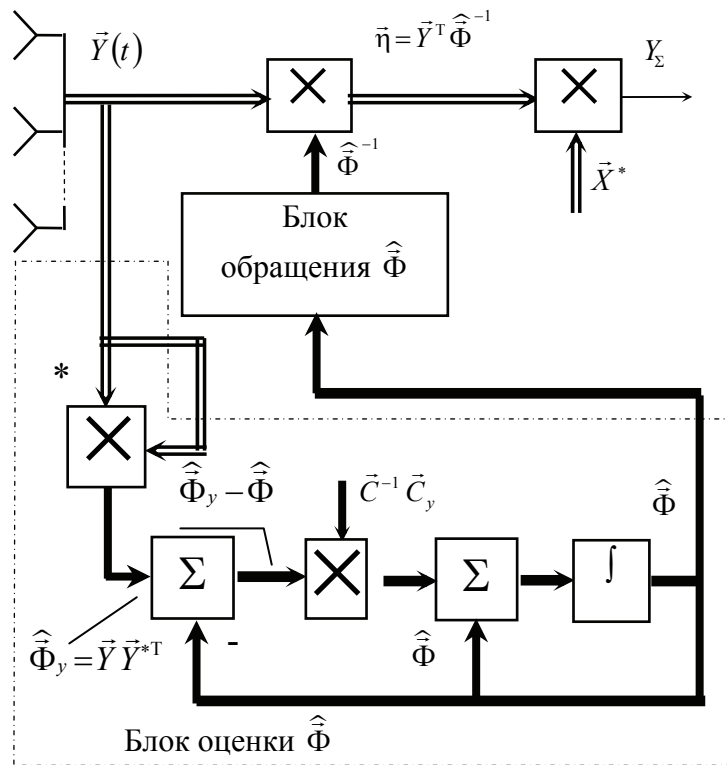


Рис. 4.8. Структурная схема устройства непрерывной фильтрации КМП

Поэтому на практике операции вычисления и последующего обращения КМП заменяют более простыми операциями текущего оценивания самой ОКМП $\hat{\Phi}^{-1}$.

4.4.2. Оценивание изменяющейся во времени матрицы, обратной корреляционной матрице помех

Оценим ОКМП из очевидного уравнения $\hat{\Phi}^{-1} \hat{\Phi} = \vec{I}$. Продифференцировав это уравнение во времени

$$\left(\frac{d\hat{\Phi}^{-1}}{dt} \right) \hat{\Phi} + \hat{\Phi}^{-1} \left(\frac{d\hat{\Phi}}{dt} \right) = 0,$$

и умножив результат дифференцирования справа на $\hat{\Phi}^{-1}$, получим

$$\frac{d\hat{\Phi}^{-1}}{dt} = -\hat{\Phi}^{-1} \left(\frac{d\hat{\Phi}}{dt} \right) \hat{\Phi}^{-1}. \quad (4.53a)$$

Учитывая (4.52), уравнение (4.53a) преобразуем к виду

$$T \frac{d\hat{\Phi}^{-1}}{dt} = -\hat{\Phi}^{-1} \left(\hat{\Phi}_y \hat{\Phi}^{-1} - \vec{I} \right) = \hat{\Phi}^{-1} - \hat{\Phi}^{-1} \hat{\Phi}_y \hat{\Phi}^{-1}$$

или

$$\hat{\Phi}^{-1} = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \left(\hat{\Phi}^{-1} - \vec{\eta} \vec{\eta}^{*T} \right) dt. \quad (4.54)$$

Устройство непрерывной оценки ОКМП, реализующее алгоритм (4.54), представлено на рис. 4.9. Здесь введен преобразованный вектор $\vec{\eta} = \vec{Y}^T \hat{\Phi}^{-1}$, в котором, как отмечалось ранее, сигнал помехи уже подавлен. Очевидно, что техническая реализация алгоритма ОКМП значительно проще алгоритмов фильтрации $\hat{\Phi}$, так как позволяет проводить непосредственно вычисление оценки $\hat{\Phi}^{-1}$ и преобразованного вектора $\vec{\eta}$.

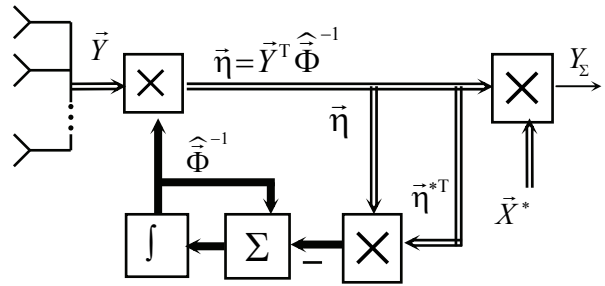


Рис. 4.9. Структурная схема устройства непрерывной оценки ОКМП

Таким образом, преодоление априорной неопределенности информативного параметра $\vec{\alpha}$ относительно параметров внешних активных помех $\vec{\lambda}_1^A$ требует вычисления КМП $\vec{\Phi}_\Pi$ с последующим ее обращением либо вычисления собственно ОКМП $\hat{\Phi}^{-1}$ и формирования преобразованного вектора $\vec{\eta} = \vec{Y}^T \hat{\Phi}^{-1}$. Как те, так и другие варианты требуют емких операций векторно-матричного перемножения, однако вычисление ОКМП оказывается значительно более простым при сохранении всех характеристик процесса адаптации (быстродействия и коэффициента подавления помех), поскольку при переходе от оценки $\hat{\Phi}$ к оценке $\hat{\Phi}^{-1}$ никаких ограничений на алгоритмы адаптации не накладывалось.

4.4.3. Алгоритмы и устройства оценивания весового вектора. Применение корреляционной обратной связи в устройствах обработки

Итак, для преодоления априорной неопределенности информативного параметра $\vec{\alpha}$ относительно параметров внешних активных помех $\vec{\lambda}_1^A$

необходимо вычисление $\hat{\Phi}$ или $\hat{\Phi}^{-1}$, с последующей векторно-матричной операцией вычисления комплексного весового (корреляционного) интеграла

$$Z(t, \vec{\alpha}) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{Y}^T(t, \vec{\alpha}) \cdot \vec{\Phi}^{-1}(t) \cdot \vec{X}^*(t, \vec{\alpha}) dt,$$

который в условиях разделения обработки на пространственную и временную превращается в весовую сумму $Y_{\Sigma} = \vec{Y}^T \vec{\Phi}^{-1} \vec{X}^*$. При этом на каждом шаге адаптации необходимо выполнить m^2 операций векторно-матричного перемножения $\vec{\eta} = \vec{Y}^T \hat{\Phi}^{-1}$ и m операций векторного перемножения квадратичной формы $Y_{\Sigma} = \vec{Y}^T \vec{\Phi}^{-1} \vec{X}^*$.

Для упрощения операций обработки от оценки матрицы $\hat{\Phi}^{-1}$ переходят к оценке вектора $\hat{R} = \hat{\Phi}^{-1} \vec{X}^*$, получившего название *весового вектора*. В этом случае, во-первых, отпадает необходимость выполнения операций перемножения $\hat{\Phi}^{-1} \vec{X}^*$ на каждом шаге адаптации; во-вторых, значительно упрощается вычисление самого вектора $\vec{R}(\vec{\alpha})$, так как здесь присутствуют только операции векторного перемножения, и, в-третьих, наличие в таких алгоритмах адаптации корреляционной обратной связи обеспечивает минимизацию остатков компенсации помех, что весьма существенно при аналоговой реализации устройства обработки, характеризующейся нестабильностью работы входящих в него элементов.

Умножив соотношение (4.54) оценки матрицы $\hat{\Phi}^{-1}$ на \vec{X} справа, находим уравнение для весового вектора \vec{R} :

$$T d\hat{R}/dt = -\hat{\Phi}^{-1} \left(\hat{\Phi}_y \vec{R} - \vec{X} \right) = -\hat{\Phi}^{-1} \left(\vec{Y} Y_{\Sigma}^* - \vec{X} \right), \quad (4.55)$$

где $Y_{\Sigma} = \vec{Y}^T \vec{R}^* = \vec{Y}^T \hat{\Phi}^{-1} \vec{X}^*$.

Структурная схема устройства оценки весового вектора \vec{R} , реализующего алгоритм (4.55), представлена на рис. 4.10. Матричный множитель $\hat{\Phi}^{-1}$ при невязке (4.55) существенно усложняет реализацию этого алгоритма, так как требует дополнительного блока обращения матрицы $\hat{\Phi}$. Однако этот множитель, оказывая существенное влияние на переходные

процессы адаптации, не влияет на качество помехозащиты в установившемся режиме. На практике этот матричный множитель обычно заменяют некоторой константой γ , и алгоритм оценки вектора \vec{R} принимает следующий вид:

$$T d\hat{R}/dt = -\gamma(\hat{\Phi}_y \vec{R} - \vec{X}) = -\gamma(\vec{Y}Y_\Sigma^* - \vec{X}). \quad (4.56)$$

Для снижения влияния замены матричного множителя $\hat{\Phi}^{-1}$ на скаляр γ вектор входных воздействий \vec{Y} предварительно пропускают через преобразующую диагональную нормирующую матрицу \vec{L} , действие элементов которой эквивалентно действию шумовой автоматической регулировки усиления (ШАРУ). Это несколько повышает быстродействие и устойчивость работы устройства адаптации в сложной помеховой обстановке. Структурная схема, реализующая алгоритм (4.56), представлена на рис. 4.11. Подобные устройства иногда называют многоканальными автокомпенсаторами помех без выделенного основного канала. Они представляют собой многоканальную следящую систему, адаптирующуюся к параметру обстановки $\vec{\lambda}_1^A$ за счет адаптивного управления амплитудой и фазой помеховых колебаний сразу по всем элементам ФАР.

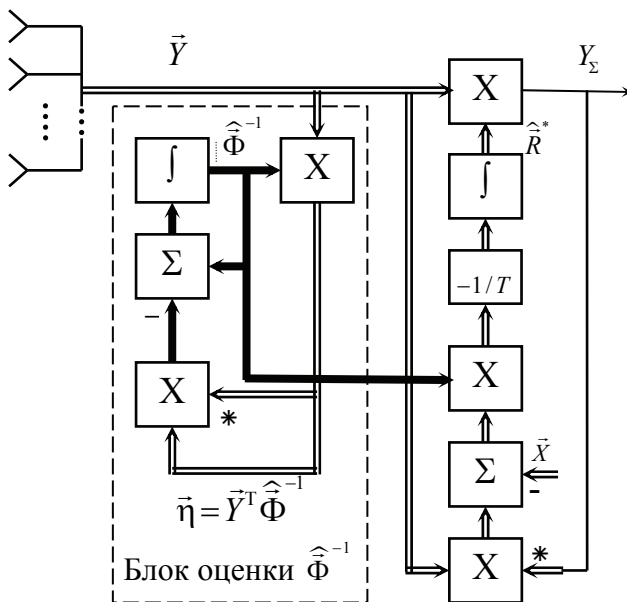


Рис. 4.10. Структурная схема АФАР на базе автокомпенсатора без выделенного основного канала

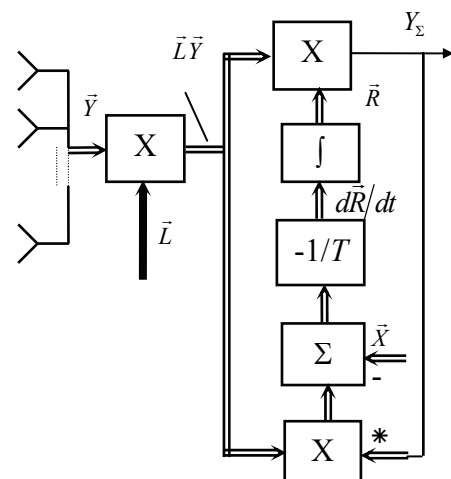


Рис. 4.11. Структурная схема АФАР с равноценными каналами

Если результирующий вектор \vec{R} представить в виде векторной суммы

$$\vec{R} = \gamma(\vec{X} + \vec{R}_\Delta), \quad (4.57)$$

то уравнение (4.56) преобразуется в систему уравнений, вида

$$\begin{cases} Y_\Sigma = \vec{Y}^T \vec{R}^* = \gamma(\vec{Y}^T \vec{X}^* + \vec{Y}^T \vec{R}_\Delta^*) = y_{\Sigma 1} + y_{\Sigma \Delta} \\ T d\vec{R}_\Delta/dt = -\gamma \vec{Y} \vec{Y}^T \vec{R}^* = -\gamma \vec{Y} Y_\Sigma^*. \end{cases} \quad (4.58)$$

Устройство, реализующее систему уравнений (4.58), представлено на рис. 4.12. Очевидно, что при числе компенсационных (дополнительных) каналов n , равном единице, такая схема преобразуется в обычный одноканальный автокомпенсатор. При технической реализации многоканальных автокомпенсаторов, представленных на рис. 4.11, 4.12, во-первых, отпадает необходимость выполнения операций перемножения $\hat{\Phi}^{-1} \vec{X}^*$ на каждом шаге адаптации, во-вторых, значительно упрощается вычисление самого вектора \vec{R} , так как здесь присутствуют только операции векторного перемножения и, в-третьих, наличие в таких устройствах корреляционной обратной связи обеспечивает минимизацию остатков компенсации помех.

Существенным недостатком рассмотренных автокомпенсационных устройств, по сравнению с АФАР на основе оценки КМП или ОКМП (рис. 4.8, 4.9), является необходимость возобновления адаптации при каж-

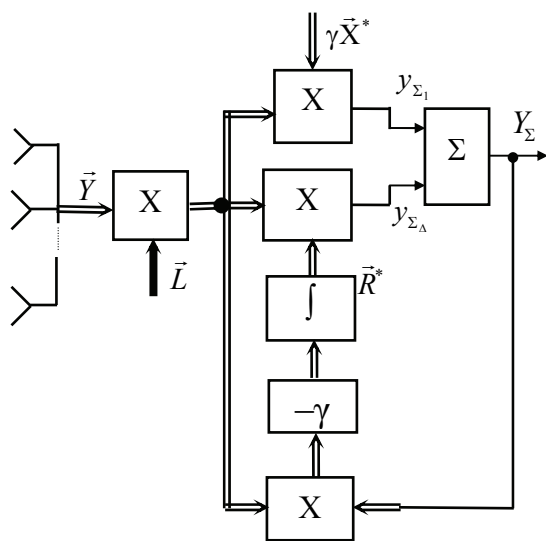


Рис. 4.12. Структурная схема многоканального автокомпенсатора помех с выделенным основным каналом

дом изменении положения диаграммы направленности АФАР (при каждом изменении вектора АФР \vec{X}). Кроме того, в сложной помеховой обстановке (при большом числе источников помех N , где $N \leq m$) такие устройства оказываются малоэффективными из-за низкой скорости адаптации. Последнее связано с тем, что в силу слабой направленности отдельного элемента сигнал каждого источника помех попадает во все приемные каналы ФАР и оказываются статистически взаимосвязанными, что негативно влияет на переходные процессы при адаптации.

От отмеченного недостатка свободны равноценные по быстродействию устройства, представленные на рис. 4.8, 4.9. Однако у первого из них отсутствует корреляционная обратная связь, что снижает его эффективность, особенно при неидентичных приемных каналах ФАР. Одновременно оба эти устройства, как уже отмечалось, оказываются достаточно сложными из-за емких матричных операций и не могут быть применены в РЛС с выделенными основным и компенсационными каналами.

Наиболее эффективным является алгоритм с выделенным основным каналом, корреляционными обратными связями и адаптивным матричным (переобеляющим) фильтром в цепи компенсационных каналов.

Этот алгоритм можно получить, представив вектор ожидаемого сигнала $\vec{X}^T = \|X_1, 0 \dots 0\|$. В результате из m параллельных каналов (рис. 4.10), подвергаемых неадаптивной весовой обработке $\gamma\vec{X}$, остается один с остронаправленной антенной; из m адаптивно управляемых каналов, подвергаемых обработке \vec{R}_Δ , остается $(m-1)$ компенсационный канал. В этом случае количество компенсационных каналов может определяться, исходя из ожидаемого числа источников помех N , которое обычно значительно меньше числа элементов ФАР m . Это, в свою очередь, позволяет существенно упростить техническую реализацию адаптивной ФАР. Диаграммы направленности компенсационных каналов должны различаться своей амплитудной или фазовой структурой и могут выбираться разными способами: а) слабонаправленными, прикрывающими только боковые лепестки основной диаграммы направленности; б) остронаправленными, неуправляемыми, перекрывающими не только боковые лепестки, но и скаты диаграммы направленности основного канала, за счет чего происходит повышение качества подавления активных помех на скатах основного лепестка; в) остронаправленными, управляемыми за счет внешней информации об угловых положениях (пеленгах) источников помех.

Заменяя в уравнении (4.58) коэффициент γ на матрицу $\vec{\Phi}_k^{-1}$ размера N , приходим к алгоритму многоканального автокомпенсатора с выделенными основным и компенсационными каналами, корреляционной обратной связью и N -мерным адаптивным матричным фильтром в цепи компенсационных каналов:

$$Y_\Sigma = y_{1A} + \vec{K}^{*T} \vec{Y}_B, \quad (4.59)$$

$$T d\vec{K}_1/dt = -\vec{\Phi}_B^{-1} \vec{Y}_B Y_\Sigma^*, \quad (4.60)$$

$$T d\vec{\Phi}_B^{-1}/dt = \vec{\Phi}_B^{-1} - \vec{\eta}_B \vec{\eta}_B^{*T}, \quad (4.61)$$

процессов адаптивной ФАР на ПЭВМ. Второй подход при условии заранее подготовленной статистической модели оказывается весьма эффективным, наглядным и более достоверным, так как приближен к реальным условиям адаптации. Модель представляет собой цифровой аналог антенной решетки, элементы которой имеют собственные (некоррелированные) шумы, массив внешних помех, количество, интенсивности и угловые положения которых могут изменяться, массив сигнала размера n , а также блок количественной оценки переходных процессов (блок вычисления отношений сигнал/помеха по шагам адаптации) и собственно алгоритмы адаптации, подлежащие исследованию. Вектор входных воздействий представляет собой аддитивную смесь внутренних шумов, сигнала и внешних помех со своими амплитудно-фазовыми распределениями. Переходные процессы по установлению отношения сигнал/(внутренний шум + остаток компенсации помехи) оценивается по соотношению

$$\frac{q^2}{2} = \left| \hat{R}^T \bar{X}^* \right| / \hat{R}^T \bar{\Phi}_и \hat{R}^* , \quad (4.62)$$

где $\bar{\Phi}_и = 1/2(\overline{\bar{Y}\bar{Y}^{*T}})$ – истинная КМП, представляющая собой матрицу, полученную путем усреднения k векторов \bar{Y} . Здесь k – размер массива входных воздействий (количество векторов \bar{Y} в массиве адаптации). По мере установления вектора $\hat{R} = \hat{\Phi}^{-1} \bar{X}^*$ (по мере все большего соответствия оценочной матрицы $\hat{\Phi}^{-1}$ своему истинному значению и, следовательно, собственной прямой матрице $\bar{\Phi}_и$) начинает возрастать отношение сигнал/(внутренний шум + остаток компенсации помехи) q^2 .

Анализ переходных процессов удобно провести по алгоритму (4.59)–(4.61), дискретный аналог которого имеет следующий вид:

$$y_\Sigma^{k+1} = y_{1A}^{k+1} + \bar{K}^{*T(k)} \bar{Y}_B^{k+1} ; \quad (4.63)$$

$$\bar{K}^{k+1} = \bar{K}^k - \bar{\Phi}_B^{-1(k)} \bar{Y}_B^{k+1} \frac{y_\Sigma^{*(k+1)}}{\Pi + \bar{Y}_B^{*T(k+1)} \bar{\Phi}_B^{-1(k)} \bar{Y}_B^{k+1}} ; \quad (4.64)$$

$$\bar{\Phi}_B^{-1(k+1)} = \bar{\Phi}_B^{-1(k)} - \frac{\bar{\Phi}_B^{-1(k)} \bar{Y}_B^{(k+1)} \bar{Y}_B^{*T(k+1)} \bar{\Phi}_B^{-1(k)}}{\Pi + \bar{Y}_B^{*T(k+1)} \bar{\Phi}_B^{-1(k)} \bar{Y}_B^{(k+1)}} . \quad (4.65)$$

Здесь $\Pi = 2m$ – размер упоминавшегося ранее «скользящего окна», в котором усредняются выборки; k – номер шага адаптации (номер отсчета дискретной выборки входного сигнала). Выбор алгоритма (4.59)–(4.61) в качестве исходного связан с тем, что в этом случае нет необходимости отдельно моделировать алгоритмы оценки весового вектора (алгоритмы обычных многоканальных автокомпенсаторов с выделенным основным каналом или равноценными компенсационными каналами), так как он преобразуется в алгоритмы обычного автокомпенсатора при $\vec{\Phi}_B = \vec{I}$. Из алгоритма (4.65) можно получить и алгоритм оценки ОКМП с той лишь особенностью, что вместо \vec{Y}_B размера N необходимо использовать вектор входных воздействий \vec{Y} размера m .

Результаты статистического моделирования рассматриваемых алгоритмов при числе элементов линейной ФАР $m = 16$, $\Pi = 123$ и числе источников помех $N = 7$ представлены на рис. 4.14. Для моделируемой ситуации потенциальное отношение сигнал/шум (то есть отношение, полученное при отсутствии внешних помех) равно 8. Кривыми 1, 3 представлена зависимость q^2 от номера шага адаптации k алгоритма ОКМП и алгоритма с выделенным основным каналом (4.63)–(4.65) соответственно.

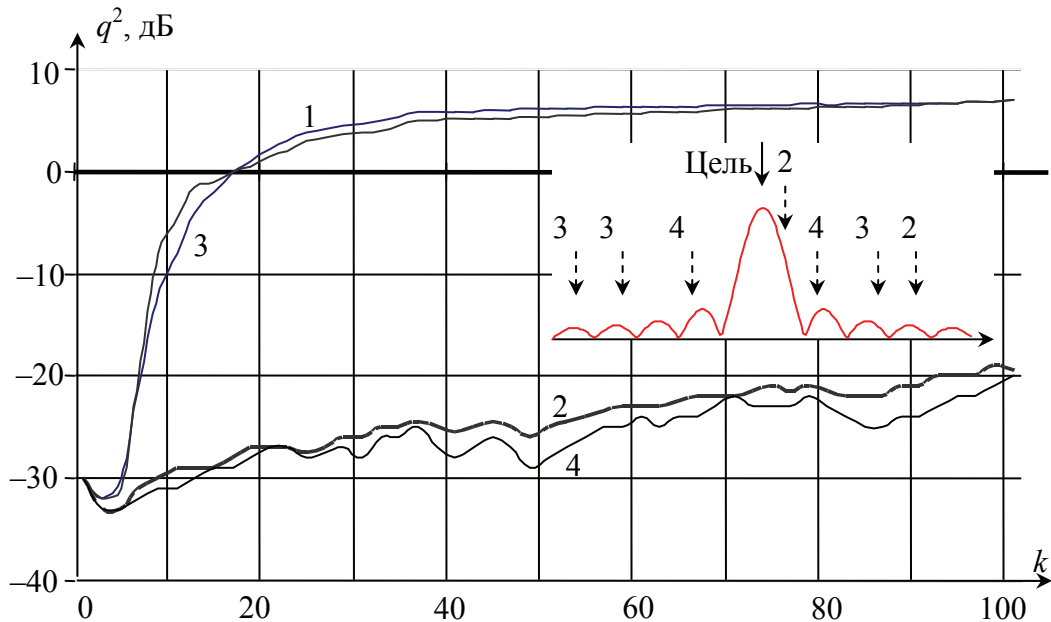


Рис. 4.14. Результаты статистического моделирования переходных процессов основных алгоритмов адаптации

Как видно, данные алгоритмы имеют одинаковое быстродействие и через $k = 14 = 2N$ шагов адаптации потери в отношении сигнал/(шум + остаток компенсации) не превышают 8–10 дБ. Кривой 2 показана зависимость $q^2(k)$ для алгоритма (4.63)–(4.65) при условии, что в нем используются только диагональные элементы матрицы $\vec{\Phi}_B^{-1}$. Кривой 4 представлена эта же зависимость при условии, что матрица $\vec{\Phi}_B^{-1}$ является единичной. В первом случае сигналы помехи каждого из компенсационных каналов нормированы к дисперсии помехи этих каналов, что эквивалентно действию схем ШАРУ. Во втором случае алгоритм (4.63)–(4.65) переходит в алгоритм обычного многоканального автокомпенсатора.

Очевидно, что быстродействие многоканального автокомпенсатора в сложной помеховой обстановке значительно меньше быстродействия оптимальных алгоритмов адаптации, что ставит под сомнение возможность его применения в многоканальных автокомпенсационных системах РЛС.

Так, мы рассмотрели задачу, связанную со снятием априорной неопределенности параметров сигнала относительно параметров активных помех. Далее исследуем задачу, связанную с преодолением априорной неопределенности сигнала относительно неинформативного параметра $\vec{\lambda}_2$, в частности, относительно неизвестной энергии ожидаемого сигнала, поскольку отсутствие такой информации при измерении энергетического параметра приводит к возникновению систематических и росту флуктуационных ошибок измерения.

4.5. Преодоление априорной неопределенности относительно неинформативных параметров сигнала

4.5.1. Преодоление априорной неопределенности относительно энергии ожидаемого сигнала

Ранее отмечалось, что измерение пространственных, времячастотных и поляризационных параметров сигнала может быть следящим и неследящим. В первом случае измеритель строится на основе фильтра Калмана, основным элементом которого является дискриминатор. Алгоритм измерителя дискриминаторного типа получают посредством дифференцирования полной достаточной статистики (4.34) по измеряемым параметрам. Во втором случае измерение осуществляется по максимуму этой достаточной статистики, что применительно к угловым координатам и дальности до

цели соответствует измерителю обзорного типа. Однако как в первом, так и во втором случае для построения измерителей необходимо преодолеть априорную неопределенность относительно неизвестной энергии ожидаемого сигнала, входящей в уравнение полной достаточной статистики.

Эта задача возникает, как уже отмечалось, вследствие того, что измеряемые параметры радиолокационного сигнала при адаптации измерителя к соответствующим видам помех принимают энергетический характер, а именно: отношение сигнал/(шум + остаток компенсации помехи) $q^2(t, \vec{\alpha})$ становится зависимым от расстояния между целью и источником помех по измеряемому параметру. Причем зависимыми оказываются как составляющие, определяемые полезным сигналом, так и составляющие, определяемые помехой (остатками компенсации). В этом случае традиционные алгоритмы измерения, основанные на неполной достаточной статистике $\ln \ell = C |Z(t, \vec{\alpha})|^2$, где C – некоторая константа, оказываются смещенными.

Систематическая ошибка возникает за счет: а) формирования провала в ДНА измерителя угловых координат для подавления сигнала активной помехи; б) формирования провала в амплитудно-частотной характеристике измерителя частоты Доплера, обеспечивающего подавление пассивных помех; в) искажения временной (дискриминаторной) характеристики системы сопровождения по дальности при подавлении помехи, отличающейся от сигнала временем запаздывания (в частности, при подавлении импульсной помехи, уводящей по дальности); г) искажения пространственно-поляризационных параметров измерителя при подавлении активной помехи в области главного лепестка ДНА методом поляризационной селекции.

Рассмотрим задачу преодоления априорной неопределенности относительно энергии ожидаемого сигнала \mathfrak{E}_0 на фоне остатков компенсации соответствующих видов помех, полагая, что измеряемый параметр $\vec{\alpha}$ не зависит от векторного параметра помехи $\vec{\lambda}_1^A$. Достаточная статистика (4.34) для рассматриваемого случая примет вид¹³⁶

$$\ln \ell = \frac{\mathfrak{E}_0 |Z(\vec{\alpha})|^2}{2(1 + \mathfrak{E}_0 v(\vec{\alpha}))} - \ln(1 + \mathfrak{E}_0 v(\vec{\alpha})), \quad (4.66)$$

где $q^2(t, \vec{\alpha}) = \mathfrak{E}_0 v(\vec{\alpha})$.

¹³⁶ Зависимость достаточной статистики (4.66) от вектора параметров пассивных помех $\vec{\lambda}_1^{\Pi}$ будет учтена при описании адаптивных частотных дискриминаторов.

Для преодоления априорной неопределенности $\bar{\alpha}$ относительно Θ_0 применим к достаточной статистике (4.66) адаптивное решающее правило (4.11)–(4.13).

Взяв от выражения (4.66) производную по Θ_0 и приравняв ее к нулю, получим выражение для однократной оценки $\hat{\Theta}$:

$$\frac{d \ln \ell}{d \Theta_0} = \frac{|Z(\bar{\alpha})|^2 2(1 + \Theta_0 v(\bar{\alpha})) - \Theta_0 |Z(\bar{\alpha})|^2 2v(\bar{\alpha})}{4(1 + \Theta_0 v(\bar{\alpha}))} - \frac{v(\bar{\alpha})}{1 + \Theta_0 v(\bar{\alpha})} = 0.$$

Отсюда

$$\hat{\Theta} = \frac{|Z(\bar{\alpha})|^2 - 2v(\bar{\alpha})}{2v^2(\bar{\alpha})}. \quad (4.67)$$

В случае стационарности оценки $\hat{\Theta}$ на интервале $T_3 = n T$ алгоритм (4.67) преобразуется в алгоритм многократной (сглаженной) оценки

$$\hat{\Theta}_{T_3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Z_i(\bar{\alpha})|^2 - 2v(\bar{\alpha})}{2v^2(\bar{\alpha})} \quad (4.68)$$

или

$$\hat{\Theta}_{T_3} = \frac{1}{T_3} \int_t^{t+T_3} \frac{|Z(t, \bar{\alpha})|^2 - 2v(\bar{\alpha})}{2v^2(\bar{\alpha})} dt. \quad (4.69)$$

В результате получаем адаптивный алгоритм вида

$$\ln \ell = \frac{\hat{\Theta}_{T_3} |Z(\bar{\alpha})|^2}{2(1 + \hat{\Theta}_{T_3} v(\bar{\alpha}))} - \ln(1 + \hat{\Theta}_{T_3} v(\bar{\alpha})), \quad (4.70)$$

где оценка $\hat{\Theta}_{T_3}$ определяется уравнением (4.69).

По мере накопления однократных оценок $\hat{\Theta}$ в соответствии с алгоритмом (4.69) алгоритм (4.70) по точности приближается к алгоритму (4.66) с известной энергией сигнала Θ_0 .

Следует заметить, что в случае подстановки в уравнение (4.70) однократной оценки (4.67) эта статистика преобразуется к виду

$$\ln \ell = \frac{|Z(\bar{\alpha})|^2}{2v(\bar{\alpha})} - 1 - \ln \left(\frac{|Z(\bar{\alpha})|^2}{2v(\bar{\alpha})} \right). \quad (4.71)$$

Очевидно, что достаточная статистика (4.71) оказывается инвариантной к энергии ожидаемого сигнала \mathcal{E}_0 , а ее потенциальная точность зависит от точности однократной оценки (4.67) и, следовательно, ниже потенциальной точности алгоритма (4.66) и (4.70).

На практике при использовании алгоритма (4.71) ограничиваются только первым его слагаемым, которое обеспечивает несмещенную оценку параметра $\vec{\alpha}$ при $\nu(\vec{\alpha}) \gg 1$.

Следует подчеркнуть, что многократная оценка $\hat{\mathcal{E}}_{T_3}$ является несмещенной. Действительно, учитывая, что

$$\vec{Y}(t) = \vec{X}_C(t, \vec{\alpha}) + \vec{N}(t), \quad \vec{X}_C(t, \vec{\alpha}) = X_C(t) \vec{X}_C(\vec{\alpha})$$

и

$$|Z(t, \vec{\alpha})|^2 = Z(t, \vec{\alpha}) Z^*(t, \vec{\alpha}),$$

имеем

$$\begin{aligned} & \overline{\frac{1}{2} |Z(t, \vec{\alpha})|^2} \Big|_{\vec{\alpha}=\vec{\alpha}_n} = \overline{\vec{Y}^T \vec{\Phi}^{-1} \vec{X}^*(t, \vec{\alpha}) [\vec{Y}^T \vec{\Phi}^{-1} \vec{X}^*(t, \vec{\alpha})]^*} = \\ & = \vec{X}^{T*}(\hat{\vec{\alpha}}) \vec{\Phi}^{-1} \overline{\left[[X(t) \vec{X}_C(\vec{\alpha}_n) + \vec{N}(t)] [X(t) \vec{X}_C(\vec{\alpha}_n) + \vec{N}(t)]^* \right]} \vec{\Phi}^{-1} \vec{X}^*(\hat{\vec{\alpha}}) = \\ & = \vec{X}^{T*}(\hat{\vec{\alpha}}) \vec{\Phi}^{-1} \left(\overline{X^2(t) \vec{X}_C(\vec{\alpha}_n) \vec{X}_C^{*T}(\vec{\alpha}_n)} + \overline{X(t) \vec{X}_C(\vec{\alpha}_n) \vec{N}^{*T}(t)} + \overline{\vec{N}(t) \vec{X}_C^{*T}(\vec{\alpha}_n) X(t)} + \right. \\ & \quad \left. + \overline{\vec{N}(t) \vec{N}^{*T}(t)} \right) \vec{\Phi}^{-1} \vec{X}^*(\hat{\vec{\alpha}}) = \mathcal{E}_n \vec{X}^{*T}(\hat{\vec{\alpha}}) \vec{\Phi}^{-1} \vec{X}_C(\vec{\alpha}_n) \vec{X}_C^{*T}(\vec{\alpha}_n) \vec{\Phi}^{-1} \vec{X}^*(\hat{\vec{\alpha}}) + \\ & \quad + \vec{X}^{*T}(\hat{\vec{\alpha}}) \vec{\Phi}^{-1} \vec{\Phi} \vec{\Phi}^{-1} \vec{X}^*(\hat{\vec{\alpha}}) = \mathcal{E}_n \nu^2(\vec{\alpha}_n) + \nu(\hat{\vec{\alpha}}). \end{aligned}$$

Таким образом, $\overline{|Z(t, \hat{\vec{\alpha}})|^2} \Big|_{\hat{\vec{\alpha}}=\vec{\alpha}_n} = 2 \left[\mathcal{E}_n \nu^2(\vec{\alpha}_n) + \nu(\hat{\vec{\alpha}}) \right]$.

Подставляя усредненное значение модуля корреляционного интеграла в (4.69), убеждаемся, что $M \left[\hat{\mathcal{E}}_{T_3} \right] \Big|_{\hat{\vec{\alpha}}=\vec{\alpha}_n} = \mathcal{E}_n$. Это подтверждает сходимость многократной оценки $\hat{\mathcal{E}}_{T_3}$ к своему истинному значению \mathcal{E}_n . Подобным образом можно доказать, что и алгоритм (4.70) обеспечивает несмещенное оценивание параметра $\vec{\alpha}$.

В качестве примера рассчитаем дисперсию ошибки измерения углового параметра (азимута) α_1 нешумящей цели в условиях активных помех по адаптивному и неадаптивному алгоритмам измерения. Дважды про-

дифференцировав алгоритмы (4.71) и (4.70) по измеряемому параметру, получим соответствующие выражения для дисперсии ошибок измерения параметра α_1 :

$$\sigma_1^2 = C_{y1}^{-1} = \frac{v(\alpha_n)}{2\mathfrak{E}_n \left[v(\alpha_n)v_\Delta(\alpha_n) - |v'(\alpha_n)|^2 \right]}, \quad (4.72)$$

$$\sigma_2^2 = C_{y2}^{-1} = \frac{1 + \mathfrak{E}_n v(\alpha_n)}{2\mathfrak{E}_n^2 \left[v(\alpha_n)v_\Delta(\alpha_n) - \frac{\mathfrak{E}_n v(\alpha_n) - 1}{\mathfrak{E}_n v(\alpha_n) + 1} |v'(\alpha_n)|^2 \right]}, \quad (4.73)$$

где $v'(\alpha_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{X}_C^T(t, \alpha_n) \frac{d}{d\alpha_1} \bar{R}^*(t, \hat{\alpha}_1) dt,$

$$v_\Delta(\alpha_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d}{d\alpha_1} \bar{X}^T(t, \alpha_n) \frac{d}{d\alpha_1} \bar{R}^*(t, \alpha_n) dt.$$

На рис. 4.15 представлен выигрыш в точности σ_1^2/σ_2^2 измерения угловой координаты нешумящей цели в зависимости от углового положения источника помех α_Π , который входит в область основного лепестка ДНА измерителя, приближаясь к угловому положению нешумящей цели; m – число элементов решетки.

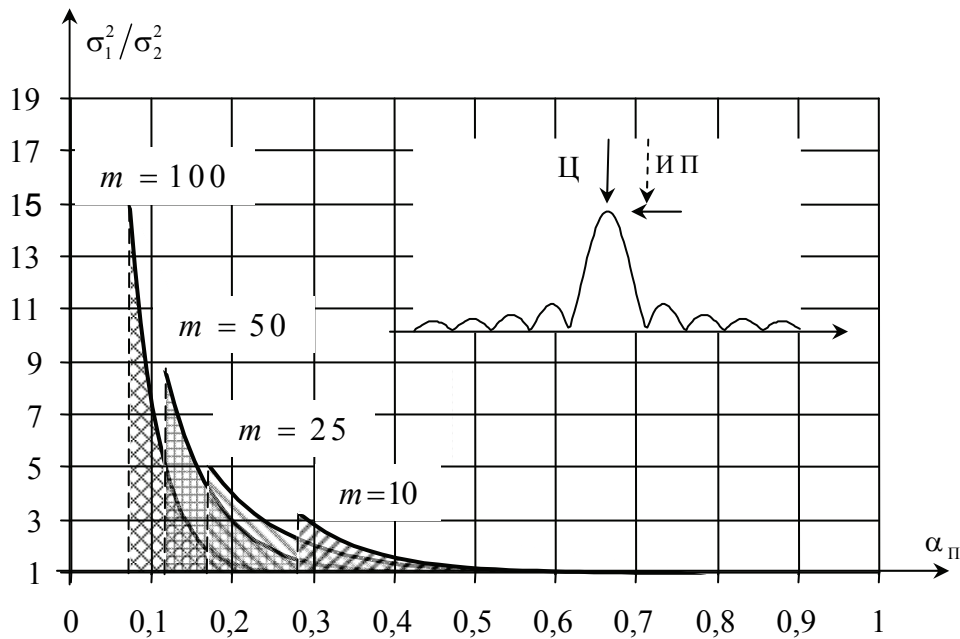


Рис. 4.15. Выигрыш в точности адаптивного алгоритма измерения относительно алгоритма, инвариантного к энергии ожидаемого сигнала

Как видно из рисунка, при слабоэнергетическом характере параметра α_1 , выигрыш в точности незначителен. По мере сокращения углового расстояния между нешумящей целью и источником помех (параметр α_1 становится существенно энергетическим) выигрыш в точности возрастает. Таким образом, неадаптивный алгоритм (4.71) и адаптивный алгоритм (4.70), (4.69) при больших отношениях сигнал/помеха имеют сравнимые показатели точности.

В то же время первый из них более прост в технической реализации и при больших отношениях сигнал/помеха оказывается более предпочтительным. При значениях отношения сигнал/помеха, близких к пороговому, алгоритм (4.70), (4.69) оказывается более точным, хотя и более сложным в технической реализации.

4.5.2. Преодоление априорной неопределенности относительно закона распределения амплитуды отраженного сигнала

Рассмотренная выше достаточная статистика (4.66) справедлива для модели сигнала, отраженного от цели с равноценными блестящими точками (параметр распределения Накагами $\kappa = 1$). Вместе с тем на практике возникает задача обнаружения и измерения параметров сигналов, отраженных от объектов с доминирующей блестящей точкой.

Выражение достаточной статистики для модели сигнала с доминирующей блестящей точкой при $\kappa > 2$ оказывается весьма сложным. Поэтому ограничимся случаем $\kappa = 2$, при котором логарифм отношения правдоподобия (полная достаточная статистика) имеет следующий вид:

$$\ln \ell(\bar{\alpha}) = \frac{\mathfrak{E}_0 |Z(t, \bar{\alpha})|^2}{2(2 + \mathfrak{E}_0 \nu(\bar{\alpha}))} + \ln \left(1 + \frac{\mathfrak{E}_0 |Z(t, \bar{\alpha})|^2}{2(2 + \mathfrak{E}_0 \nu(\bar{\alpha}))} \right) - 2 \ln(1 + \mathfrak{E}_0 \nu(\bar{\alpha})/2). \quad (4.74)$$

Из анализа соотношения (4.74) следует, что даже при неэнергетическом характере измеряемого параметра $\bar{\alpha}$ (то есть при отсутствии помех, когда величина ν не зависит от $\bar{\alpha}$ и ее можно заменить константой), эта статистика содержит дополнительное слагаемое $\ln \left(2 + \frac{\mathfrak{E}_0 |Z(t, \bar{\alpha})|^2}{2(2 + \mathfrak{E}_0 \nu(\bar{\alpha}))} \right)$, что указывает на отличие устройства обработки сигнала данного вида от устройства для сигнала с параметром распределения $\kappa = 1$. При наличии же внешних помех, необходимо учитывать все составляющие этой достаточной статистики, что приводит к существенному усложнению устройства обработки.

Таблица 4.1

Результаты статистического моделирования

Угловые положения источника помех α_{II}	Значения дисперсий и систематических ошибок						Отношение сигнал / (шум + помеха)
	σ_1^2	σ_2^2	$ \alpha_1 $	$ \alpha_2 $	σ_1^2/σ_2^2	$ \alpha_1 / \alpha_2 $	$\Xi_{nv}(\alpha_1)$
0,4	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$5,29 \cdot 10^{-3}$	1,0	1,0	308
0,3	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$2,185 \cdot 10^{-3}$	$6,26 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	1,061	0,92	202
0,2	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$8,05 \cdot 10^{-3}$	$7,85 \cdot 10^{-3}$	1,27	1,03	105,2
0,1	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$6,76 \cdot 10^{-4}$	$2,37 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	1,58	1,94	31

Примечание: здесь σ_1^2, σ_2^2 и $|\alpha_1|, |\alpha_2|$ – соответственно дисперсии и систематические ошибки измерения угловой координаты нешумящей цели по алгоритмам (4.66) и (4.74) на фоне сигнала источника помех, входящего в область главного лепестка.

Результаты статистического моделирования (табл. 4.1) применительно к измерению угловой координаты показывают, что достаточная статистика (4.74) обеспечивает более высокую точность измерения угловой координаты цели с доминирующей блестящей точкой по сравнению с достаточной статистикой (4.66) относительно этой же цели. Выигрыш в точности особенно заметен при отношении сигнал/(шум + остаток компенсации), близком к пороговому значению.

Однако ситуация наличия в составе цели доминирующей блестящей точки и, следовательно, необходимость перехода от измерения по алгоритму (4.66) к измерению по алгоритму (4.74) также носит неопределенный характер и требует дополнительной процедуры преодоления априорной неопределенности – теперь уже относительно параметра распределения Накагами. Решение этой задачи связано с целым направлением в радиолокации – распознаванием класса цели. Распознавание классов может быть осуществлено несколькими способами. Одним из таких способов, причем достаточно сложных, является снятие радиолокационного портрета цели с помощью сверхширокополосных сигналов с последующим их корреляционным анализом (сравнением) с опорными (образцовыми) радиолокационными портретами, хранящимися в памяти ЭВМ. Более простой способ связан с оценкой степени флуктуаций амплитуды импульсов в пачке эхосигналов: если сигналы отражаются от цели, содержащей совокупность равноценных блестящих точек, то среднее значение таких сигналов будет мало, а дисперсия велика. И наоборот, если цель содержит наряду с равноценными и доминирующую блестящую точку, то среднее значение сигнала возрастает, а дисперсия уменьшается.

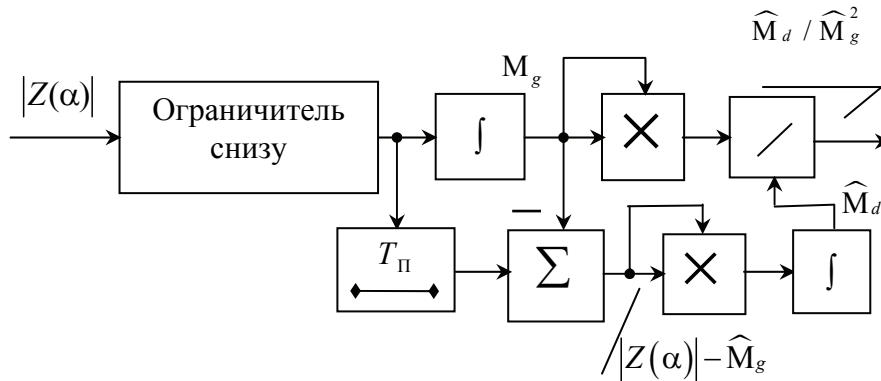


Рис. 4.16. Устройство оценки степени флуктуации пачки эхо-сигнала

Отношение среднего значения к дисперсии может характеризовать наличие или отсутствие в составе цели доминирующей блестящей точки.

Возможный вариант структурной схемы такого устройства представлен на рис. 4.16. Здесь M_g и M_d – соответственно математическое ожидание и дисперсия огибающей пачки эхо-сигналов. Принцип работы схемы понятен из рисунка и предыдущих рассуждений.

В целом, при отсутствии внешних помех нет необходимости учитывать закон распределения амплитуды эхо-сигналов при оценке его параметров.

В случае же воздействия внешних помех при выборе алгоритма обработки целесообразно учитывать закон распределения амплитуды эхо-сигналов. При этом снятие неопределенности относительно параметра распределения амплитудного множителя осуществляется за счет введения в устройство обработки канала распознавания радиолокационных целей. В то же время учет особенностей закона распределения амплитудного множителя сигнала при $k > 2$ представляется нецелесообразным из-за сложности выражения для достаточной статистики и незначительности выигрыша в точности измерения информативных параметров сигнала.

Таким образом, при отсутствии внешних помех измеряемые параметры цели не являются энергетическими и достаточная статистика (4.66) принимает упрощенный вид: $\ln l = C |Z(t, \alpha)|^2$. При наличии внешних помех измеряемые параметры нешумящей цели могут принимать существенно энергетический характер: сигнал/(шум + остаток компенсации помех) оказывается зависимым от измеряемого параметра, что приводит к необходимости учета в достаточной статистике (4.66) всех ее составляющих. Последнее, в свою очередь, связано с преодолением априорной неопределенности относительно энергии ожидаемого сигнала \mathcal{E}_0 . При этом получается два алгоритма измерения информативных параметров: неадаптивный

(4.71) и адаптивный (4.70), (4.69). Более предпочтительным с точки зрения точности измерения информативных параметров оказывается адаптивный алгоритм, который в ряде случаев является адаптивным не только к неизвестной энергии ожидаемого сигнала \mathcal{E}_0 , но и к параметру распределения Накагами κ – закону распределения амплитудного множителя $p(a)$.

4.6. Примеры следящего и неследящего измерения параметров сигнала на фоне активных помех

Как было показано выше, преодоление априорной неопределенности информативного параметра относительно энергии сигнала на фоне внешних помех может быть осуществлено как с помощью адаптивных, так и неадаптивных алгоритмов. Сравнительный анализ точностных характеристик этих алгоритмов показывает, что адаптивный алгоритм измерения хотя и требует дополнительного измерителя энергии сигнала, то есть является более сложным, однако обеспечивает минимизацию флуктуационной и систематической ошибок измерения параметров сигнала на фоне активных помех. Конкретизируем данные алгоритмы применительно к следящему и неследящему измерению углового параметра, времени запаздывания и частоты Доплера сигнала в условиях воздействия соответствующих видов помех.

4.6.1. Алгоритмы и устройства адаптивного следящего измерения углового параметра сигнала

Обобщенный алгоритм следящего измерения был рассмотрен при выводе уравнения для оценки корреляционной матрицы помех и в обобщенном виде может быть представлен следующими соотношениями:

$$\frac{d\hat{\alpha}_p(t)}{dt} = \hat{\alpha}_0 + \vec{C}_p^{-1} \vec{C}_y (\hat{\alpha}_y - \hat{\alpha}_0), \quad \hat{\alpha}_p = \frac{1}{T} \int_0^T \{ \hat{\alpha}_0(t) + \vec{C}_p^{-1} \vec{C}_y [\hat{\alpha}_y(t) - \hat{\alpha}_0(t)] \} dt, \quad (4.75)$$

где $\hat{\alpha}_p, \hat{\alpha}_0, \hat{\alpha}_y$ – соответственно результирующая, прогнозируемая и текущая оценки измеряемого параметра; T – интервал сглаживания оценок.

Обобщенная структурная схема следящего измерителя, реализующая алгоритм (4.75), представлена на рис. 4.17. Поскольку основным его элементом является дискриминатор, синтез такого измерителя обычно сводят к синтезу дискриминатора, в рассматриваемом случае – углового. Алгоритм измерителя дискриминаторного типа получают посредством диффе-

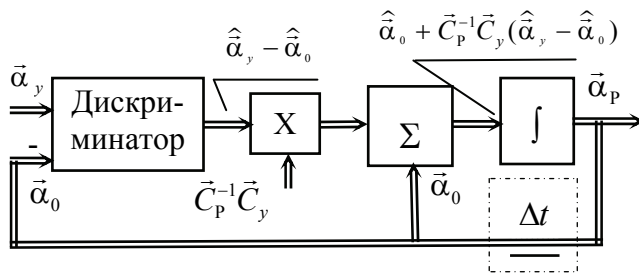


Рис. 4.17. Обобщенная структурная схема простейшего следящего измерителя

ренцирования по измеряемому параметру полной достаточной статистики (4.70) либо инвариантной к энергии ожидаемого сигнала достаточной статистики (4.71).

Во втором случае обычно ограничиваются упрощенным ее вариантом:

$$\ln \ell(\alpha) \cong |Z(\alpha)|^2 / 2v(\alpha). \quad (4.76)$$

Применив к достаточной статистике (4.71) правило синтеза углового дискриминатора

$$\left. \frac{d \ln \ell(\alpha)}{d\alpha} \right|_{\hat{\alpha}=\alpha_n} = 0 \quad (4.77)$$

и приняв расстройку измеряемого параметра относительно опорного достаточно малой, получим алгоритм углового дискриминатора, инвариантного к энергии ожидаемого сигнала:

$$\Delta_1(t, \hat{\alpha}, \alpha_n) = \frac{|Z(t)|^2 - 2v(\hat{\alpha})}{|Z(t)|^2 v(\hat{\alpha})} \operatorname{Re} \left\{ Z^*(t) Z'(t) - \frac{|Z(t)|^2 v'(\hat{\alpha})}{v(\hat{\alpha})} \right\}. \quad (4.78)$$

При $|Z(t)|^2 \gg v(\hat{\alpha})$ алгоритм (4.78) переходит в алгоритм

$$\Delta_2(t, \hat{\alpha}, \alpha_n) = \frac{1}{v(\hat{\alpha})} \operatorname{Re} \left\{ Z^*(t) Z'(t) - \frac{|Z(t)|^2 v'(\hat{\alpha})}{v(\hat{\alpha})} \right\}, \quad (4.79)$$

соответствующий упрощенной достаточной статистике (4.76).

Здесь $Z'(\alpha) = \int_0^T \vec{Y}^T(t) \frac{d}{d\alpha} \vec{R}^*(t, \alpha) dt$, $v'(\alpha) = \int_0^T \vec{X}^T(t, \alpha) \frac{d}{dt} \vec{R}^*(t, \alpha) dt$.

При записи составляющих $Z'(\alpha)$ и $v'(\alpha)$ учтен переход к фильтровой обработке сигнала.

Уравнения (4.78), (4.79) представляют собой неадаптивные (соответствующие однократной оценке $\hat{\Theta}$) алгоритмы угловых дискриминаторов. Произведение $Z^*(t)Z'(t)$ в этих алгоритмах представляет собой дискриминаторный эффект

$$\left. \frac{d \ln(\alpha)}{d\alpha} \right|_{\hat{\alpha}=\alpha_{и}} = \left. \frac{d|Z(\alpha)|^2}{d\alpha} \right|_{\hat{\alpha}=\alpha_{и}} = 0, \text{ не учитывающий влияние актив-$$

ных помех. Поправка $|Z(t)|^2 v'(\hat{\alpha})/v(\hat{\alpha})$, возникающая в этих алгоритмах за счет нормировки статистик (4.71), (4.76) к $v(\alpha)$, обеспечивает устранение систематической ошибки измерения, связанной с искажением ДНА измерителя в процессе адаптации к активным помехам. Нормирующие множители перед реальной частью этих уравнений обеспечивают восстановление крутизны дискриминаторной характеристики на участке «цель–помеха».

Для получения алгоритма адаптивного углового дискриминатора необходимо продифференцировать по α соотношение (4.70) и учесть алгоритм вычисления сглаженной оценки $\hat{\Theta}_{T_3}$:

$$\Delta_3(t, \hat{\alpha}, \alpha_{и}) = \frac{1}{1/\hat{\Theta}_{T_3} + v(\hat{\alpha})} \operatorname{Re} \left\{ Z^*(t)Z'(t) - \frac{|Z(t)|^2 v'(\alpha)}{1/\hat{\Theta}_{T_3} + v(\hat{\alpha})} - 2v'(\alpha) \right\}, \quad (4.80)$$

$$\hat{\Theta}_{T_3} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{|Z(t)|^2 - 2v(\hat{\alpha})}{2v^2(\hat{\alpha})} dt. \quad (4.81)$$

Система уравнений (4.80), (4.81) представляет собой адаптивный алгоритм дискриминаторного измерения, где по мере накопления однократных оценок $\hat{\Theta}$ сглаженная оценка энергии сигнала $\hat{\Theta}_{T_3}$ сходится к своему истинному значению $\Theta_{и}$, а алгоритм (4.80) по точности приближается к алгоритму с известной энергией ожидаемого сигнала Θ_0 . Поправка $2v'(\alpha)$ в этом алгоритме обеспечивает минимизацию флуктуационной ошибки измерения параметра $\hat{\alpha}$.

Следует заметить, что в случае неэнергетического характера параметра $\hat{\alpha}$ (отношение сигнал/(шум + остаток компенсации помехи) не зависит от этого параметра) отношение $\frac{dv}{d\alpha} \approx 0$ и алгоритм (4.80) переходит в обычный алгоритм дискриминаторного измерения:

$$\Delta_4(t, \hat{\alpha}, \alpha_n) = C \operatorname{Re} \left\{ Z^*(t) \frac{\partial}{\partial \alpha} Z(t) \right\}, \quad (4.82)$$

где C – некоторая константа.

Структурная схема углового дискриминатора, реализующая алгоритмы (4.80), (4.81), представлена на рис. 4.18; структурная схема системы пространственной обработки, формирующей входные сигналы измерительной части этого дискриминатора, – на рис. 4.19. На рис. 4.20, 4.21 приведены результаты статистического моделирования (дискриминаторные характеристики – ДХ) алгоритмов Δ_4 и Δ_3 соответственно. Источник помех входит в зону основного лепестка ДНА углового дискриминатора, приближаясь к угловой координате прикрываемой цели.

Из анализа результатов моделирования следует, что в условиях действия источника помех в области главного лепестка ДНА углового дискриминатора при измерении угловой координаты прикрываемой цели по алгоритму Δ_4 возникает систематическая ошибка измерения. Ошибка возрастает по мере вхождения источника помех в область главного лепестка и достигает полуширины ДНА измерителя. При переходе к достаточной статистике (4.80), (4.81) происходит устранение или минимизация систематической ошибки измерения. Одновременно снижается и степень разброса линейной части ДХ в области нуля, что указывает на снижение флуктуационной ошибки измерения.

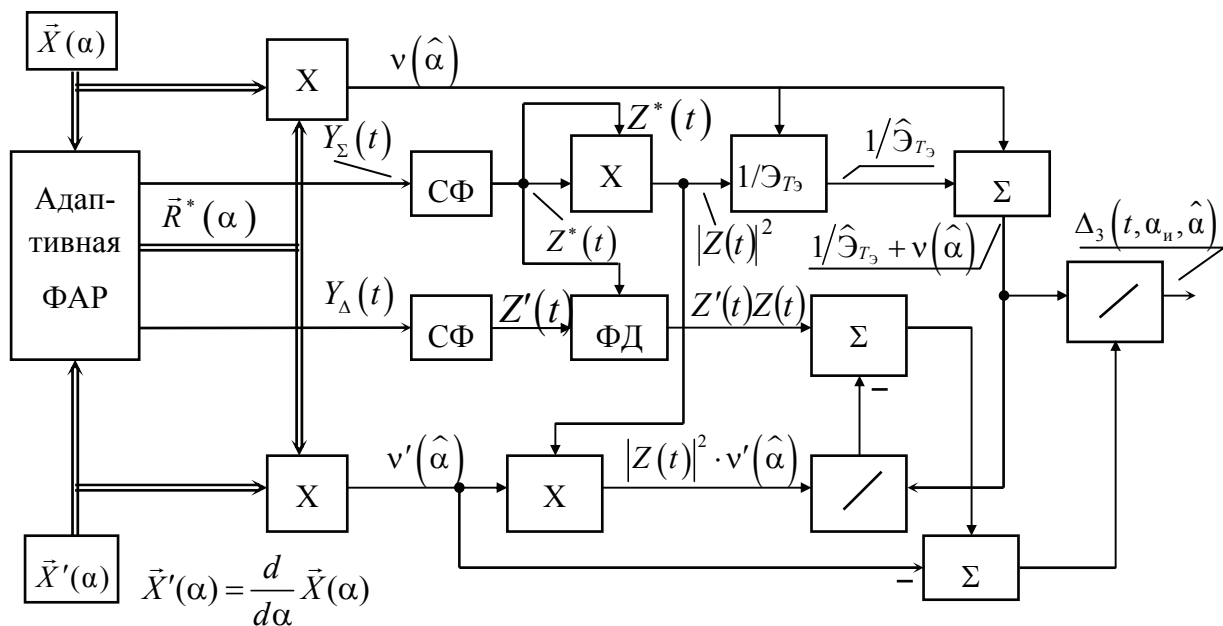


Рис. 4.18. Структурная схема адаптивного углового дискриминатора

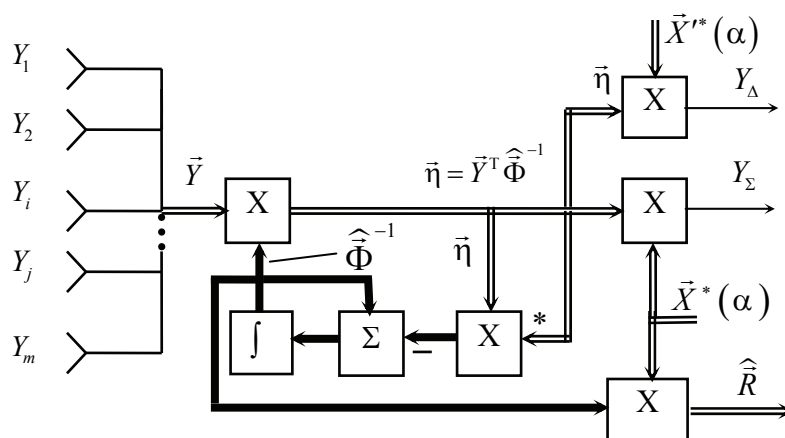


Рис. 4.19. Структурная схема системы пространственной обработки сигналов углового дискриминатора

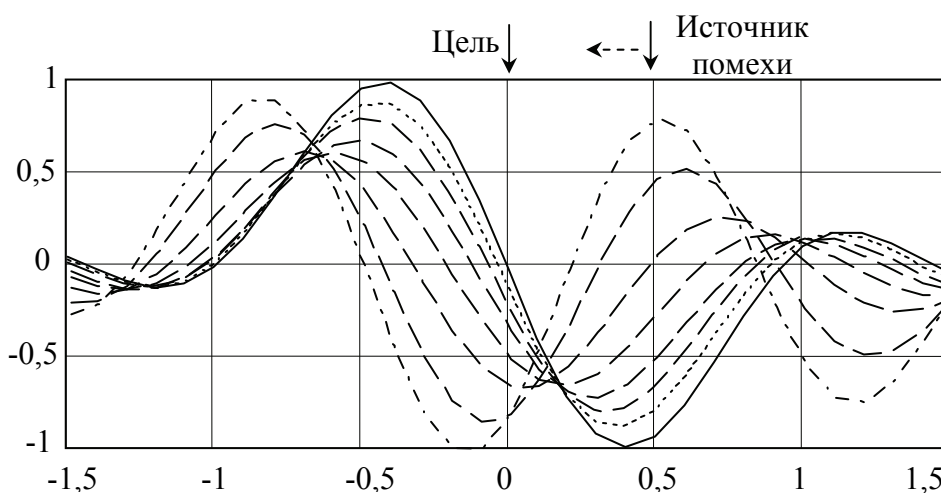


Рис. 4.20. Семейство ДХ углового дискриминатора по алгоритму (4.82) при действии источника помехи в пределах от 0,8 до 0,1 долей ДНА измерителя

При построении углового дискриминатора на базе адаптивной плоской ФАР его структура, как и поведение двухмерной (двухкоординатной) ДХ, существенно усложняется. Заметно усложняется и математический аппарат описания такого измерительного комплекса. Рассмотрим наиболее простой вариант двухмерного дискриминатора, реализующего достаточную статистику $\ln l = C |Z(t, \alpha)|^2$, то есть статистику, не учитывающую влияние активных помех. В этом случае наиболее простой дискриминаторный эффект (4.82), с учетом двухмерного характера задачи, преобразуется в систему уравнений вида

$$\Delta_{4\beta}(t, \hat{\beta}, \hat{\varepsilon}) = \operatorname{Re} \left\{ Z^*(t) \frac{\partial}{\partial \beta} Z_{\beta}(t) \right\} \Big|_{\hat{\varepsilon}=\varepsilon_n}, \quad (4.83)$$

$$\Delta_{4\varepsilon}(t, \hat{\varepsilon}, \hat{\beta}) = \operatorname{Re} \left\{ Z^*(t) \frac{\partial}{\partial \varepsilon} Z_{\varepsilon}(t) \right\} \Big|_{\hat{\beta}=\beta_n}, \quad (4.84)$$

где $Z(t, \vec{\alpha}) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{D}^T(t, \vec{\alpha}) \cdot \vec{\Phi}_{\Pi}^{-1}(t) \cdot \vec{K}^*(t, \vec{\alpha}) dt$ – комплексный корреляционный интеграл, зависящий от вектора информативных параметров $\vec{\alpha}^T = \|\beta, \varepsilon\|$ (4.31); $\frac{\partial}{\partial \beta} Z(\vec{\alpha})$ и $\frac{\partial}{\partial \varepsilon} Z(\vec{\alpha})$ – его частные производные по измеряемым параметрам (азимуту β и углу места ε), определяемые соотношениями (4.85), (4.86):

$$\frac{\partial}{\partial \beta} Z(\vec{\alpha}) = \int_0^T \vec{D}^T(t) \vec{\Phi}^{-1}(t) \frac{\partial}{\partial \beta} \vec{K}^*(t, \vec{\alpha}) dt \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_n}, \quad (4.85)$$

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon} Z(\vec{\alpha}) = \int_0^T \vec{D}^T(t) \vec{\Phi}^{-1}(t) \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \vec{K}^*(t, \vec{\alpha}) dt \Big|_{\beta=\beta_n}. \quad (4.86)$$

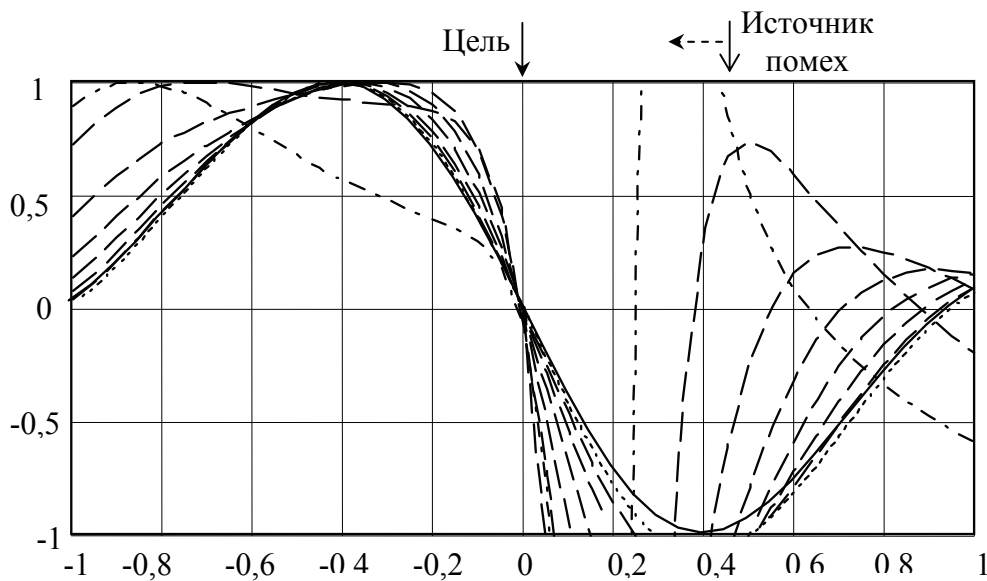


Рис. 4.21. Семейство ДХ углового дискриминатора по алгоритмам (4.80), (4.81) при действии источника помехи в пределах от 0,8 до 0,1 долей ДНА измерителя

Выходными эффектами такого измерителя будут две пространственные ДХ, повернутые друг относительно друга на 90° . Если плоская ФАР является квадратной, то эти характеристики по оси ϵ и β будут симметричными. В случае прямоугольной ФАР они оказываются «растянутыми» в плоскости с меньшими размерами (с меньшим числом элементов)¹³⁷.

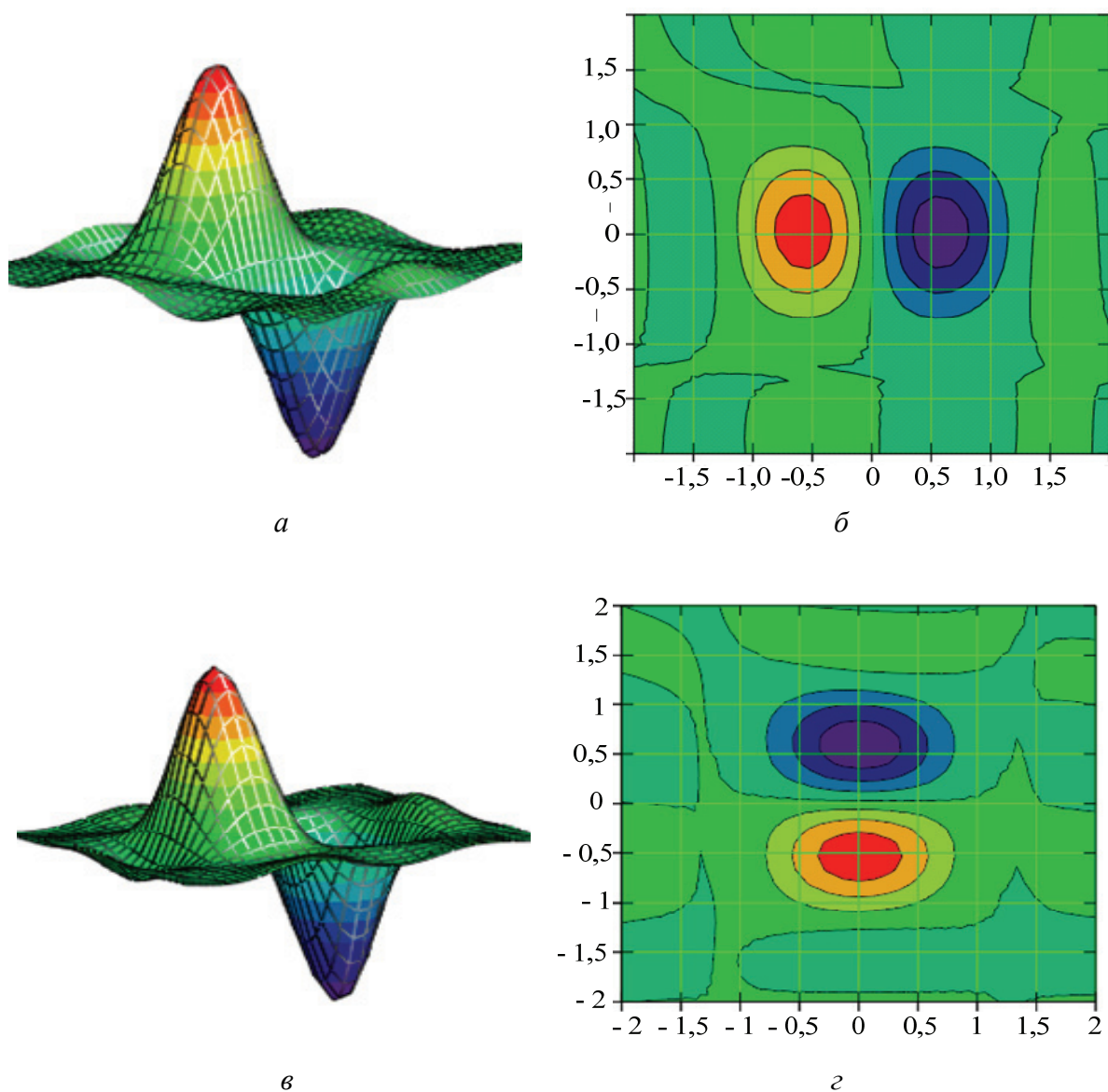


Рис. 4.22. Двухкоординатные пространственные ДХ измерителя с плоской ФАР (а, в), реализующие алгоритм (4.83), (4.84) при отсутствии помех, и их отображения с помощью линий равного уровня (б, з)

¹³⁷ Ботов М.И., Вяхирев В.А. Метод статистического моделирования в задачах синтеза и верификации сложных радиолокационных комплексов // Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании : материалы МНК. Алматы – Новосибирск, 2004. Т. 9, ч. 1. С. 324–330.

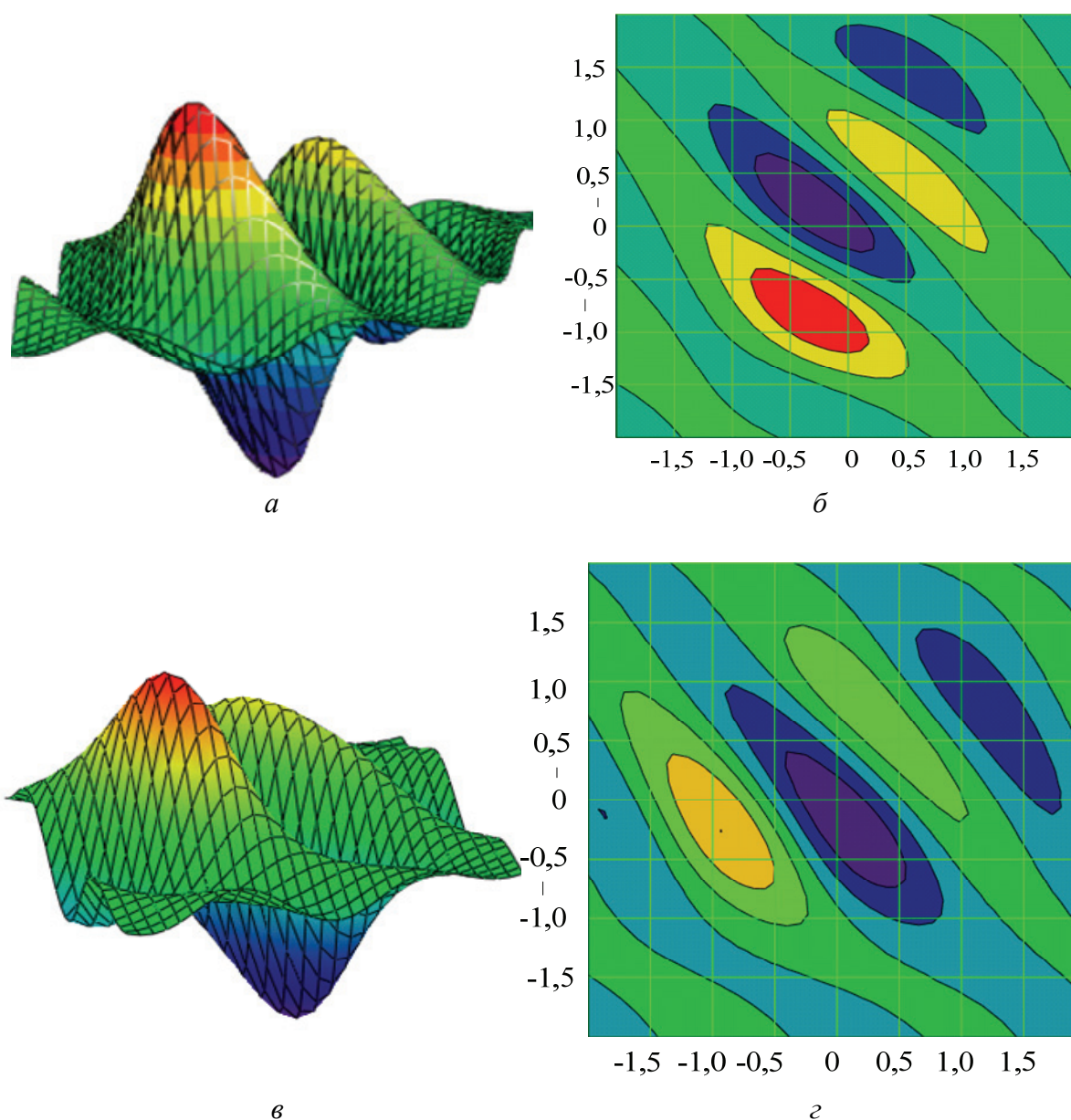


Рис. 4.23. Двухкоординатные пространственные ДХ измерителя с плоской ФАР (*a*, *в*) и их отображение с помощью линий равного уровня (*б*, *г*), реализующие алгоритм (4.83), (4.84) в условиях помех

На рис. 4.22, *a*, *в* представлены двумерные пространственные ДХ плоской АФАР для статистики (4.83), (4.84) соответственно при отсутствии помех. На рис. 4.22, *б*, *г* эти характеристики отражены в виде линий равного уровня. На рис. 4.23 показаны эти же характеристики для случая, когда в области главного лепестка АФАР действует источник помех с координатами $\beta = 0,2$ и $\varepsilon = 0,2$.

Из анализа рисунков следует, что при измерении одновременно двух угловых координат прикрываемой цели по статистике (4.83), (4.84) при

действии источника помех в области главного лепестка диаграммы направленности плоской АФАР (как и в случае с линейной АФАР) возникает систематическая ошибка измерения. Эта ошибка возрастает по мере вхождения источника помех в область главного лепестка и достигает полуширины ДНА измерителей. Более того, по мере «перекрытия» полезного и помехового сигналов по одной угловой координате (при фиксированном положении источника помех по другой координате) систематическая ошибка возникает одновременно по двум координатам (рис. 4.23, б, з).

Этот факт указывает на то важное обстоятельство, что в угловом дискриминаторе на базе адаптивной плоской ФАР, помимо рассмотренных ранее вариантов априорной неопределенности, в общем случае необходимо учитывать зависимость параметра β от параметра ε и наоборот, что существенно усложняет структурную схему такого измерителя.

4.6.2. Алгоритмы и устройства адаптивного неследящего измерения углового параметра сигнала

Неследящим принято называть измеритель, формирующий оценку параметра сигнала (в рассматриваемом случае – угловую координату цели) по максимуму выходного эффекта (центру пачки отраженного от цели эхосигнала). Такой измеритель иногда называют измерителем обзорного типа.

Вместе с тем к неследящему измерителю можно отнести и угловой дискриминатор (моноимпульсный измеритель угловых координат), выходной сигнал которого не включен в контур сглаживания результирующей оценки (рис. 4.17), а используется в качестве самостоятельного сигнала для получения автономной оценки угловых координат цели в каждом цикле зондирования. Рассмотрим измерители обзорного типа. Структурные схемы таких измерителей в основных своих компонентах отражают структуры достаточных статистик, которые эти измерители реализуют. С точки зрения точностных характеристик и возможности технической реализации наибольший интерес представляют две разновидности неследящих измерителей обзорного типа: а) измеритель, реализующий упрощенную достаточную статистику (4.76); б) измеритель, реализующий полную достаточную статистику (4.70), (4.69).

Первый, являясь достаточно простым в технической реализации, обеспечивает несмещенную оценку угловой координаты прикрываемой цели за счет нормирования выходного сигнала АФАР (квадрата модуля корреляционного интеграла) к величине пространственной составляющей отношения сигнал/(остаток компенсации + шум) $\nu(\alpha)$. При отсутствии нормирования этот измеритель оказывается аналогичным любой современной

РЛС с фильтровой обработкой сигналов. Второй измеритель, являясь в техническом отношении более сложным, обеспечивает не только устранение систематической ошибки, но и минимизацию флуктуационной ошибки измерения, возрастающей вследствие упомянутой нормировки. Соответствующие этим достаточным статистикам структурные схемы измерителей представлены на рис. 4.24а,б. Одновременно с этими схемами на рис. 4.24в представлена обобщенная схема подобного измерителя с плоской АФАР. В дополнение к введенным ранее обозначениям символом КД обозначен квадратичный детектор, обеспечивающий формирование квадрата модуля корреляционного интеграла $|Z(\vec{\alpha})|^2$. В случае линейной ФАР одна из координат (α или β) равна нулю.

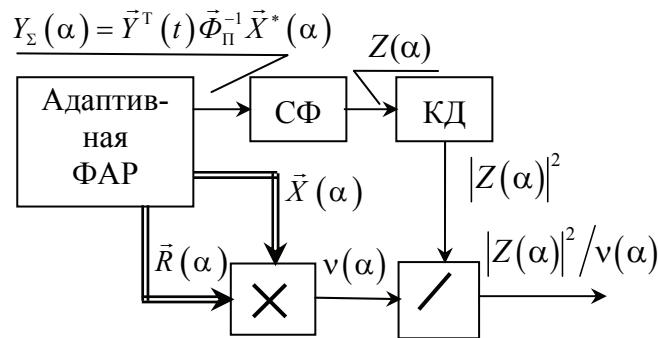


Рис. 4.24а. Структурная схема измерителя, инвариантного к энергии ожидаемого сигнала

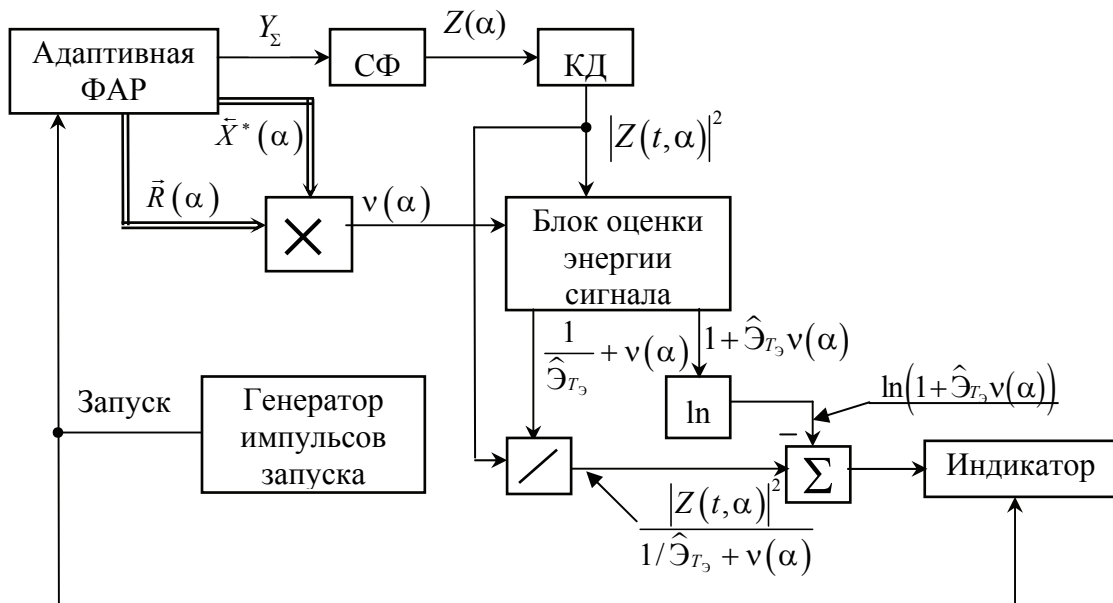


Рис. 4.24б. Структурная схема измерителя угловых координат, адаптивного к энергии ожидаемого сигнала

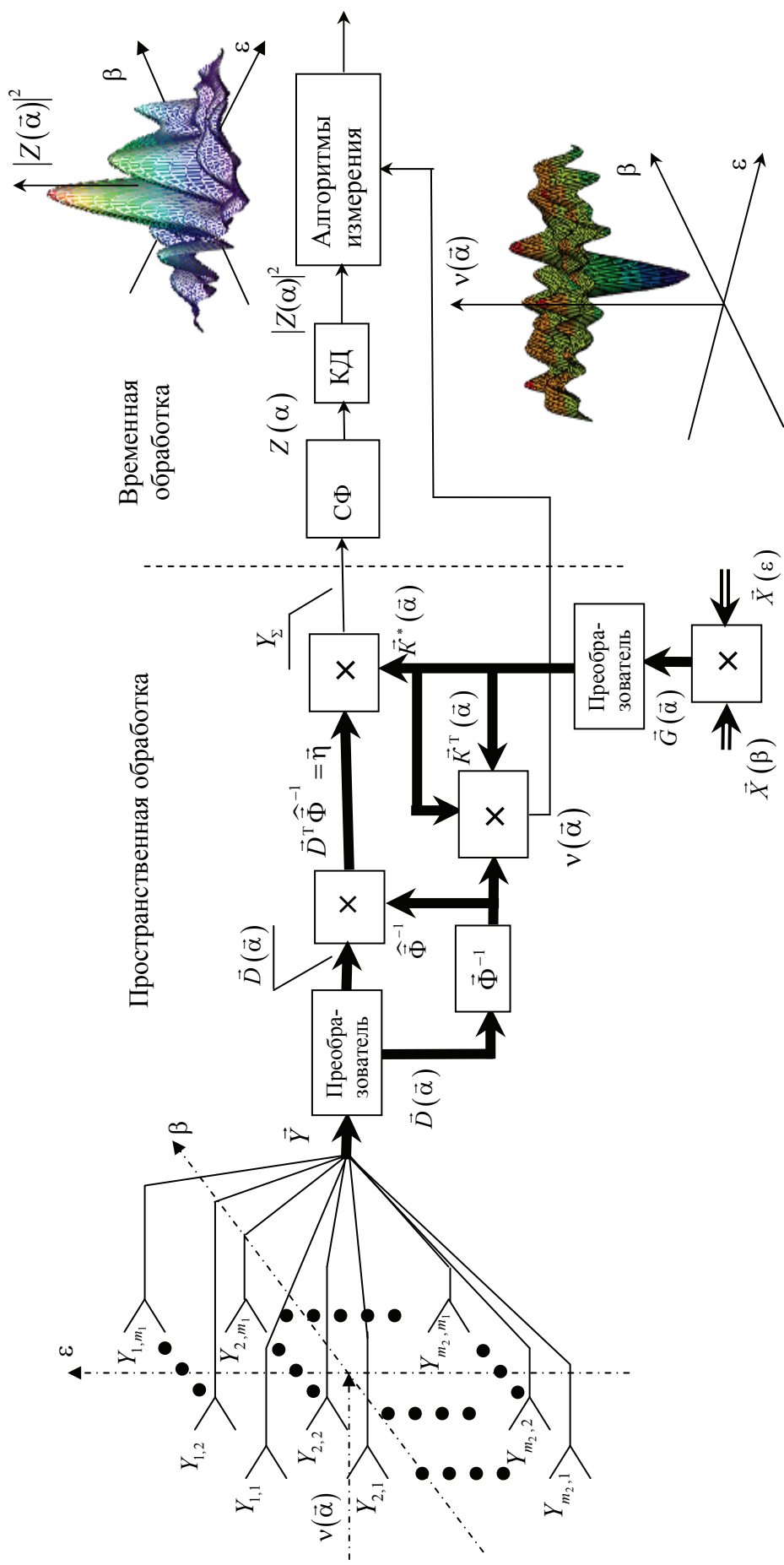


Рис. 4.24в. Обобщенная структурная схема измерителя обзорного типа с плоской АФАР

Адаптивные ФАР могут реализовывать один из рассмотренных выше алгоритмов компенсации помех. Сканирование диаграммы направленности на прием осуществляется за счет изменения элементов вектора ожидаемого АФР $\vec{X}(\alpha)$ для линейной ФАР или элементов векторов ожидаемого АФР $\vec{X}(\beta)$, $\vec{X}(\varepsilon)$ для плоской ФАР. Взаимодействие элементов измерительной части обеих схем очевидно из рисунков. Результаты статистического моделирования этих измерителей применительно к плоской АФАР (виды выходных эффектов и их сечения вертикальной плоскостью на уровне 0,5) представлены на рис. 4.25–4.27. Из результатов моделирования следует, что адаптация ФАР к помехам сопровождается появлением систематической ошибки и существенным искажением выходного эффекта измерителя (рис. 4.26) по сравнению со случаем, когда внешняя помеха отсутствует (рис. 4.25). При переходе к измерению по полной достаточной статистике (по алгоритму, адаптивному к энергии ожидаемого сигнала) искажение выходного эффекта хотя и сохраняется, но происходит минимизация и систематической, и флуктуационной ошибок измерения (рис. 4.27)¹³⁸.

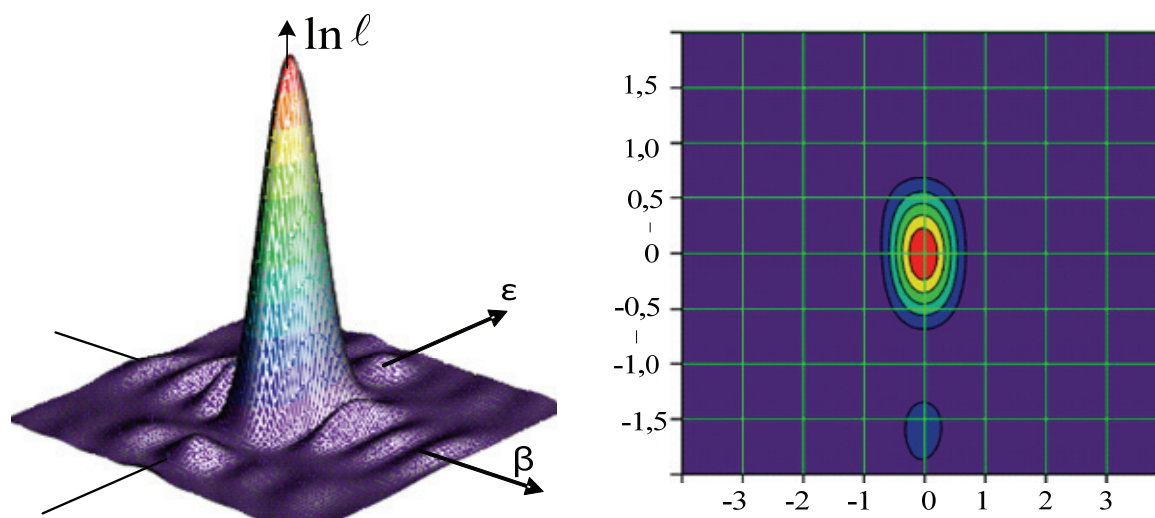


Рис. 4.25. Выходной эффект измерителя при отсутствии помех

¹³⁸ Говоря о точности, следует иметь в виду, что ошибки измерения параметров сигнала на фоне помех, какой бы оптимальный алгоритм здесь ни применялся, остаются (в соответствии с известным неравенством Рао – Крамера) всегда выше соответствующих ошибок измерения при отсутствии внешних помех. Первая по абсолютной величине может лишь асимптотически приближаться ко второй.

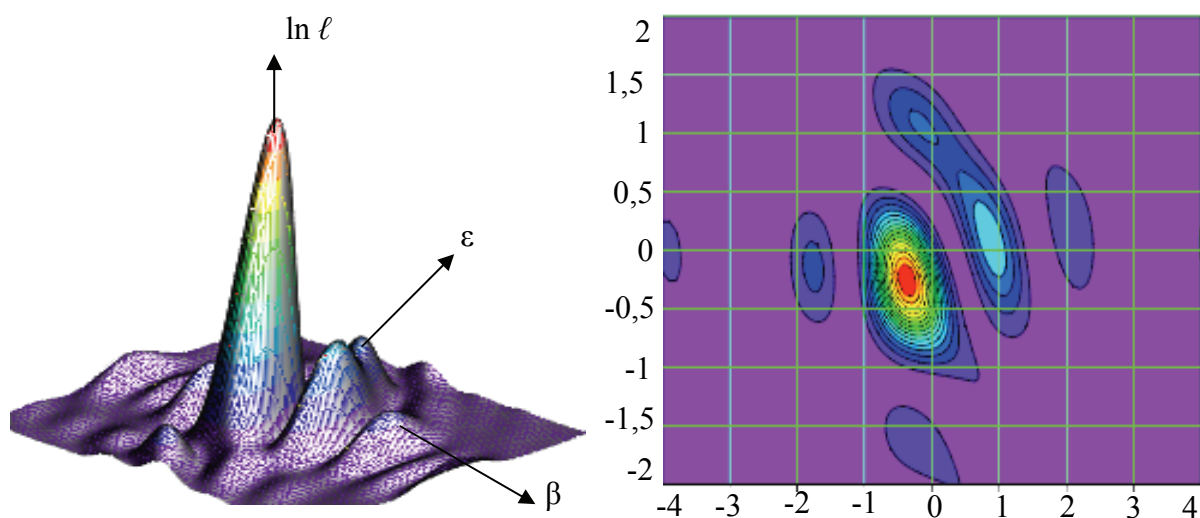


Рис. 4.26. Выходной эффект измерителя по достаточной статистике $|Z(\alpha)|^2$ при действии источника помех в области главного лепестка

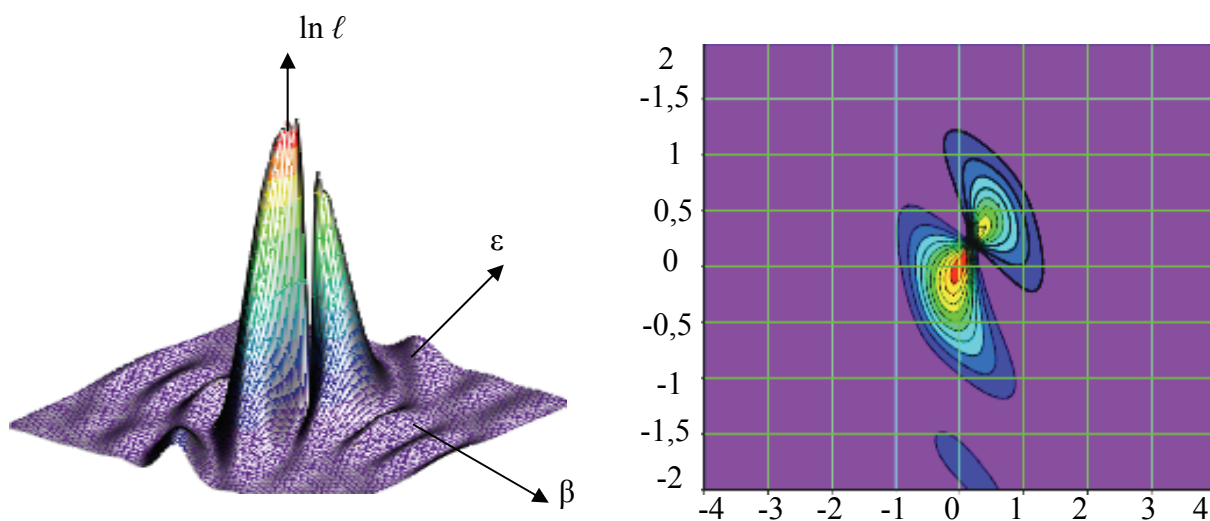


Рис. 4.27. Выходной эффект измерителей по полной достаточной статистике (4.70), (4.69)

На рис. 4.24в показана зависимость пространственной составляющей отношения сигнал/помеха $v(\vec{\alpha})$ от координат β, ϵ в условиях адаптации к источнику помех. Минимум значения этой величины соответствует угловому направлению на источник.

Здесь важно подчеркнуть, что смещение максимума выходного эффекта (рис. 4.26) происходит в случае применения в АФАР алгоритмов,

основанных на текущей оценке КМП или ОКМП. Если же в качестве устройств адаптации используются автокомпенсационные системы с корреляционной обратной связью, то смещение максимума выходного эффекта не происходит. Это явление объясняется особым свойством корреляционной обратной связи – свойством нормировки выходного эффекта $|Z(\vec{\alpha})|^2$ к величине $\nu(\alpha)$. Поэтому в такой АФАР выходной эффект измерителя соответствует несмещенной достаточной статистике (4.76). Однако такая нормировка сопровождается расширением выходного эффекта, что указывает на увеличение флуктуационной ошибки измерения (рис. 4.15).

В заключение отметим, что сложные векторно-матричные операции вычисления величины $\nu(\alpha)$, показанные на рис. 4.18, 4.24а,б,в, можно заменить операцией квадратичного детектирования с постоянной времени детектора, существенно превышающей длительность полезного сигнала. Это объясняется тем, что рассматриваемая величина пропорциональна остаткам компенсации помех и не содержит временной составляющей сигнала.

4.6.3. Особенности синтеза адаптивного временного дискриминатора

По аналогии с рассмотренным выше угловым может быть построен и адаптивный временной дискриминатор. При этом если в угловом дискриминаторе измеряемым параметром является угловая координата цели, а защита осуществляется в пространственной области, то во временном дискриминаторе измеряемым параметром является время запаздывания t_3 , а защиту от мешающего импульса помехи целесообразно осуществлять по частотным выборкам. Тогда, заменяя в уравнении правдоподобия (4.77) параметр α на \hat{t}_3 и полагая расстройку измеряемого параметра относительно ожидаемого достаточно малой, получаем выражение для выходного эффекта адаптивного временного дискриминатора:

$$\Delta_t(t_{3и}, \hat{t}_3) = \frac{1}{1/\hat{\Theta}_{T_3} + \nu(\hat{t}_3)} \operatorname{Re} \left\{ Z^*(\hat{t}_3, t_{3и}) Z_{\Delta}(\hat{t}_3, t_{3и}) - \frac{|Z(t_3, t_{3и})|^2 \nu'(\hat{t}_3)}{1/\hat{\Theta}_{T_3} + \nu(\hat{t}_3)} - 2\nu'(\hat{t}_3) \right\}. \quad (4.87)$$

Здесь

$$Z(\hat{t}_3, t_{3и}) = \vec{Y}_{\Pi}^T \vec{R}_{\Pi}^*(\hat{t}_3), \quad Z_{\Delta}(\hat{t}_3, t_{3и}) = \vec{Y}_{\Pi}^T \frac{d}{dt_3} \vec{R}_{\Pi}^*(\hat{t}_3), \quad \vec{R}_{\Pi}(\hat{t}_3) = \vec{\Phi}_{\Pi}^{-1}(t_{3и}) \vec{X}_{\Pi}^*(\hat{t}_3),$$

где $\vec{Y}_{\Pi} = \vec{\Pi} \vec{Y}$, $\vec{\Phi}_{\Pi}^{-1} = \vec{\Pi} \vec{\Phi}^{-1} \vec{\Pi}^T$, $\vec{X}_{\Pi} = \vec{\Pi} \vec{X}$, $\vec{\Pi}$ – матрица дискретного преобразования Фурье.

В свою очередь,

$$\vec{X}_{\Pi}(t_3) = \left\| \frac{\sin\left(\kappa \frac{2\pi}{\Delta t} t_3\right) \tau_n / 2}{\left(\kappa \frac{2\pi}{\Delta t} t_3\right) \tau_n / 2} e^{-j\kappa \frac{2\pi}{\Delta t} t_3} \right\|, \quad (4.88)$$

$$\vec{X}'_{\Pi}(t_3) = \left\| -j\tau_n \frac{\sin\left(\kappa \frac{2\pi}{\Delta t} t_3\right) \tau_n / 2}{\tau_n / 2} e^{-j\kappa \frac{2\pi}{\Delta t} t_3} \right\|, \quad \kappa = \pm \overline{0, n}, \quad (4.89)$$

$n = \tau_n / \Delta t$; $\tau_n, \Delta t$ – соответственно длительность импульса ожидаемого сигнала и интервал дискретизации; $t_{3и}$ – истинное время запаздывания импульса эхо-сигнала; t_{31} – время запаздывания импульса помехи. Оценка энергии $\hat{\Xi}_{T_3}$ осуществляется в соответствии с соотношением (4.81) с учетом введенного преобразования Π .

Основная трудность практической реализации таких дискриминаторов связана с особенностью построения устройства когерентной компенсации импульсной помехи. Посредством дискретного Фурье-преобразования когерентная компенсация импульса помехи переносится в частотную область. При этом возможный сдвиг во времени этого импульса относительно импульса сигнала преобразуется в пропорциональный сдвиг по частоте спектральных составляющих импульса помехи относительно соответствующих спектральных составляющих спектра сигнала.

Многочастотный характер дискретного спектра импульсов помехи и сигнала предопределяет многоканальность по частоте устройства когерентной компенсации импульса помехи, которое может быть реализовано по любой из рассмотренных выше схем адаптивной обработки. Принципиальное отличие рассматриваемого случая состоит лишь в том, что меры по устранению влияния полезного сигнала на оценку корреляционной матрицы помех здесь являются обязательными. Это связано с тем, что импульс сигнала и импульсы помехи, уводящей по дальности, в общем случае могут различаться только временем запаздывания. Результаты статистического моделирования временного дискриминатора показаны на рис. 4.28, а, б, в.

На рис. 4.28, а представлен импульс сигнала на выходе амплитудного детектора, центр которого совмещен с центром полустроби системы сопро-

вождения по дальности, на рис. 4.28,б показана аддитивная смесь импульсов сигнала и помехи. Амплитуда последнего в два раза превышает амплитуду сигнала, а сам импульс помехи сдвинут во времени относительно импульса сигнала на величину $t_3 = \tau_w/2$. В области перекрытия импульсов результирующая амплитуда аддитивной смеси заметно превышает и амплитуду сигнала, и амплитуду помехи. На рис. 4.28,в представлены реализации ДХ по достаточной статистике $\ln l = C|Z(\alpha)|^2$ для случаев: а) отсутствия импульса помехи и б) воздействия импульса помехи, уводящей по дальности.

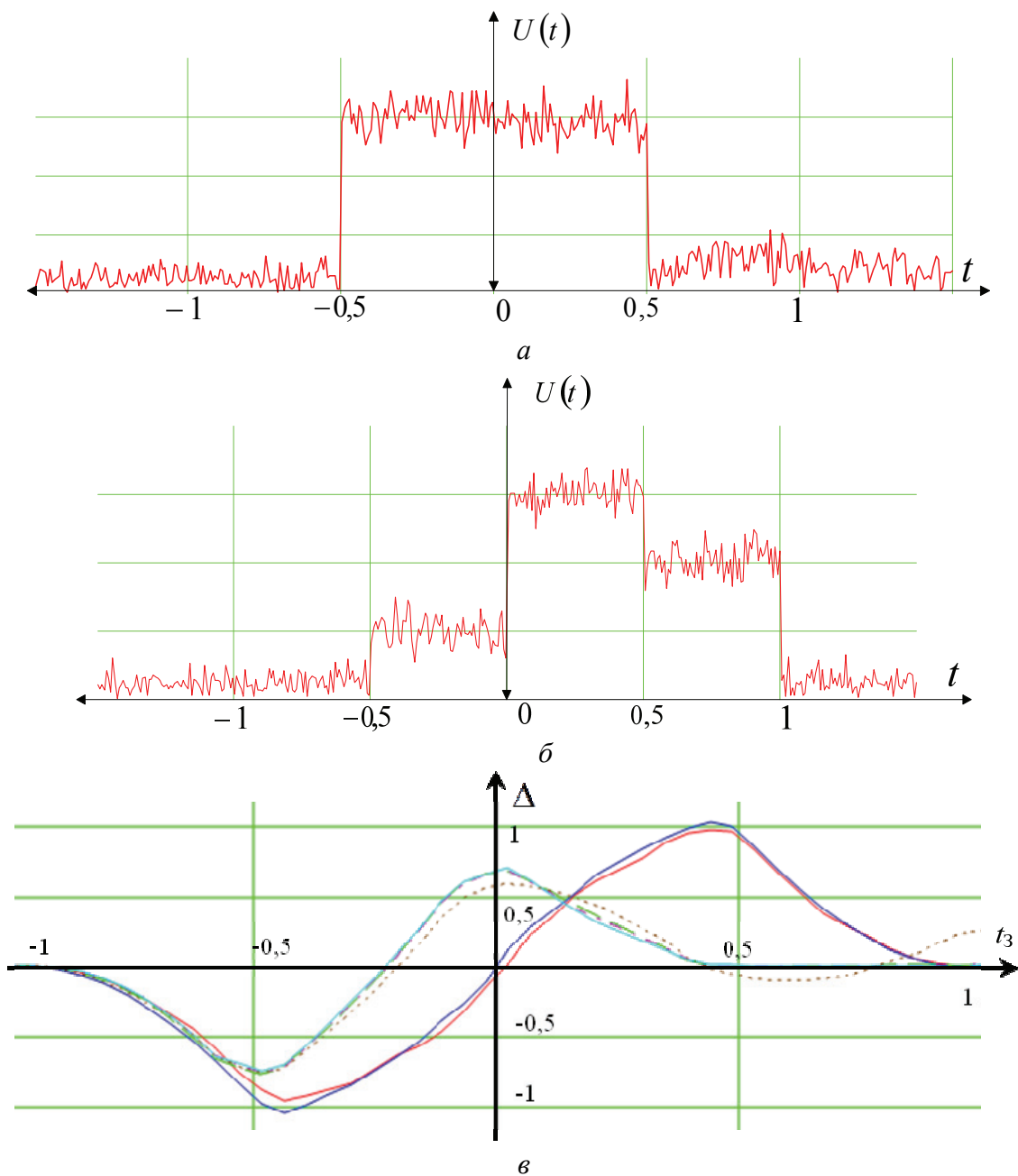


Рис. 4.28. Результаты статистического моделирования временного дискриминатора

Во втором случае предусмотрена когерентная компенсация импульса, что проявляется в возникновении систематической ошибки. В целом же общие закономерности поведения характеристики временного дискриминатора в условиях адаптации к импульсной помехе, уводящей по дальности, мало чем отличаются от поведения характеристик рассмотренных выше угловых дискриминаторов.

4.6.4. Синтез адаптивного измерителя параметров поляризации радиолокационного сигнала

При защите приемного устройства от помех, действующих в главном лепестке диаграммы направленности, возможность их эффективного подавления связана не только с адаптацией по поляризации приемного устройства, но и с перестройкой поляризационных параметров передающей системы. В последнем случае возникает необходимость в оценке параметров поляризации сигнала с последующим их использованием для управления поляризацией зондирующих импульсов. При этом, по мере сближения поляризационных характеристик сигнала и помехи, как и в рассмотренных ранее случаях адаптации к активным и пассивным помехам, поляризационные параметры сигнала РЛС могут принимать энергетический характер. Задача в этом случае состоит в синтезе измерителя поляризационного коэффициента $\hat{\rho}$ (поляриметра), являющегося адаптивным как к параметрам внешних помех, так и к неинформативным параметрам сигнала (в рассматриваемом случае – к энергии ожидаемого сигнала \mathcal{E}_0).

Синтез поляриметра проведем на примере детерминированного сигнала, имеющего достаточную статистику (4.70). С этой целью введем обобщенную модель приемной системы, включающей m независимых приемных элементов, каждый из которых имеет взаимно ортогональную поляризацию. На выходах элементов с горизонтальной и вертикальной поляризацией образуются векторные случайные процессы соответственно $\vec{y}_Г(t)$, $\vec{y}_В(t)$ аддитивной смеси внутренних шумов, внешних помех и сигнала с огибающими $\vec{Y}_Г(t)$ и $\vec{Y}_В(t)$, поэтому комплексная огибающая результирующего вектора входных воздействий $\vec{y}(t)$ имеет блочный вид: $\vec{Y}^T(t) = \|\vec{Y}_Г(t); \vec{Y}_В(t)\|$. Введем далее матрицу взаимных корреляционных моментов:

$$\vec{\Phi}(t,s) = \frac{1}{2} \vec{Y}(t) \vec{Y}(s) = \vec{\Phi}_П(t,s) + \vec{\Phi}_С(t,s),$$

где $\vec{\Phi}_\Pi(t, s)$, $\vec{\Phi}_C(t, s)$ – КМ соответственно помеховой и сигнальной составляющих вектора $\vec{y}(t)$.

Ограничиваясь наиболее важным для практики случаем разделения обработки на пространственную и временную и полагая, что полезный сигнал не влияет на оценку матрицы $\vec{\Phi}_\Pi(t, s)$, представим вектор ожидаемого сигнала $\vec{X}(t, \alpha)$ в виде произведения его пространственной и временной составляющих: $\vec{X}^T(t, \alpha) = \left\| a_\Gamma \vec{X}_\Gamma(\alpha) x_\Gamma(t) : a_B \vec{X}_B(\alpha) x_B(t) \right\|$. Здесь $\vec{X}_\Gamma(\alpha)$, $\vec{X}_B(\alpha)$ – вектор-столбцы ожидаемого АФР сигнала соответственно горизонтально и вертикально поляризованных приемных элементов; a_Γ a_B – комплексные амплитуды ожидаемых колебаний соответственно горизонтально и вертикально поляризованных приемных элементов; $x_\Gamma(t)$, $x_B(t)$ – нормированные функции времени. Тогда результат пространственной обработки может быть представлен в виде

$$\vec{Y}_p^T = \left\| \vec{Y}_\Gamma^T \vec{R}_\Gamma^* : \vec{Y}_B^T \vec{R}_B^* \right\| = \left\| y_1 : y_2 \right\|,$$

где \vec{R}_Γ , \vec{R}_B – векторы оптимальных весовых коэффициентов соответственно горизонтально и вертикально поляризованных приемных элементов.

Учитывая, что $a_\Gamma = A_\Gamma e^{j\varphi_\Gamma}$, $a_B = A_B e^{j\varphi_B}$, где модуль поляризационного коэффициента $|p| = \frac{A_\Gamma}{A_B}$, представим вектор ожидаемого сигнала $\vec{X} = \vec{X}(p)$ в следующем виде:

$$\vec{X}^T(p) = \left\| A_B |p| e^{j\varphi} : A_B e^{-j\varphi} \right\|, \quad (4.90)$$

где $\varphi = \varphi_\Gamma - \varphi_B$; A_Γ , φ_Γ и A_B , φ_B – амплитуды и фазы соответственно горизонтально и вертикально поляризованных компонентов вектора $\vec{Y}(p)$. Из соотношения (4.90) следует, что, кроме энергии сигнала, в выражении логарифма отношения правдоподобия (4.70) неизвестными являются фаза φ и модуль поляризационного коэффициента $|p|$. В связи с этим оценка поляризационного коэффициента \hat{p} будет определяться следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \ell_1(\varphi, |p|, \Theta) \Big|_{\varphi=\hat{\varphi}, |p|=\hat{|p|}, \Theta=\hat{\Theta}_T} = 0, \quad (4.91)$$

$$\frac{\partial}{\partial |p|} \ell_1(\varphi, |p|, \Theta) \Big|_{|p|=\hat{p}, \varphi=\hat{\varphi}, \Theta=\hat{\Theta}_{T_3}} = 0, \quad (4.92)$$

$$\frac{\partial}{\partial \Theta} \ell_1(\varphi, |p|, \Theta) \Big|_{\Theta=\hat{\Theta}_{T_3}, |p|=\hat{p}, \varphi=\hat{\varphi}} = 0. \quad (4.93)$$

Уравнениям (4.91–4.93) соответствует адаптивный двухканальный фазовый дискриминатор, выходной сигнал которого соответствует оценке фазы поляризационной характеристики сигнала. Поскольку особенности построения таких измерителей подробно рассмотрены выше, остановимся на решении уравнения (4.92), полагая, что оценки $\hat{\Theta}_{T_3}$ и $\hat{\varphi}$ получены в соответствии с рассмотренными выше адаптивными алгоритмами.

Подставляя достаточную статистику (4.70) в (4.92) и опуская для простоты записи зависимость его составляющих от параметров φ , $\hat{\Theta}_{T_3}$ и $|p|$, получаем уравнение правдоподобия для оценки модуля поляризационного коэффициента $|\hat{p}|$:

$$\frac{1}{1/\hat{\Theta}_{T_3} + \nu} \operatorname{Re} \left\{ Z^* Z'_p - \nu' \left(\frac{|z|^2}{1/\hat{\Theta}_{T_3} + \nu} + 1 \right) \right\} = 0. \quad (4.94)$$

Здесь

$$Z'_p = \vec{Y}_p^{*T} \vec{\Psi} \vec{X}' = \vec{Y}_p^{*T} \vec{\Psi} \begin{vmatrix} A_B e^{j\varphi} \\ 0 \end{vmatrix} = \vec{Y}_p^{*T} \vec{\Psi}_1 A_B e^{j\varphi}, \quad \hat{\nu}' = \vec{X}^{*T} \vec{\Psi} \vec{X}' = \vec{X}^{*T} \vec{\Psi}_1 A_B e^{j\varphi};$$

где $\vec{\Psi}$ – матрица, обратная корреляционной матрице помеховой составляющей вектора \vec{Y}_p ; $\vec{\Psi} = \|\vec{\Psi}_1 : \vec{\Psi}_2\|$, $\vec{\Psi}_1^T = \|\Psi_{11} : \Psi_{21}\|$, $\vec{\Psi}_2^T = \|\Psi_{12} : \Psi_{22}\|$ – соответствующие элементы матрицы $\vec{\Psi}$.

Подставив соответствующие значения z'_p и ν'_p , выражение (4.94) приведем к следующему виду:

$$\operatorname{Re} \left\{ Z_H^* \vec{Y}_p^{*T} \vec{\Psi}_1 - \beta \left(\Psi_{11} |\hat{p}| e^{-j\varphi} + e^{j\varphi} \Psi_{21} \right) \right\} = 0,$$

где $Z_H = Z / A_B$.

Отсюда получим выражение для оценки модуля поляризационного коэффициента $|\hat{p}|$:

$$|\hat{p}| = \operatorname{Re} \frac{Z_H^* \bar{Y}_p^{*\Gamma} \bar{\Psi}_1 - \Psi_{21} e^{j\varphi} \beta}{\beta e^{-j\varphi} \Psi_{11}} = \operatorname{Re} \left[\frac{Z_H^* y_\Sigma^*}{\beta} - K e^{j\varphi} \right] e^{j\varphi}. \quad (4.95)$$

Здесь $\beta = \frac{|z|^2}{1/\hat{\Theta}_{T_3} + \nu} + 1$, $K = \Psi_{21}/\Psi_{11}$, $y_\Sigma^* = y_1^* + y_2^* K$.

Выражение (4.95) определяет модуль поляризационного коэффициента.

Таким образом, синтезированный поляриметр обеспечивает измерение поляризационного коэффициента в условиях воздействия коррелированных помех. При этом наряду с компенсацией коррелированных помех предполагается использование сглаженной оценки энергии сигнала, то есть адаптация к параметрам обстановки: корреляционным свойствам помех и неизвестной энергии сигнала. Двойная адаптация к активным помехам (первоначально с помощью весовых векторов \bar{R}_T, \bar{R}_B в соответствующих ортогональных подканалах, а в последующем – с помощью блочной матрицы $\bar{\Psi} = \|\bar{\Psi}_1; \bar{\Psi}_2\|$) связана с необходимостью декорреляции сигналов не только в каждом из ортогональных каналов по отдельности, но и этих каналов между собой.

4.7. Преодоление априорной неопределенности параметров сигнала относительно параметров пассивных помех

4.7.1. Модели сигнала и помех. Когерентная весовая обработка пачки эхо-сигналов

В литературе по теории и технике радиолокации рассматриваются основные устройства подавления помех преимущественно в той последовательности, в какой они исторически возникали как закономерный ответ радиолокационной инженерной практики на повышение возможностей СВН противника в постановке помех этого класса. Рассмотрим специфику компенсации пассивных помех с точки зрения поставленной выше обобщенной задачи преодоления априорной неопределенности параметров сигнала относительно параметров внешних помех (в рассматриваемом случае – относительно параметров пассивных помех $\vec{\lambda}_1^{\text{П}}$).

Ранее было введено предположение о возможности разделения обработки сигналов в адаптивной ФАР на пространственную и временную. Как выяснилось в ходе предыдущих рассуждений, пространственная обработка, в процессе которой осуществляется компенсация активных помех и ко-

герентное накопление полезного сигнала по элементам решетки, сводится к оценке ОКМП $\vec{\Phi}^{-1}$ или весового вектора $\vec{R}(\vec{\alpha})$ и весовой когерентной обработке вектора входных воздействий $\vec{Y}(t)$. Последующая временная обработка должна выполнять либо только согласованную фильтрацию сигнала, если в устройстве не предусмотрена компенсация пассивных помех, либо согласованную фильтрацию с последующей оптимальной когерентно-весовой обработкой пачки эхо-сигналов в случае воздействия пассивных помех. Для сигнала в виде пачки взаимно когерентных импульсов модель ожидаемого (опорного) полезного сигнала имеет следующий вид:

$$X(t) = \sum_{i=1}^M X_i X_0(t - t_i), \quad (4.96)$$

где X_i – независимый от времени коэффициент, характеризующий огибающую пачки эхо-сигналов $X_0(t - t_i)$; X_0 – комплексная амплитуда i -го ожидаемого сигнала ($i = 1 \dots M$ – номер периода зондирования).

Аналогично может быть представлена и модель пассивной помехи:

$$X_A(t) = \sum_{i=1}^M A_i X_0(t - t_i), \quad (4.97)$$

где A_i – случайный коэффициент, характеризующий огибающую пачки пассивной помехи.

Исходя из уравнения корреляционного интеграла, описывающего этап временной обработки

$$Z_i = \frac{1}{N_0} \int_{-\infty}^{\infty} Y(t) X^*(t - t_i) dt, \quad (4.98)$$

весовой (корреляционный) интеграл, характеризующий многоканальную временную обработку в устройстве подавления пассивных помех, может быть представлен либо весовой суммой

$$Z = \sum_{l=1}^M Z_l R_l^*, \quad (4.99)$$

либо соответствующей векторно-матричной формой

$$Z = \vec{Z}^T \vec{R}^*. \quad (4.100)$$

Здесь Z_i – результат согласованной фильтрации i -го радиоимпульса в приемнике.

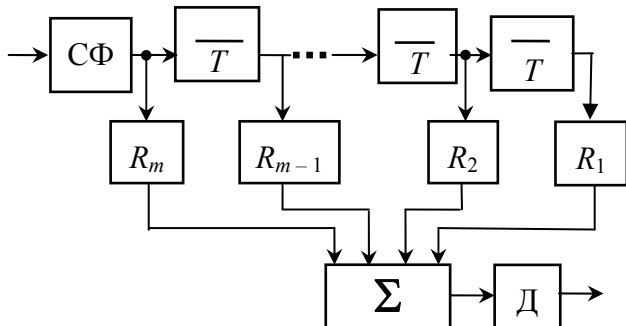


Рис. 4.29. Схема весовой обработки когерентной пачки эхо-сигналов на фоне пассивных помех

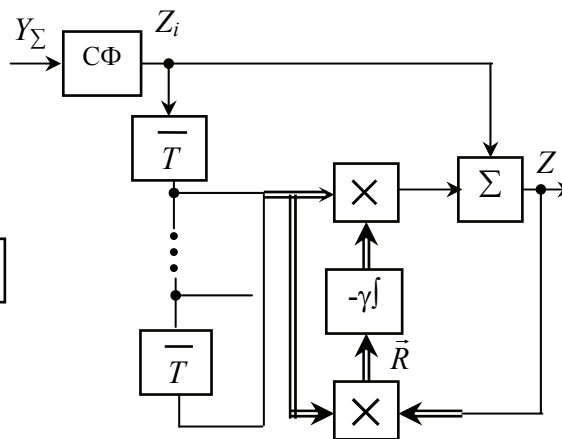


Рис. 4.30. Структурная схема череспериодной автокомпенсации пассивных помех

В наиболее общем виде временная обработка сигналов на фоне пассивных помех сводится к согласованной фильтрации одиночных радиоимпульсов и последующей когерентной весовой обработке результата в соответствии с соотношением (4.99). Структурная схема, реализующая эту весовую обработку, представлена на рис. 4.29, где СФ – согласованный фильтр одиночного радиоимпульса.

Технически такая обработка может быть реализована с помощью уже изученных алгоритмов вычисления весового вектора \bar{R} с выделенными основным и компенсационными каналами (рис. 4.30). Отличие оптимальной временной обработки от пространственной связано с наличием в цепи компенсационных каналов $M - 1$ линий задержки на период следования зондирующих импульсов вместо пространственно разнесенных антенн (диаграмм направленности) компенсационных каналов. Здесь Y_Σ – сигнал на выходе системы адаптивной пространственной обработки.

Оптимальное число каналов (по числу отводов линии задержки) определяется числом периодов повторения сигналов, в которых сохраняется межпериодная корреляция пассивных помех. Такая многоканальная система обеспечивает автоматическую настройку провала (минимума) своей амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) на максимум спектра помехи, включая и многослойную (широкополосную) пассивную помеху. По этой причине подобные системы подавления получили название систем череспериодной автокомпенсации (ЧПАК) пассивных помех. Необходимость в установке переобеляющего матричного фильтра, который имеет место в цепи компенсационных каналов системы защиты от активных

помех (рис. 4.13), в схемах весовой обработки сигналов на фоне пассивных помех отсутствует. Это связано с разномом во времени моментов поступления пассивной помехи на компенсационные входы автокомпенсатора, вследствие чего эти каналы оказываются статистически независимыми.

4.7.2. Особенности адаптивного измерения доплеровского параметра сигнала на фоне пассивных помех

При скоростной селекции сигнала на фоне пассивных помех, когда спектры полезного и мешающего сигналов перекрываются, доплеровская частота сигнала F_D принимает энергетический характер: отношение сигнал/помеха оказывается зависимым от степени перекрытия сигнала и пассивной помехи по радиальной скорости (от степени совпадения радиальной скорости цели и пассивной помехи). В этом случае формирование провала в АЧХ адаптивного фильтра на частоте помехи искажает ДХ частотного дискриминатора подобно тому, как искажается диаграмма направленности углового дискриминатора при адаптации к активным помехам. Степень искажения характеристики частотного дискриминатора тем больше, чем в большей степени сигнал, отраженный от пассивной помехи перекрывается по F_D с сигналом, отраженным от подвижной цели. Поэтому при синтезе адаптивных измерителей радиальной скорости цели необходимо, как и в случае с активной помехой, учитывать энергетический характер измеряемого параметра.

Существенно, что рассмотренные ранее закономерности адаптивного измерения и принципы построения измерителей угловых координат и времени запаздывания справедливы и для случая адаптивного измерения радиальной скорости цели. Поэтому синтез частотного дискриминатора можно свести к формальной замене в алгоритмах (4.80), (4.81) оценки угловых параметров α и α_n на оценки F_D и F_{Dn} :

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta(t, \hat{F}_D, F_{Dn}) &= \frac{1}{1/\hat{\Theta}_{T_3} + v(\hat{F}_D)} \operatorname{Re} \left\{ Z(t)Z'(t) - \frac{|Z(t)|^2 v(\hat{F}_D)}{1/\hat{\Theta}_{T_3} + v(\hat{F}_D)} - 2v'(\hat{F}_D) \right\}, \\ \hat{\Theta}_{T_3} &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{|Z(t)|^2 - 2v(\hat{F}_D)}{2v^2(\hat{F}_D)} dt. \end{aligned} \right. \quad (4.101)$$

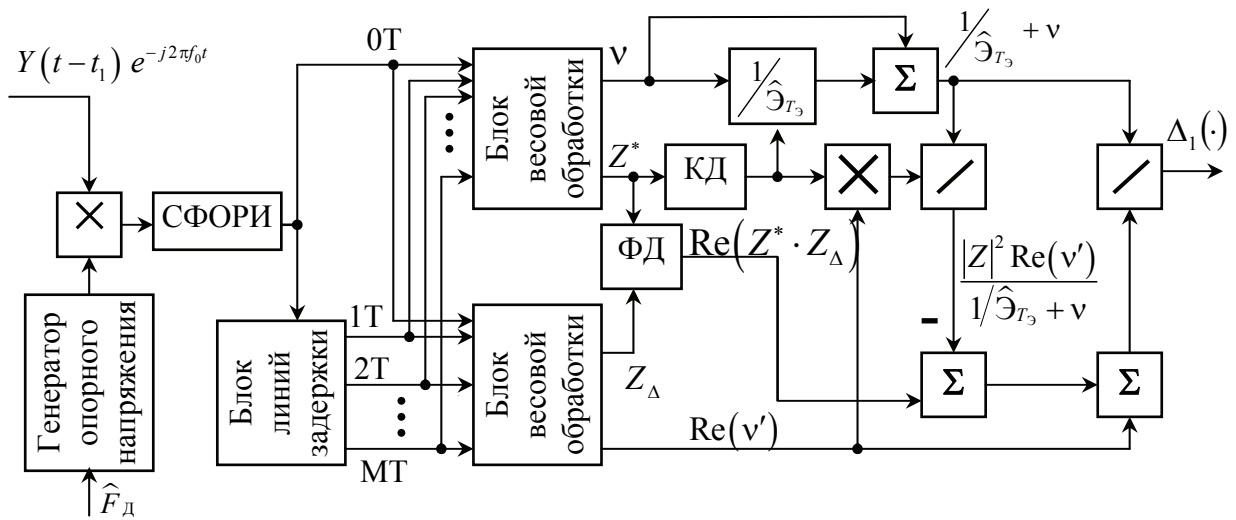


Рис. 4.31. Структурная схема адаптивного частотного дискриминатора:
СФОРИ – согласованный фильтр одиночного радиоимпульса

Устройства, реализующие алгоритм адаптивного частотного дискриминатора (4.101) и когерентную весовую обработку в этом дискриминаторе, представлены соответственно на рис. 4.31 и 4.32. Несложно заметить, что структура адаптивного частотного дискриминатора отличается от адаптивного углового только лишь входными цепями устройства защиты от помех. Остальные элементы дискриминаторов, включая сами устройства компенсации помех и собственно измерительную часть, фактически совпадают, подтверждая тем самым справедливость принципа материального единства мира. Символами 0Т, 1Т, 2Т, ... МТ обозначены выходы линий задержки по числу реализованных в схеме задержек на период следования.

Результаты статистического моделирования частотного дискриминатора представлены на рис. 4.33–4.36. В частности, на рис. 4.33 показаны спектры сигнала и пассивных помех, на рис. 4.34 – различные варианты перекрытия этих спектров по F_d , на рис. 4.35 – ДХ для алгоритма, не учитывающего энергетический характер доплеровской частоты F_d . Кривая 1 получена при отсутствии пассивных помех; кривые 2, 3, 4 – в условиях адаптации к помехам (для степени перекрытия спектров, представленной на рис. 4.34,а,б,в соответственно). На рис. 4.35 представлены характеристики дискриминатора для алгоритма (4.101). Возрастающие номера кривых здесь также соответствуют ситуациям перекрытия сигнала и помехи, отображенным на рис. 4.34,а,б,в соответственно.

Результаты статистического моделирования показывают, что характер поведения ДХ частотного дискриминатора в условиях адаптации к пас-

сивным помехам аналогичен характеру поведения соответствующих характеристик углового дискриминатора в условиях адаптации последнего к активным помехам.

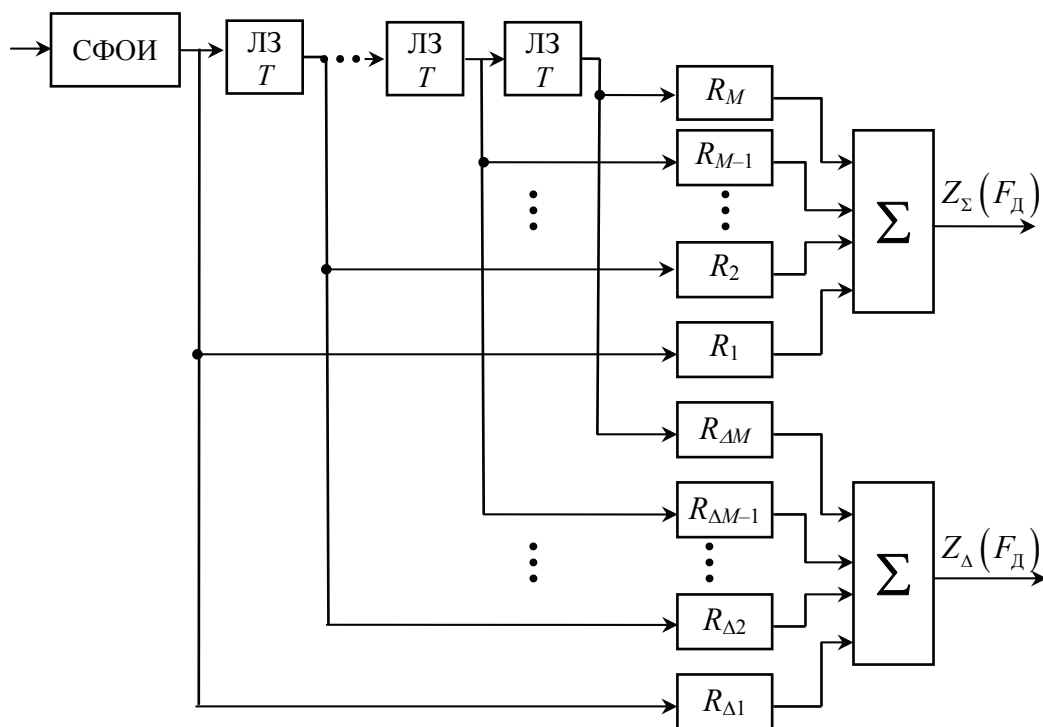


Рис. 4.32. Структурная схема весовой обработки суммарного и разностного каналов частотного дискриминатора; ЛЗ – линия задержки на время T

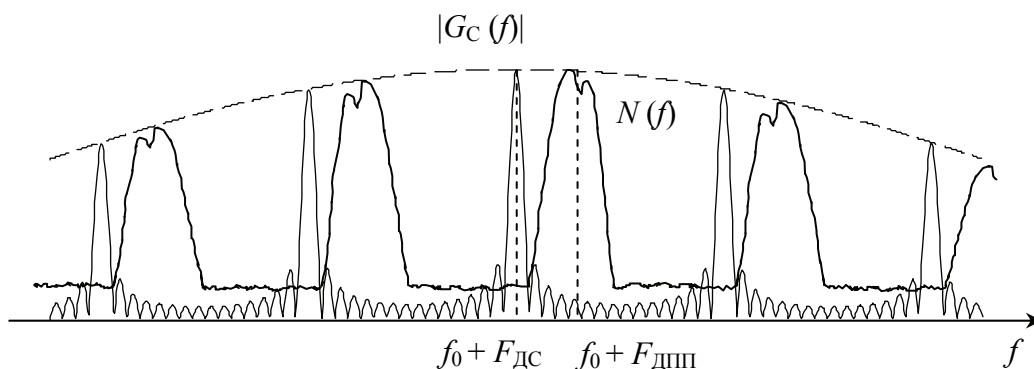


Рис. 4.33. Спектры полезного сигнала и пассивной помехи

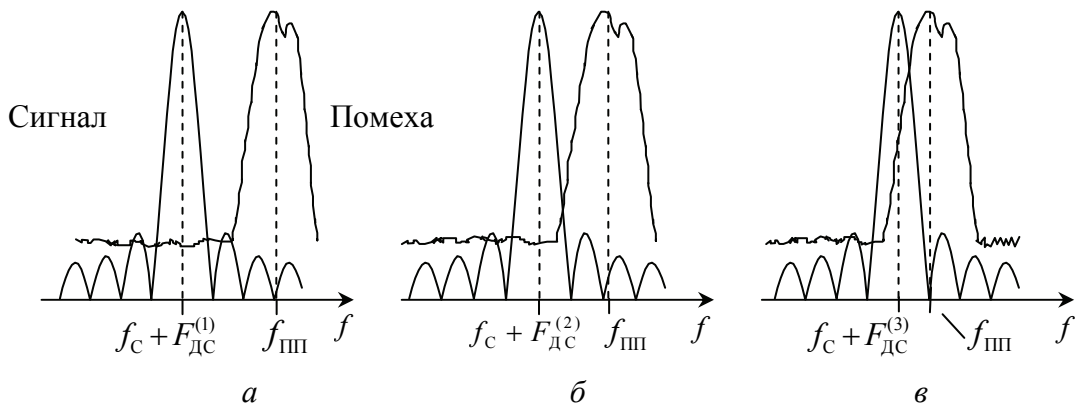


Рис. 4.34. Степень перекрытия сигнала и помехи по частоте Доплера

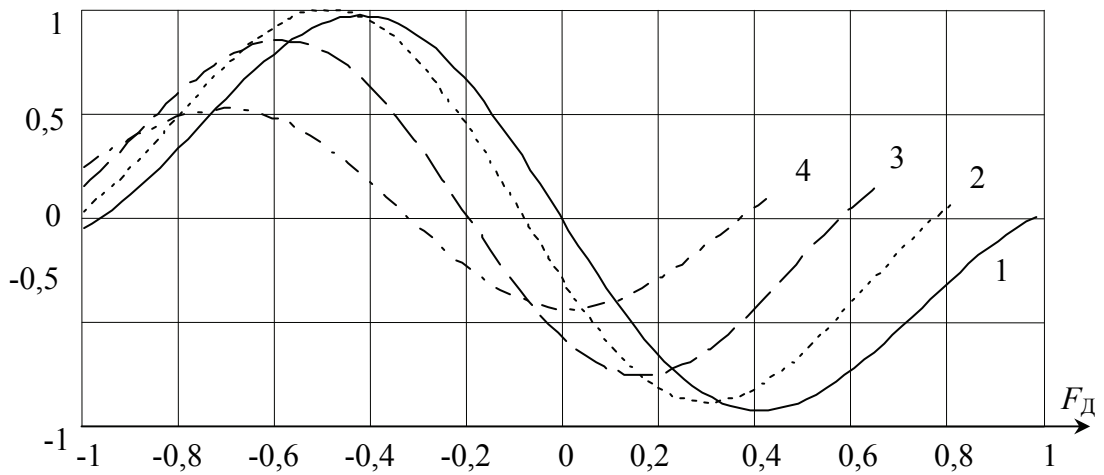


Рис. 4.35. Дискриминаторные характеристики для алгоритма $Z^*(t)Z'(t)$

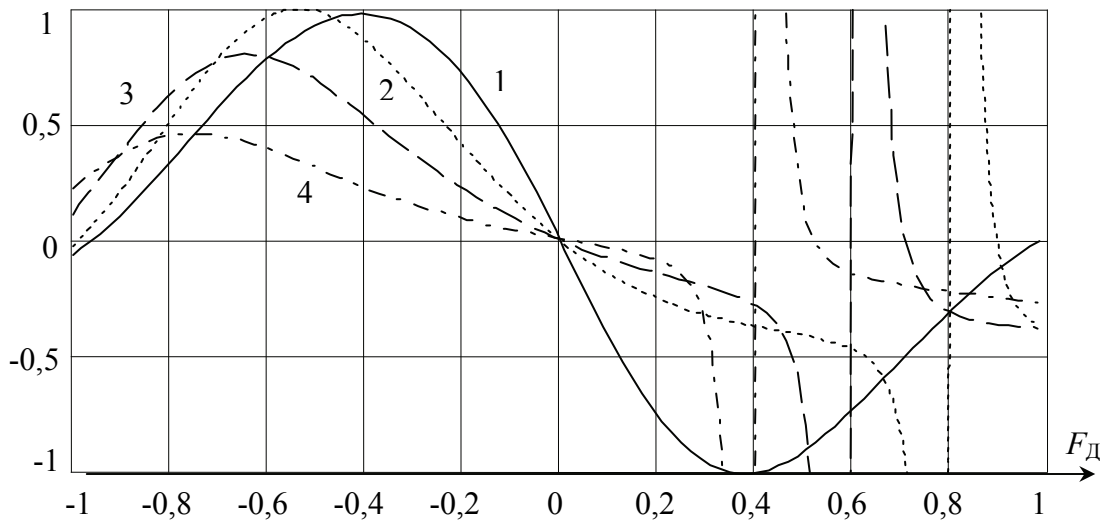


Рис. 4.36. Дискриминаторные характеристики для алгоритма (4.101)

Так, при использовании достаточной статистики, не учитывающей энергетический характер измеряемого параметра, возникает существенная систематическая ошибка, возрастающая по мере увеличения степени перекрытия спектров сигнала и помехи по доплеровской частоте. При переходе к адаптивному алгоритму измерения, хотя и наблюдается определенное снижение крутизны ДХ (что указывает на некоторое возрастание флуктуационной ошибки), систематическая ошибка все-таки устраняется (рис. 4.36).

4.8. Особенности совместной оценки информативных и неинформативных параметров радиолокационных сигналов в условиях внешних помех

В параграфах 4.6, 4.7 были исследованы общие закономерности и основные алгоритмы следящего и неследящего измерения параметров РЛ сигналов на фоне внешних помех с пространственной и временной корреляцией. Специфика такого измерения связана с тем, что измеряемые параметры РЛ сигнала при адаптации измерителя к соответствующим видам помех принимают энергетический характер: отношение сигнал/(остаток компенсации помехи + шум) становится зависимым от расстояния между целью и источником помех по измеряемому параметру. В этом случае традиционные алгоритмы измерения, основанные на неполной достаточной статистике $\ln \ell = C |Z(t, \alpha)|^2$, где C – некоторая константа, оказываются смещенными.

При переходе к измерению энергетических параметров по инвариантной к энергии ожидаемого сигнала достаточной статистике (4.71) или (4.76) систематическая ошибка устраняется, однако существенно возрастает флуктуационная ошибка. Минимизация одновременно и систематической, и флуктуационной ошибок измерения достигается за счет применения адаптивного алгоритма (4.69), (4.70). Адаптация по неинформативному параметру общего алгоритма измерения (4.70) заключается в том, что в этом алгоритме используется сглаженная оценка энергии ожидаемого сигнала $\hat{\mathcal{E}}_T$. По мере накопления однократных оценок $\hat{\mathcal{E}}$ в соответствии с алгоритмом (4.69) многократная оценка $\hat{\mathcal{E}}_T$ сходится к своему истинному значению $\mathcal{E}_и$, а сам исходный алгоритм (4.70) приближается по точности к алгоритму с известной энергией ожидаемого сигнала (4.66). Эти адап-

тивные алгоритмы нашли конкретные технические приложения в рассмотренных ранее адаптивных измерителях дискриминаторного (рис. 4.18, 4.31) и обзорного (рис. 4.24*а,б,в*) видов.

В то же время такая техническая реализация адаптивных алгоритмов не является единственной. Эту задачу с теми же показателями качества можно решить с помощью следящего измерителя, в котором дискриминатор строится по традиционной схеме. При этом взаимосвязь информативного и неинформативного параметров сигнала (энергии ожидаемого сигнала Θ_0) учитывается не за счет отдельного измерителя параметра $\hat{\Theta}_3$, введенного в структуру самого дискриминатора, а за счет расширения вектора состояния следящей системы¹³⁹. Рассмотрим это на примере наиболее простой модели сигнала с известной амплитудой b и случайной начальной фазой φ .

По сравнению с достаточной статистикой (4.66) достаточная статистика для этой модели сигнала имеет следующий вид:

$$\ln \ell(\alpha, b) = b|Z(\alpha)| - b^2 v(\alpha). \quad (4.102)$$

Несложно заметить, что если к статистике (4.102) применить рассмотренное ранее решающее правило (4.9)–(4.10), то получим систему уравнений

$$\frac{d \ln \ell(\alpha, b)}{d\alpha} = \frac{d}{d\alpha} (b|Z(\alpha)| - 0,5b^2 v(\alpha)) = 0, \quad (4.103)$$

$$\frac{d \ln \ell(\alpha, b)}{db} = \frac{d}{db} (b|Z(\alpha)| - 0,5b^2 v(\alpha)) = 0, \quad (4.104)$$

в которой уравнение (4.103) в явном виде представляет собой алгоритм измерителя дискриминаторного типа, подобный алгоритму (4.80) в случае измерения угловой координаты, или (4.101) – в случае измерения доплеровской частоты, а уравнение (4.104) есть алгоритм однократной оценки амплитуды, подобный алгоритму однократной оценки энергии ожидаемого сигнала (4.67):

¹³⁹ Вопрос совместной оценки информативного и неинформативного параметров РЛ сигналов на фоне внешних помех впервые был изложен в работе Белова А.А. [и др.]. Особенности измерения энергетических параметров сигналов при адаптации к воздействию коррелированных помех // Радиотехника. 1995. №3 С. 37–39. В контексте нашего исследования решение этой проблемы в рамках упомянутой статьи демонстрирует одно из приложений РЛ системотехники к решению задач статистического синтеза в условиях априорной неопределенности.

$$\hat{b}(\alpha) = \frac{|Z(\alpha)|}{v(\alpha)}. \quad (4.105)$$

Для рассматриваемой модели сигнала исходное уравнение совместной фильтрации (4.75) применительно к дискретным оценкам угловой координаты и амплитуды принимаемого сигнала имеет вид

$$\hat{\alpha}_{k+1} = \hat{\alpha}_k + \bar{C}_{pk+1}^{-1} \Delta. \quad (4.106)$$

Здесь $\hat{\alpha}_k = \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_k \\ \hat{b}_k \end{bmatrix}$ – упоминавшийся вектор состояния;

$\bar{C}_{pk+1} = \bar{C}_{pk} + \bar{C}_y$ – рекуррентное уравнение измерения матрицы точности в процессе фильтрации;

$$\Delta = \begin{bmatrix} \hat{b}_k |Z|' - 0,5 \hat{b}_k^2 v' \\ |Z| - \hat{b}_k v \end{bmatrix} \text{ – выходной эффект обобщенного дискримина-}$$

тора.

В свою очередь, \bar{C}_{pk} – матрица точности измерения на k -м шаге фильтрации; \bar{C}_y – матрица точности текущего измерения α , элементы которой определяются следующими выражениями:

$$C_y(1,1) = -\hat{b}_k \left(\frac{|Z|^{2''}}{2|Z|} - \frac{|Z|^{2'}}{4|Z|^3} \right) + 0,5 \hat{b}_k^2 v'';$$

$$C_y(1,2) = C_y(2,1) = -(|Z|' - \hat{b}_k v'); \quad C_y(2,2) = v,$$

где $|Z|' = \frac{|Z|^{2'}}{2|Z|}$, $|Z|^{2'} = 2 \operatorname{Re}(Z'Z^{*'})$ – соответственно производные модуля и квадрата модуля весового интеграла по информативному параметру; $|Z|^{2''} = 2 \operatorname{Re}(Z''Z^{*''})$ – вторая производная от квадрата модуля весового интеграла;

$v'(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} (\bar{X}^T(t, \alpha) \bar{R}^{*'}(t, \alpha) + \bar{X}^T'(t, \alpha) \bar{R}^*(t, \alpha)) dt$ – первая производная по информативному параметру от v ;

$$v''(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} (\bar{X}^T(t, \alpha) \bar{R}''(t, \alpha) + 2\bar{X}^{T'}(t, \alpha) \bar{R}^{*'}(t, \alpha) + \bar{X}^{T''}(t, \alpha) \bar{R}^*(t, \alpha)) dt -$$

вторая производная по информативному параметру от v ;

$\bar{R}'(t, \alpha)$ – решение интегрально-матричного уравнения

$$\int_{-\infty}^{\infty} \bar{\Phi}(t, s) \bar{R}'(s, \alpha) ds = \bar{X}'(t, \alpha);$$

$\bar{R}''(t, \alpha)$ – решение интегрально-матричного уравнения

$$\int_{-\infty}^{\infty} \bar{\Phi}(t, s) \bar{R}''(s, \alpha) ds = \bar{X}''(t, \alpha).$$

С учетом рассмотренных выше составляющих алгоритм (4.106) в явном виде может быть представлен следующим векторно-матричным уравнением:

$$\hat{\alpha}_{k+1} = \begin{pmatrix} \hat{\alpha}_k \\ \hat{b}_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\hat{b}_k \left(\frac{|Z|^{2'}}{2|Z|} - \frac{|Z|^{2'}}{4|Z|^3} \right) + 0,5\hat{b}_k^2 v'' \vdots -(|Z|' - \hat{b}_k v') \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \vdots \dots \dots \times \\ -|Z|' - \hat{b}_k v' \qquad \qquad \qquad \vdots \quad v \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \hat{b}_k |Z|' - 0,5\hat{b}_k^2 v' \\ |Z| - \hat{b}_k v \end{pmatrix}. \quad (4.107)$$

На первый взгляд, синтезированный следящий измеритель – алгоритм (4.107) – в самом общем виде может быть реализован с помощью достаточно простой структурной схемы, представленной на рис. 4.17 (с поправкой на дискретный характер оценки). Однако если учесть векторно-матричную структуру его компонентов, то есть алгоритм (4.105), становится очевидным, что конкретная техническая реализация такого измерителя даже для самой простой модели сигнала оказывается достаточно сложной. Возможное же упрощение за счет замены матрицы точности некоторым постоянным коэффициентом, как это имеет место, например, при дискретной оценке КМП (4.48), сопряжено с потерями в точности измерения и скорости сходимости алгоритма к истинному значению измеряемого

параметра α . Снижение выигрыша в точности, вплоть до его полного отсутствия, связано с тем, что при замене матрицы точности некоторым постоянным коэффициентом оказывается неучтенной взаимозависимость информативного и неинформативного параметров сигнала, для преодоления которой собственно и строился этот измеритель.

Для синтезированного следящего измерителя применительно к угловой координате (при линейном фазовом и равномерном амплитудном распределениях поля на линейной эквидистантной антенной решетке, содержащей M элементов, расположенных на расстоянии d) весовой интеграл, его первая и вторая производные определяются выражениями

$$Z(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{Y}^T(t) \widehat{\Phi}^{-1} \vec{X}^*(t, \alpha) dt,$$

$$Z'(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{Y}^T(t) \widehat{\Phi}^{-1} \vec{X}^{*\prime}(t, \alpha) dt, \quad Z''(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{Y}^T(t) \widehat{\Phi}^{-1} \vec{X}^{*\prime\prime}(t, \alpha) dt,$$

где $\vec{X}(t, \alpha) = x(t) \vec{X}(\alpha)$; $\vec{X}(\alpha) = \left[i\pi \frac{2i - M - 1}{M} \exp(i\pi \frac{2i - M - 1}{M} \alpha) \right]$, причем

$i = 1, 2, \dots, M$; $\alpha = \frac{Md}{\lambda} \sin(\theta)$; λ – длина волны принимаемого колебания;

θ – угловое направление на источник, отсчитываемое от нормали к ФАР;

$x(t)$ – огибающая ожидаемого сигнала; $\widehat{\Phi}^{-1}$ – как и раньше, матрица, обратная корреляционной матрице комплексных амплитуд помеховых колебаний (матрица ОКМП).

При измерении доплеровской частоты весовой интеграл $Z(\alpha)$ и параметр $\nu(\alpha)$ определяются по формулам

$$Z(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{G}_y^T(f) \vec{K}(f, \alpha) df; \quad \nu(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{G}_x^T(f) \vec{K}(f, \alpha) df,$$

где $\vec{G}_y(f)$ – Фурье-преобразование; $\vec{K}(f) = \vec{N}^{-1}(f) \vec{G}_x^*(f)$ – частотная характеристика фильтра; $\vec{N}(f) = \langle \vec{G}_\Pi(f) \vec{G}_\Pi^T(f) \rangle$ – матрица взаимного корреляционного спектра помехи; $\langle \rangle$ – символ статистического усреднения; $\vec{G}_\Pi(f)$ – частотный спектр помехи; $\vec{N}^{-1}(f)$, матрица, обратная матрице $\vec{N}(f)$. Производные $Z'(\alpha)$ и $Z''(\alpha)$ определяются соотношениями

$$Z'(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{G}_y^T(f) \vec{N}^{-1}(f) \vec{G}_x^{*'}(f, \alpha) df; \quad Z''(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{G}_y^T(f) \vec{N}^{-1}(f) \vec{G}_x^{*''}(f, \alpha) df,$$

где $\vec{G}_x^{*'}(f, \alpha)$ и $\vec{G}_x^{*''}(f, \alpha)$ – соответственно первая и вторая производные от спектра ожидаемого сигнала.

При статистическом моделировании синтезированных следящих измерителей в качестве модели пеленгатора рассматривался радиолокатор с линейной эквидистантной восьмиэлементной ФАР. В модели доплеровского измерителя в качестве зондирующего сигнала использовалась когерентная пачка прямоугольных импульсов без внутриимпульсной модуляции. Отношение сигнал/(остаток компенсации помехи + шум) на выходе устройства обработки задавалось в соответствии с выражением (4.62).

Результаты статистического моделирования измерителей угловой координаты и частоты Доплера в условиях воздействия соответственно активных и пассивных помех, реализующих достаточную статистику (4.102), показали, что на 10-м шаге фильтрации эти измерители, по сравнению с рассмотренной ранее инвариантной к энергии ожидаемого сигнала (или амплитуде) достаточной статистикой (4.66), обеспечивают примерно такую же точность измерения энергетических параметров радиолокационного сигнала, что и адаптивный алгоритм (4.69), (4.70).

4.9. Адаптация при большой интенсивности полезного сигнала. Особенности пеленгации источников активных помех

Ранее было введено предположение о том, что мощность отраженного от нешумящей (прикрываемой внешними активными помехами) цели эхосигнала существенно ниже мощности активных помех. В этой связи влияние эхосигнала на цепи самонастройки АФАР пренебрежимо мало и оценка КМ сигнала и помех $\vec{\Phi}(t, s) = \vec{\Phi}_{\text{СП}}(t, s) = \vec{\Phi}_{\text{П}}(t, s, \lambda_1) + \vec{\Phi}_{\text{С}}(t, s, \vec{\alpha}_и, \vec{\lambda}_2)$, по существу, сводилась к оценке корреляционной матрицы помех $\vec{\Phi}_{\text{П}}$.

В ряде практически важных случаев, например, при компенсации активной помехи, действующей на скате основного лепестка диаграммы направленности ФАР, либо при пеленгации источников активных помех на фоне других источников, влияние полезного сигнала на матрицу $\vec{\Phi}(t, s)$ оказывается существенным. В этой связи возникает задача устранения сиг-

нальной составляющей в матрице $\vec{\Phi}(t, s)$, которая решается несколькими способами. Первый связан с использованием в качестве диаграммообразующей матрицы \vec{A} какого-либо ортогонального преобразования (например, Адамара, Фурье, Уолша). В этом случае все сигналы, действующие с направления максимума ДНА основного канала, воспринимаются системой как полезные и не участвуют в формировании ОКМП или весового вектора. Вторым вариантом – устранение сигнала из цепей самонастройки в процессе формирования $\vec{\Phi}(t, s)$ или \vec{R} . В этом случае текущая оценка КМП имеет следующий вид:

$$\hat{\Phi}_y = (\vec{Y} - \hat{a}\vec{X})(\vec{Y} - \hat{a}\vec{X})^{*T} / 2. \quad (4.108)$$

Здесь \hat{a} – оценка модуля нормированной комплексной амплитуды сигнала,

$$\hat{a} = \left| \vec{Y}^T \hat{R}^* / \vec{X}^T \hat{R}^* \right| = |Y_\Sigma / v|,$$

где $v(\alpha)$ – введенная ранее пространственная составляющая отношения сигнал/(помеха+шум).

В качестве простейшей модели сглаживания оценок амплитуды \hat{a}_y может быть рассмотрена модель фильтрации оценок в скользящем окне размера τ_a : $d\hat{a}/dt = (\hat{a}_y - \hat{a})/\tau_a$, где τ_a пропорциональна постоянной времени интегратора фильтра. Подобная задача возникает в случае пеленгации источника активных помех на фоне других источников, сигналы от которых выступают в качестве мешающих. Рассмотрим специфику этой задачи более подробно.

Известно достаточно много методов пеленгации источников помех, основанных на фиксации углового положения антенны (при ее сканировании) в момент, когда выходное напряжение интегратора энергетического приемника достигает максимального значения. Существенным недостатком таких методов является наличие ложных пеленгов за счет приема мешающих источников излучения боковыми лепестками ДНА. Значительно более широкие возможности по пеленгации появляются при использовании АФАР, где наряду с получением информации об угловых координатах возможно определение числа и интенсивностей источников помех.

Условно эти методы (и соответствующие им алгоритмы) можно разделить на две большие группы: а) группа методов, ширина пеленга при

реализации которых соизмерима с шириной ДНА в соответствующей угломерной плоскости (показатели качества пеленгации в рамках релейского разрешения); б) группа методов косвенной пеленгации, обеспечивающих так называемое сверхрелейское разрешение источников помех.

Методы первой группы основаны на пространственных различиях сигнала и помехи. В качестве выходного сигнала (сигнала пеленга) используется квадрат модуля выходного эффекта (4.59), предварительно прошедшего согласованную (временную) обработку в соответствующем фильтре и некогерентное последетекторное накопление в интеграторе. Такой эффект для задач пеленгации выступает в качестве достаточной статистики (статистики, достаточной для принятия решения о наличии или отсутствии пеленга). Схема пеленгатора может быть реализована с помощью адаптивных обнаружителей, представленных на рис. 4.10–4.13 с дополнительно включенным после детектора интегратором. Обязательное в данном случае устранение влияния полезного сигнала на оценку весового вектора или ОКМП может быть осуществлено за счет рассмотренного выше контура обратной связи или формирования провалов в ДН компенсационных антенн в направлении ожидаемого прихода полезного сигнала, в т. ч. и с помощью упоминавшихся ортогональных преобразований Адамара, Фурье, Уолша и др. В последнем случае сигнал помехи, действующий в области максимума основного лепестка, будет восприниматься системой в качестве полезного сигнала, поскольку в компенсационные каналы автокомпенсатора он не попадает. Очевидно, что по этому сигналу будет сформирован соответствующий пеленг. Сигналы источников помех (ИП), занимающих отличные от пеленгуемого источника угловые положения, в такой системе будут подавляться. В процессе кругового обзора пространства на выходе устройства последовательно во времени будут воспроизводиться пеленги на ИП, находящиеся в зоне обнаружения РЛС. Несколько ИП, не выходящих по пеленгуемой координате за пределы основного лепестка ДНА, будут восприниматься как один с некоторым общим энергетическим центром. В этом явлении находит свое отражение сущность упоминавшегося релейского разрешения. В то же время ширина таких пеленгов в соответствующей угловой плоскости будет несколько уже основного лепестка ДНА за счет компенсации помехи на скатах основного лепестка.

Методы второй группы эквивалентны методам спектрального анализа. Они основаны на информации об интенсивностях и угловых положениях ИП, содержащейся в матрице $\vec{\Phi}_{\text{СП}}(t, s)$ или весовом векторе $\vec{R}_{\text{СП}}(\theta) = \vec{\Phi}_{\text{СП}} \vec{X}^*(\theta)$. Здесь θ – угловая координата (пеленг) на ИП. По аналогии со спектральным анализом их иногда называют *методами пространственного анализа*. Рассмотрим эти методы более подробно.

1. Метод пеленгации с воспроизведением интенсивности полезного сигнала. В этом случае выражения для выходного эффекта $Z_H^2(\theta)$ устройства пеленгации имеют вид:

$$Z_H^2(\theta) = [\vec{X}^T(\theta) \hat{R}_{\text{сп}}^*(\theta)]^{-1} = [\vec{X}^T(\theta) \hat{\Phi}_{\text{сп}}^{-1} \vec{X}^*(\theta)]^{-1}, \quad (4.109)$$

где оценка комплексного весового вектора сигнал-помеха $\hat{R}_{\text{сп}} = \hat{\Phi}_{\text{сп}}^{-1} \vec{X}^*(\theta)$ содержит как полезный сигнал, так и сигнал помехи, а $\vec{X}(\theta)$ представляет собой вектор ожидаемого амплитудно-фазового распределения в функции угла прихода сигнала пеленгуемого источника θ . Процесс вычисления выходного эффекта (4.109) и пеленгации источников сводится к оценке ОКМП $\hat{\Phi}_{\text{сп}}^{-1}$ на основе вектора принятых реализаций $\vec{Y}(t)$ и последующей фильтрации (например, на ЭВМ при цифровой обработке) неслучайных амплитудно-фазовых множителей $\vec{X}(\theta)$ как функций угловых координат с использованием рассмотренных ранее адаптивных обращющих фильтров $\hat{\Phi}_{\text{сп}}^{-1} \vec{X}(\theta)$ (рис. 4.7, 4.9–4.10). Как видим, при вычислении пеленгационного эффекта (4.109) входной сигнал $\vec{Y}(t)$ непосредственно не используется. В этом состоит основное отличие метода пеленгации по выходному сигналу энергетического приемника от метода определения пространственного спектра.

Результаты статистического моделирования рассматриваемого алгоритма для числа ИП $N = 2$, действующих в области основного лепестка, представлены на рис. 4.37. По горизонтальной оси отложена текущая угловая координата в долях полуширины ДНА.

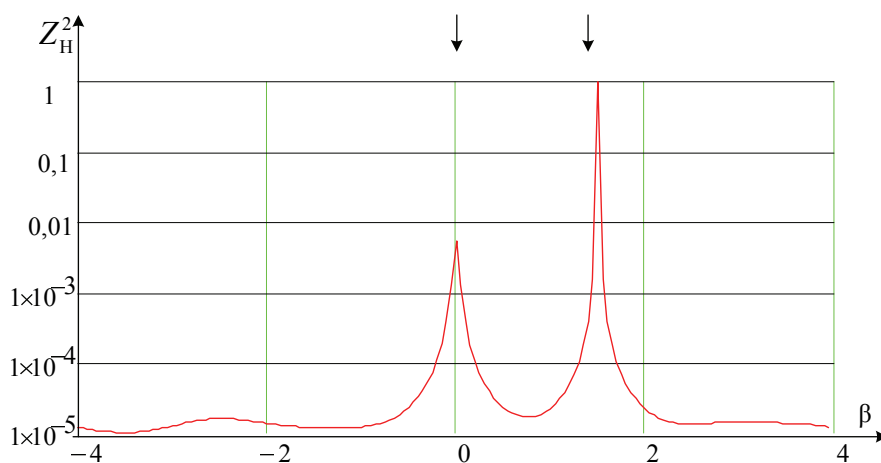


Рис. 4.37. Пеленгационные характеристики алгоритма (4.109) при $\beta = \theta$

Важно подчеркнуть, что такой алгоритм, помимо эффекта сверхрелевского разрешения двух близко расположенных по координате θ источников, позволяет оценить и интенсивности \hat{h}_c излучаемых ими помех в соответствии с соотношением $\hat{h}_c = \left[\vec{X}^T(\theta) \hat{R}_{\text{сп}}^* \right]^{-1}$.

2. *Метод пеленгации с выравниванием помеховой составляющей выходного эффекта пеленгатора.* Специфика алгоритма состоит в том, что помеховая составляющая выходного эффекта должна быть равна входящей в нее шумовой составляющей. В этом случае сам алгоритм пеленгации может быть представлен следующим образом:

$$Z_H^2(\theta) = \vec{X}^T(\theta) \hat{R}_{\text{сп}}^*(\theta) / \hat{R}_{\text{сп}}^T(\theta) \hat{R}_{\text{сп}}^*(\theta). \quad (4.110)$$

Этот алгоритм, по сравнению с алгоритмом (4.109), сложен в реализации и имеет более низкую точность оценки интенсивности сигнала (если такая оценка требуется). Однако он имеет и ряд преимуществ. Первое из них связано с возможностью использования постоянного порога обнаружения, если задана вероятность ложной тревоги, второе – с более высокой точностью оценки угловых координат ИП (рис. 4.38a).

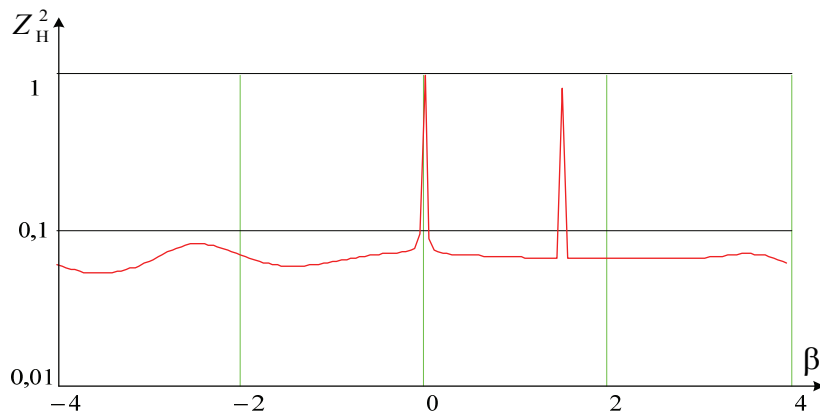


Рис. 4.38a. Пеленгационные характеристики алгоритма (4.110) при $\theta = \beta$

3. *Метод «теплового шума».* Основан на том, что значение элементов весового вектора $\hat{R}_{\text{сп}}(\theta)$ стремится к нулю в случае, когда направление локации совпадает с направлением на интенсивный источник излучения.

Поэтому вводят скалярное произведение $\hat{R}_{\text{сп}}^T(\theta)\hat{R}_{\text{сп}}^*(\theta)$ и называют его мощностью «теплового шума» АФАР. В качестве же достаточной статистики выбирается величина, обратная этой мощности (рис. 4.38б):

$$Z_H^2(\theta) = 1/\hat{R}_{\text{сп}}^T(\theta)\hat{R}_{\text{сп}}^*(\theta). \quad (4.111)$$

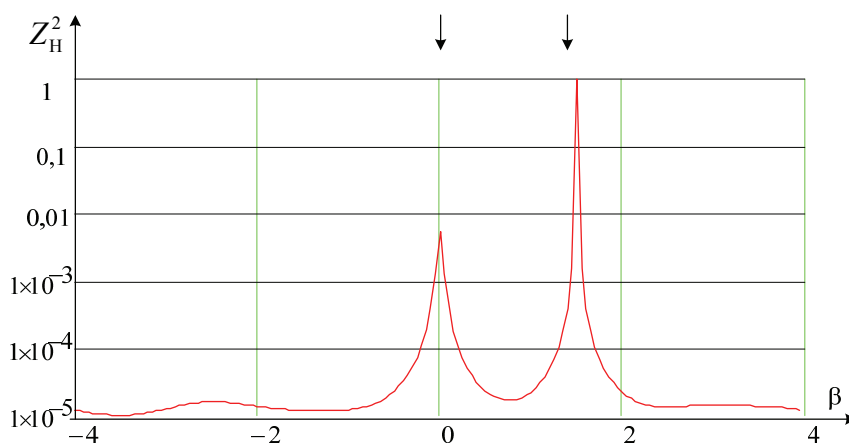


Рис. 4.38б. Пеленгационные характеристики алгоритма теплового шума при $\theta = \beta$

4. *Метод поиска ИП с предварительной оценкой их числа.* Отличается сравнительно малым (в теоретическом плане) смещением оценок угловых координат ИП, но подвержен сильному влиянию дестабилизирующих факторов. При этом обработка разделяется на три этапа: а) этап оценки КМ принимаемых колебаний $\hat{\Phi}_{\text{сп}}$; б) этап оценки числа ИП J ; в) этап оценки угловых координат ИП.

В наиболее общем случае оценка матрицы выполняется по соотношению $\hat{\Phi}_{\text{сп}} = 1/2(\overline{\vec{Y}(t)\vec{Y}^{T*}(t)})$. Для определения числа источников вычисляются собственные значения λ_i и ортонормированные собственные векторы \vec{V}_i матрицы $\hat{\Phi}_{\text{сп}}$. Поскольку эта матрица является эрмитовой, постольку она допускает представление

$$\hat{\Phi}_{\text{сп}} = \sum_{i=1}^m \lambda_i \vec{V}_i \vec{V}_i^{*T} = \vec{V} \hat{\Lambda} \vec{V}^{*T},$$

где $\vec{V} = \|\vec{V}_1, \vec{V}_2, \dots, \vec{V}_m\|$ – унитарная, а $\hat{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ – диагональная матрицы.

Оценку числа ИП можно найти по числу собственных значений матрицы $\hat{\Phi}_{\text{сп}}$, превышающих дисперсию шума в определенное число раз. Для оценивания угловых координат ИП используются алгоритмы (4.109) – (4.111), в которых весовой вектор имеет вид

$$\hat{R}_{\text{сп}}(\theta) = \hat{F} \vec{X}(\theta). \quad (4.112)$$

Здесь \hat{F} – матрица, составленная из собственных векторов: $\hat{F} = \sum_{i=1} d_i \vec{V}_i \vec{V}_i^{*\text{T}}$, где d_i – некоторые коэффициенты, равные единице либо $1 / \lambda_i$. При $d_i = 1$ матрицы \hat{F} называют проекторами, при $d_i = 1 / \lambda_i$ – квазипроекторами.

Особенностью проекционных методов является зависимость показателей качества пеленгации от того, насколько точно удастся разделить собственные значения и собственные векторы корреляционной матрицы $\hat{\Phi}_{\text{сп}}$, обусловленные действием шума и сигнала. Это может приводить либо к появлению ложных максимумов (если число собственных значений, отнесенных к сигнальным, больше истинного числа ИП), либо к пропуску целей в противном случае. Существует несколько разновидностей технической реализации проекционного метода, описание которых мы опускаем¹⁴⁰.

5. *Метод косвенного поиска источников излучения.* Основан на отыскании экстремумов или нулей функции $Z_{\text{H}}^2(\theta)$. Для таких алгоритмов (без предварительной оценки числа ИП) косвенный поиск сводится к отысканию корней уравнения вида $dZ_{\text{H}}^2(\theta)/d\theta = 0$, для алгоритмов косвенного ИП с предварительной оценки их числа – к отысканию корней уравнений вида

$$\frac{d}{d\theta} \frac{1}{Z_{\text{H}}^2(\theta)} = 0. \quad (4.113)$$

В частности, применительно к алгоритму (4.109) подлежащее решению уравнение имеет вид

$$\text{Re}[\vec{X}^{*\text{T}}(\theta) \hat{\Phi}_{\text{сп}}^{-1} \vec{X}'(\theta)] = 0,$$

где $\vec{X}'(\theta) = \frac{d}{d\theta} \vec{X}(\theta)$.

¹⁴⁰ Алмазов В.Б. Манжос В.Н. Получение и обработка радиолокационной информации. Харьков, 1985. С. 372–379; Алмазов В.Б. [и др.]. Теоретические основы радиолокации : в 2-х ч. Ч. 2. Харьков, 1996. С. 164–180.

Рассматривая алгоритмы пространственного анализа, следует иметь в виду, что эти алгоритмы обладают различными показателями качества пеленгации ИП и их разрешения, требуют различных вычислительных затрат при реализации на ЭВМ, по-разному реагируют на дестабилизирующие факторы. Поэтому использование того или иного класса алгоритмов определяется функциональным назначением РЛС и требованиями, предъявляемыми к ней, а также ожидаемым числом ИП и интенсивностью их излучений.

Итак, видим, что в задачах пеленгации из-за отсутствия информации о времени излучения непосредственное измерение дальности до ИП по запаздыванию радиосигнала невозможно. Поэтому для определения дальности до радиоизлучающей цели используются методы приема помеховых сигналов в нескольких разнесенных точках пространства. Однако в многопозиционных системах, в том числе и в двухпозиционных, задача отождествления пеленгов в условиях множества радиоизлучающих целей оказывается достаточно сложной. Это требует совершенной системы обмена данными между РЛС. Тем не менее, такие системы в условиях усложнения помеховой и воздушной обстановки являются весьма перспективными.

4.10. Особенности малобазового приема радиолокационных сигналов в условиях помех

Радиолокационные системы, передающие и приемные антенны которых располагаются в одном месте либо используют одну антенну, коммутируемую с передачи на прием сигналов, называются моностатическими, или *однопозиционными*. В отличие от них *многопозиционные* радиолокационные (МП РЛ) системы объединяют работу независимых однопозиционных систем, бистатических и пассивных систем (приемных устройств), располагающихся в различных точках пространства (позициях), разнесенных на определенные расстояния. В общем случае МП РЛ системы могут включать радиолокационные устройства, использующие различные методы определения местоположения и параметров движения целей. При этом на позициях может размещаться аппаратура активных независимых систем, полуактивных или пассивных систем. Совместная обработка РЛИ в таких системах имеет ряд преимуществ по сравнению с однопозиционными системами: более гибкое формирование зон обзора (рабочих зон) системы, повышение точности определения координат и параметров движения целей, улучшение разрешения и распознавания обнаруженных целей, повышение помехозащищенности от активных и пассивных помех.

В результате МП РЛ системы обеспечивают более надежное выполнение тактических задач и обладают повышенной живучестью. Конечно, эти преимущества достигаются усложнением и удорожанием системы.

В зависимости от характера использования фазовой информации, содержащейся в сигналах от целей, принимаемых на различных позициях, различают пространственно-когерентные, пространственно-некогерентные системы и системы с кратковременной пространственной когерентностью. В *пространственно-когерентных* системах фазовые соотношения в каналах передачи и обработки сигналов, поступающих с различных позиций, поддерживаются неизменными в течение времени, значительно превышающего длительность сигнала. Такие системы называются истинно когерентными, и отдельные позиции таких систем можно уподобить элементам ФАР, разнесенным на большие расстояния. В *пространственно-некогерентных* системах совместная обработка сигналов осуществляется после их детектирования на отдельных позициях. Это упрощает МП РЛ системы, так как исключает необходимость синхронизации работы аппаратуры системы по частоте и фазе. В системах с *кратковременной пространственной когерентностью* неизменность фазовых соотношений сохраняется только в пределах длительности принимаемых сигналов (псевдокогерентные системы).

Перспективным направлением развития мобильных, или передислоцируемых МП РЛ систем, обеспечивающих повышение качества извлекаемой РЛИ, является создание *радиолокационных сетей* с обменом данными между входящими в сеть РЛС. Такие РЛС могут иметь различные дальность действия, сигналы и алгоритмы их обработки, разрешающие способности и темп обзора пространства.

Для того чтобы группа РЛС могла образовать сеть, необходимо каждый локатор укомплектовать аппаратурой координатно-временной привязки и аппаратурой связи для обмена информацией сразу несколькими РЛС, находящимися в зоне надежной связи. *Протокол обмена* данными предполагает передачу информации о параметрах и технических характеристиках РЛС (рабочей частоте, разрешении по дальности, скорости и угловым координатам, периоде повторения, скорости вращения антенны и т. п.), о собственных координатах и векторе скорости РЛС (при движущемся носителе) с указанием погрешностей их измерения, а также координатах и скорости перемещения обнаруженных целей с указанием погрешностей их измерения и отношений сигнал/шум.

Очевидно, что при таком протоколе обмена речь идет о пространственно-некогерентных МП РЛ системах с автономными устройствами первичной обработки информации (ПОИ), обеспечивающими совместную вторичную обработку сигналов. Для реализации такой обработки исполь-

зуют специальные асинхронные многовходовые траекторные фильтры с адаптацией к качеству (погрешности измерения) и надежности (отношение сигнал/шум) поступающей информации.

Число позиций, с которыми установлен обмен информацией, для каждой РЛС различно и будет определяться геометрией сети и возможностями каналов связи (рис. 4.39). Фактически каждая позиция Π_i в радиолокационной сети представляет собой *интегрированный радиотехнический комплекс*, включающий в себя непосредственно РЛС с высокопроизводительной системой совместной обработки информации (ССОИ), высокоточную навигационную систему (ВНС) координатно-временной привязки и многоканальную широкополосную систему связи (МШСС) – рис. 4.40.

Наибольший выигрыш от объединения в сеть получается при совместной обработке данных разнотипных РЛС, имеющих различные несущие частоты, поляризации, высоты установки антенн, типы зондирующих сигналов. В этом случае в каждой РЛС извлекается взаимно менее зависимая информация, а их объединение происходит наиболее эффективно.

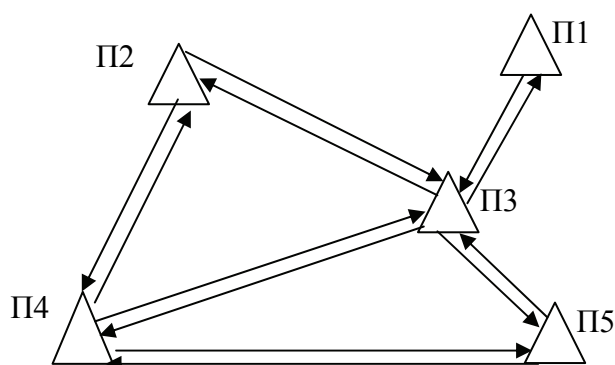


Рис. 4.39. Схема обмена информацией в МП РЛ системе

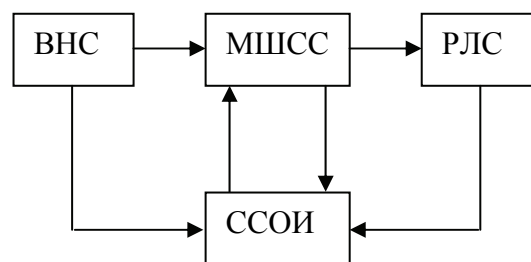


Рис.4.40. Структурная схема аппаратуры на позициях МП РЛ системы

В ряде практически важных случаев имеется возможность создания пространственно-когерентной многопозиционной системы с малой базой за счет когерентного объединения сигналов нескольких однотипных РЛС, расположенных на одной либо соседних позициях. В этом случае появляется дополнительная возможность повышения помехозащищенности и точности измерения координат целей на фоне внешних помех при незначительном усложнении радиолокационной системы в целом.

Рассмотрим вариант адаптивной радиолокационной системы дискриминаторного типа, обеспечивающий снижение ошибок измерения угловых координат целей в условиях воздействия внешних активных помех

за счет пространственного разнесения антенн на малую базу¹⁴¹. Такие системы иногда называют радиолокационными системами с разрывной апертурой. Переход к адаптивной малобазовой системе с использованием, например, одного центрального и двух разнесенных относительно него на величину $\pm B$ вспомогательных пунктов приема может быть осуществлен посредством представления вектора $\vec{X}(\alpha)$ ожидаемого АФР (вектора ожидаемого сигнала), обеспечивающего управление положением приемной ДН ФАР, в виде блока из трех вспомогательных векторов:

$$\vec{X}^T(\alpha) = \left\| \vec{X}_1(\alpha)e^{j\pi\mu\vartheta} : \vec{X}_1(\alpha) : \vec{X}_1(\alpha)e^{-j\pi\mu\vartheta} \right\|, \quad (4.114)$$

где $\vec{X}_1(\alpha) = \left\| \exp[j\pi\vartheta(2i - M - 1)/M] \right\|$; $i = \overline{1, M}$; $\mu = B/l$; $\vartheta = (l/\lambda)\sin\theta$ – обобщенный угловой параметр; l – размер антенной решетки; M – число ее элементов; λ – длина волны; θ – угловое положение прикрываемой цели; B – база радиолокационной системы. Структурная схема такого измерителя представлена на рис. 4.41.

Одной из особенностей рассматриваемого измерителя является наличие в канале с разрывной апертурой интерференционных побочных лепестков. Поэтому такой измеритель из-за многошкальности измерений содержит два канала: грубый и точный. В первоначальный момент времени захват прикрываемой цели на сопровождение осуществляется грубым каналом, построенным на основе реального приемного пункта. В дальнейшем, при устойчивом сопровождении цели этим каналом, осуществляется переход на сопровождение точным каналом, построенным с учетом двух крайних

$$\vec{X}^T(\alpha) = \vec{X}_2^T(\alpha) = \left\| \vec{X}_1 \exp(j\pi\mu\vartheta) : \vec{X}_1 \exp(-j\pi\mu\vartheta) \right\|$$

либо всех трех пунктов приема. Грубый канал осуществляет контроль однозначности измерения, а также обеспечивает однозначный перезахват цели при срыве сопровождения по точному каналу.

В представленном на рис. 4.41 измерителе грубый канал построен на центральной ФАР, а разнесенные относительно фазового центра первой на величину $\pm \mu$ крайние ФАР образуют точный канал обобщенного углового дискриминатора. Здесь БСПВ – блок скалярного перемножения векторов.

¹⁴¹ Ботов М.И., Вяхирев В.А., Девотчак В.В. Особенности построения адаптивных радиолокационных комплексов с разрывной апертурой // Современные проблемы развития науки, техники и образования : сб. науч. тр. Красноярск : ИПК СФУ, 2009. С. 347–351.

Оценка ОКМП $\vec{\Phi}_{\Pi 1}^{-1}$ и $\vec{\Phi}_{\Pi 2}^{-1}$ может осуществляться в соответствии с любым алгоритмом, рассмотренным в подпараграфе 4.4.2 (например, в соответствии с алгоритмом (4.54) – рис. 4.9).

При этом матрица $\vec{\Phi}_{\Pi 2}^{-1}$ будет иметь блочный вид, поскольку вектор \vec{Y}_2 состоит из двух подвекторов (подвекторов сигналов левой и правой ФАР). Выходные дискриминаторные эффекты грубого и точного каналов обозначены соответственно Δ_1 и Δ_2 . Их обработка осуществляется в блоке совместной оценки, куда они поступают по соответствующим узкополосным каналам связи. Широкополосный канал связи задействован при передаче вектора сигналов левой ФАР в устройство обработки сигналов точного канала (правой ФАР). Эти каналы связи на рисунке не показаны.

Результаты статистического моделирования рассматриваемого пространственно разнесенного углового дискриминатора для $\mu = 3$ представлены на следующих рисунках: на рис. 4.42 – выходные эффекты соответственно для грубого (образованного вектором $\vec{X}_1(\alpha)$ – штрих-пунктир) и точного (образованного вектором $\vec{X}_2(\alpha)$ – сплошная линия) каналов; на рис. 4.43 – ДХ грубого и точного каналов дискриминатора.

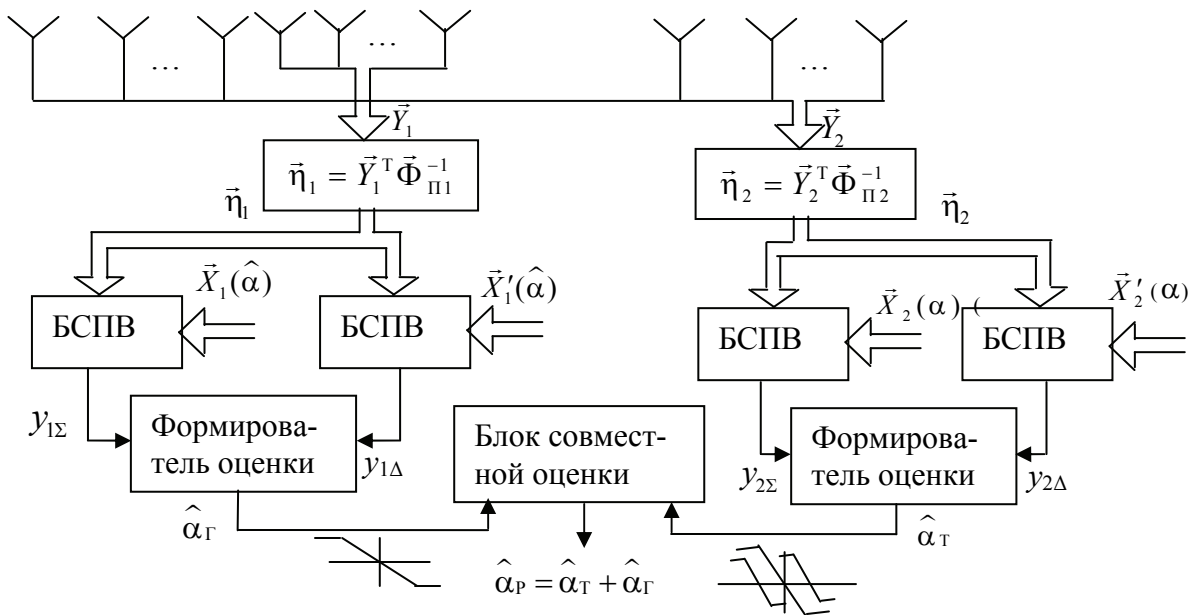


Рис. 4.41. Структурная схема малобазового радиолокационного комплекса

$$\vec{X}_2^T(\alpha) = \left\| \vec{X}_1(\alpha) \exp(j\pi\mu\vartheta) : \vec{X}_1(\alpha) \exp(-j\pi\mu\vartheta) \right\|.$$

Кривые на рис. 4.42,*a* и 4.43,*a* соответствуют ситуации без помех; кривые, представленные на рис. 4.42,*б* и 4.43,*б* – условиям воздействия внешних активных помех. По оси абсцисс отложена угловая координата, выраженная в долях полуширины ДНА грубого канала. Нешумящая цель находится в равносигнальном направлении. Источник помех, интенсивность которого превышает интенсивность сигнала на 30 дБ, действует в области главных лепестков с угловой координатой $\vartheta_1 = 0,4$. Очевидно, что нули ДХ грубого и точного каналов соответствуют максимумам своих суммарных ДНА.

Из рис. 4.42 видим, что при адаптации к внешней помехе суммарная ДНА грубого канала существенно искажается, а ее максимум смещается относительно истинного направления на цель почти на четверть от исходной. Это явление соответствует ситуации, рассмотренной ранее в подпараграфе 4.6.2. Суммарная же ДНА точного канала искажается значительно меньше, а ее максимум практически не смещается. Подобный эффект наблюдается и на дискриминаторных характеристиках (рис. 4.43).

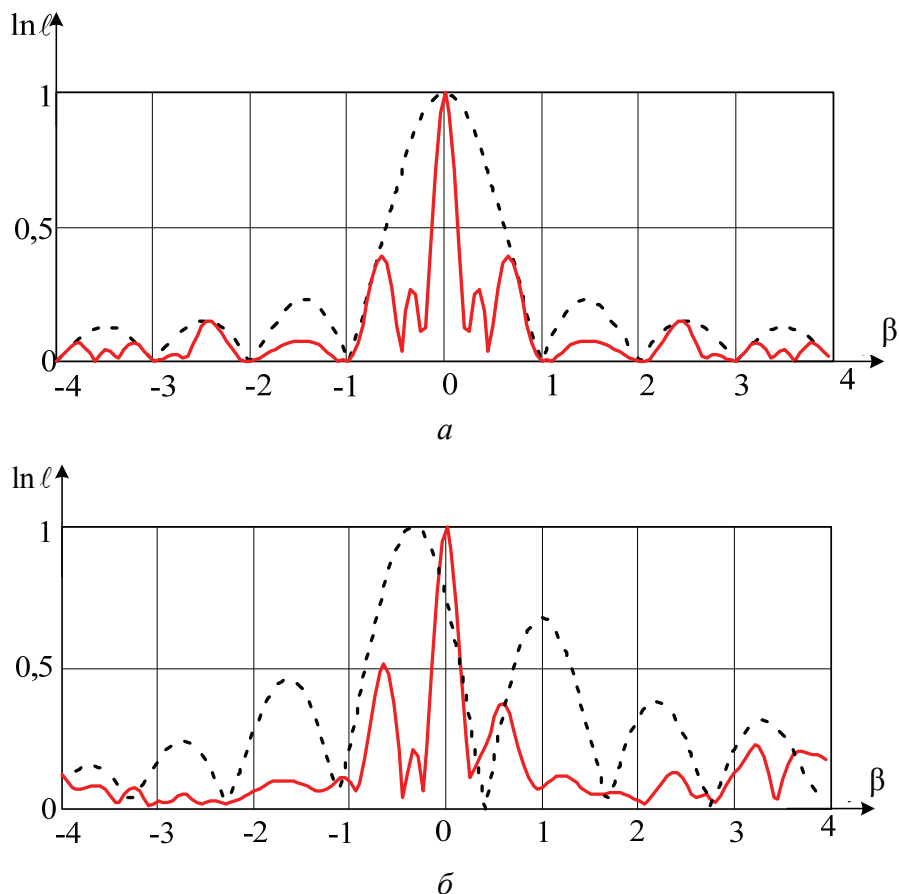


Рис. 4.42. Огибающие ДНА суммарных каналов углового дискриминатора с разрывной апертурой; *a* – в условиях отсутствия и *б* – воздействия внешних помех

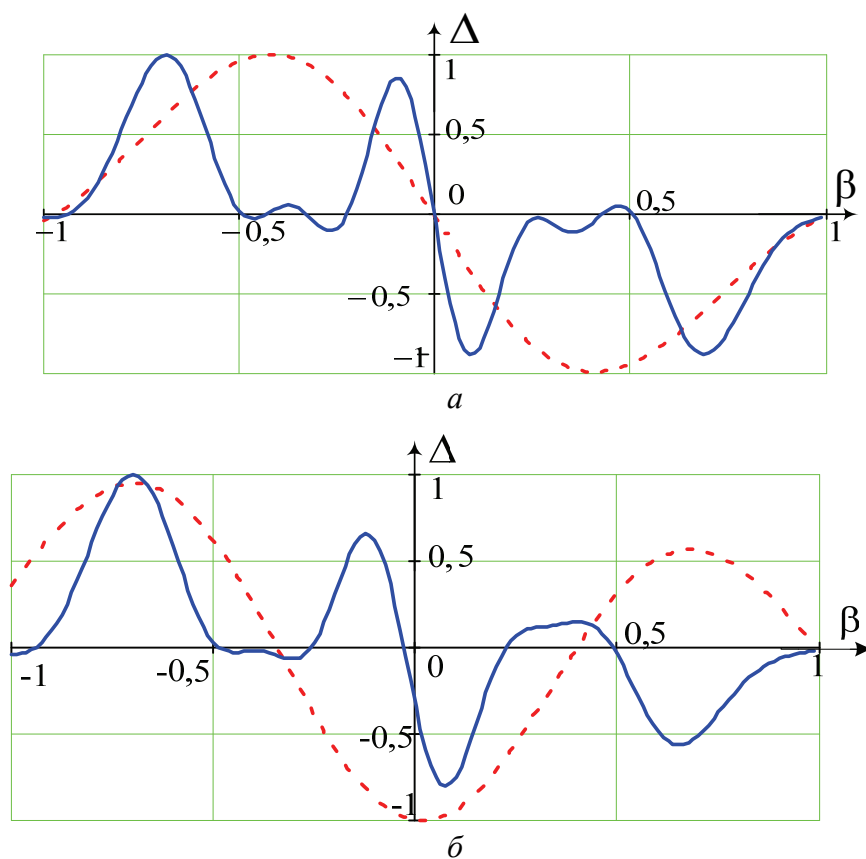


Рис. 4.43. Дискриминаторные характеристики углового дискриминатора с разрывной апертурой: *a* – в условиях отсутствия и *б* – воздействия внешних помех

Результат достигается за счет эффекта пространственной селекции. В первом случае источник помех действует на скате основного лепестка, в непосредственной близости от его максимума. Формирование провала АФАР в направлении на ИП сопровождается существенным искажением ДНА и смещением ее максимума. Во втором случае ИП оказывается в области интерференционного лепестка, амплитуда которого существенно меньше основного.

По этой причине адаптация ФАР с разрывной апертурой оказывает заметно меньшее влияние на форму и пространственное положение основного лепестка ДНА точного канала. Таким образом, при переходе к РЛ системам с разрывной апертурой влияние мешающих сигналов на точность измерения угловых координат снижается тем больше, чем больше величина μ (в пределах неравенства $\delta < \Delta\theta$, где δ – СКО ошибки измерения углового параметра α грубым каналом $\Delta\theta$ – ширина линейной части ДХ точного канала).

В ряде случаев при построении точного канала обобщенного углового дискриминатора оказывается целесообразным для суммарного канала осуществлять накопление сигнала по ФАР всех пунктов, а для построения

разностного канала по-прежнему использовать лишь ФАР крайних пунктов приема. Крутизна дискриминаторной характеристики при этом существенно повышается при дальнейшем уменьшении влияния помеховых сигналов на точностные характеристики обобщенного углового дискриминатора.

Поскольку вектор входных сигналов \vec{Y}_0^T в этом случае может быть представлен блоком вида $\vec{Y}_0^T = \|\vec{Y}_L : \vec{Y}_C : \vec{Y}_P\|$, где $\vec{Y}_L, \vec{Y}_C, \vec{Y}_P$ – векторы выходных сигналов ФАР соответственно левого, центрального и правого приемных пунктов, корреляционная матрица помех $\vec{\Phi}_P(t, s) = \overline{\vec{Y}(t)\vec{Y}^{*T}(s)}/2$ также имеет блочный вид:

$$\vec{\Phi}_P = \begin{vmatrix} \vec{\Phi}_{11} & \vec{\Phi}_{12} & \vec{\Phi}_{13} \\ \vec{\Phi}_{21} & \vec{\Phi}_{22} & \vec{\Phi}_{23} \\ \vec{\Phi}_{31} & \vec{\Phi}_{32} & \vec{\Phi}_{33} \end{vmatrix}, \quad \vec{\Phi}_{22} = (\vec{Y}_C \vec{Y}_C^{*T})/2, \quad \begin{vmatrix} \vec{\Phi}_{11} & \vec{\Phi}_{13} \\ \vec{\Phi}_{31} & \vec{\Phi}_{33} \end{vmatrix} = \vec{\Phi}_T = \begin{vmatrix} \vec{Y}_L \\ \vec{Y}_P \end{vmatrix} * \|\vec{Y}_L^* : \vec{Y}_P^*\|. \quad (4.115)$$

Обращенная по методу Фробениуса матрица (4.115) также является блочной, то есть включает в себя матрицы $\vec{\Phi}_{22}^{-1}$ и $\vec{\Phi}_T^{-1}$. Это позволяет на основе одной обратной матрицы $\vec{\Phi}_P^{-1}$ осуществлять компенсацию помех, принимаемых суммарной и разностной ДНА точного канала обобщенного углового дискриминатора, а также защиту от помех грубого канала этого дискриминатора (рис. 4.4). Здесь БВМП – блок векторно-матричного перемножения.

Накопление сигнала в суммарном канале по всем ФАР исключает потери в отношении сигнал/помеха. Использование для формирования сигнала разностного канала сигналов крайних ФАР повышает (за счет разности на некоторую базу) крутизну дискриминаторной характеристики малобазового комплекса.

Результирующая характеристика точного канала, благодаря использованию в суммарном канале ФАР всех приемных пунктов, имеет не только высокую крутизну, но и содержит меньшее количество ложных дискриминаторных характеристик, возникающих за счет дифракционных лепестков. Назначение грубого канала остается прежним.

Рассмотренный пример малобазового комплекса показывает, что при наличии нескольких приемных АФАР либо АФАР с большим количеством элементов в некоторых случаях целесообразно формировать грубый и точный каналы угловых дискриминаторов в соответствии с синтезированными в данной главе адаптивными алгоритмами. При этом возможно не только снижение влияния внешних помех на пространственные характеристики малобазового комплекса в процессе адаптации, но и повышение точности измерения угловых координат прикрываемой цели.

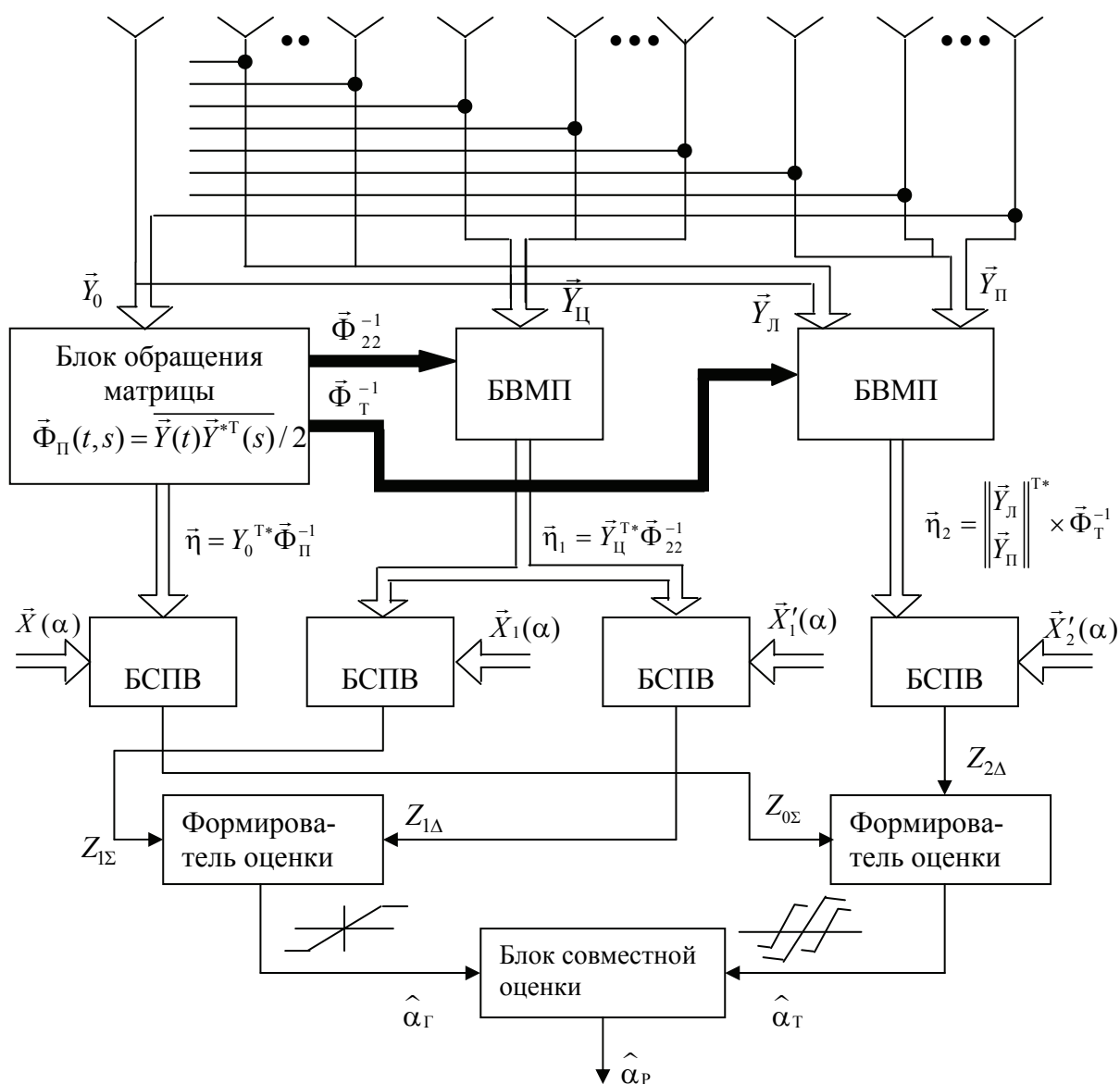


Рис. 4.44. Схема малобазового радиолокационного комплекса повышенной точности

Таким образом, задача приема, обработки и измерения параметров радиолокационных сигналов в условиях адаптации пространственных, времячастотных и поляризационных характеристик измерительного комплекса к соответствующим видам помех сопровождается существенной спецификой, проявляющейся в том, что измеряемые параметры сигнала могут принимать энергетический характер, а функция правдоподобия существенно искажается и в ряде практически важных случаях не может быть аппроксимирована гауссовой поверхностью по всем измеряемым параметрам. В этих условиях фундаментальная теоретическая схема радио-

локационной системотехники (4.11)–(4.14) и основанный на ней системотехнический метод позволяют синтезировать адаптивные обнаружители-измерители, обеспечивающие минимизацию систематической и флуктуационной ошибок измерения. Выигрыш в точности таких измерителей оказывается наиболее существенным при приближении отношения сигнал/(помеха + шум) к своему пороговому значению. Существенно, что выявленные особенности адаптивного измерения характерны не только для когерентного сигнала с равновероятной начальной фазой и релейской амплитудой, но и для различных статистических моделей некогерентных во времени сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии исследованы актуальные проблемы становления теории и методологии РЛ систем. Показано, что РЛ системы представляют собой, с одной стороны, разновидность целенаправленных (социальных) систем, поскольку их строение и функционирование подчиняется законам технологического движения вещества, энергии и информации. В этом качестве РЛ системы являются объектом общей теории технологии. С другой стороны, отдельная РЛС приобретает определенную функциональную ценность только как компонент некоторой целостности, результат функционирования которой превышает суммарный результат функционирования независимых РЛС. С этой точки зрения РЛ системы представляют собой объект общей теории систем и междисциплинарной методологии. Кроме того, основным элементом любой РЛ системы является конкретная РЛС, представляющая собой результат материализации основных закономерностей и принципов радиолокационного взаимодействия посредством соответствующих устройств и технологий. С этой точки зрения такая система является объектом соответствующей научно-технической дисциплины – теоретической радиолокации и ее методологии. Это значит, что теория и методология РЛ систем имеют явно выраженный междисциплинарный характер, а процедуры их разработки оказываются значительно более сложными, чем подобные процедуры построения теории и методологии конкретной научно-технической дисциплины.

Одним из важнейших методологических средств современного теоретического анализа РЛ систем является системный подход. Он представляет собой вершину развития междисциплинарной методологии классической и неклассической научной рациональности и обеспечивает познание частей на основании знания закономерностей целого и свойств целостности. В то же время рассматриваемая системная методология способна эффективно решать возложенные на нее научно-технические и технологические задачи применительно к сложным линейным системам, то есть системам, находящимся в стационарном (относительно устойчивом) состоянии. Однако реальные сложные системы возникают и самоподдерживаются на тонкой границе хаоса и порядка и любое микроскопическое движение (флуктуация) может вызвать быстрый лавинообразный процесс нарастания изменений, вплоть до формирования новой макроструктуры или простого распада. Радиолокационные системы радиотехнических войск и ЕС ОрВД относятся к классу именно таких систем. Они могут определенное время находиться в относительно устойчивом (равновесном) состоянии. Однако в значительно более продолжительные отрезки времени, особенно при

функционировании в особый (угрожаемый) период или период ведения боевых действий, такие системы проявляют явно выраженные нелинейные свойства, пребывая далеко от равновесного состояния. В этом случае принцип классической суперпозиции утрачивает актуальность и для адекватного теоретического описания таких систем арсенала методологических средств классического системного подхода уже недостаточно.

В этой связи, в рамках современной (постнеклассической) научной рациональности, возникла и стала успешно развиваться новая отрасль междисциплинарного научного знания – синергетика, изучающая существенно неравновесные системы с точки зрения проблемы выбора дальнейшего направления развития в точках бифуркации (ветвления) и роли случайностей в этих процессах. Она исследует сложные системы вдали от состояния равновесия. Линейный стиль мышления, базирующийся на принципе классического детерминизма, закономерным образом уступил свой приоритет синергетическому (нелинейному) стилю мышления, который представляет собой современный этап развития системного мышления, основанного на принципе постнеклассического (нелинейного) детерминизма. Основным объектом этой формирующейся отрасли междисциплинарного научного знания являются существенно нелинейные, в том числе быстро развивающиеся процессы, которые при определенных условиях флуктуации (внутренней или внешней) могут привести систему к качественным изменениям – простому распаду или формированию новых относительно устойчивых структур. Гомеостатические же процессы линейных систем охватываются синергетикой как частный случай эволюционирования сложных структур.

Синергетический подход существенно расширяет границы познания радиолокации. Но в особой степени эвристический потенциал этой междисциплинарной методологии проявляется при оценке параметров и структуры радиолокационного поля, где нелинейность РЛ системы выражена в наибольшей степени. Стабильность структуры этого поля носит весьма условный характер. Даже в стационарном режиме функционирования, предопределенном детерминированным характером воздушной обстановки, параметры этого поля не остаются постоянными из-за влияния ряда внешних факторов. В условиях же реального информационного конфликта структура РЛП примет явно выраженный нелинейный характер. Это уже не просто некоторая энергоинформационная структура с заданными пространственно-временными и информационными параметрами, а структура-процесс, состояние, пространственная конфигурация и выходные параметры которой постоянно изменяются и, следовательно, достоверно не известны. Здесь при оценке состояния системы и выборе соответствующих управленческих решений линейный стиль мышления классического системного подхода уступает место нелинейному.

В монографии, на примере ЕАРЛС Российской Федерации исследуется ряд актуальных проблем теории и методологии РЛ систем. Рассмотрены предпосылки создания ЕАРЛС, приведена краткая характеристика послереформенного состояния РЛ системы РТВ, обобщенной структуры и функций ЕС ОрВД на этапе ее преобразования в АНС России. Предложены принципы совершенствования и развития ЕАРЛС как важнейшей составляющей глобальной информационной системы ВКО страны; обоснованы показатели качества, критерии эффективности, информационная и статистическая модели ЕАРЛС.

Значительное внимание уделено применению методологии системного подхода к разработке общетеоретических и методологических аспектов радиолокации как относительно самостоятельной научной дисциплины в радиотехническом дисциплинарном комплексе. В процессе разработки этих науковедческих проблем было выявлено, что радиолокационная наука как некоторая нормативная система с рефлексией представляет собой диалектическое единство двух научных радиолокационных подсистем: а) подсистемы, направленной на выявление и адекватное отражение специфики, сущности и основных закономерностей радиолокационного (энергоинформационного) взаимодействия, основанного на генерировании, излучении и приеме отраженных (переизлученных и/или излученных объектом локации) электромагнитных волн (*теоретическая радиолокация*); б) подсистемы нормативов, методических схем, приемов инженерной (*системотехнической*) деятельности и ее методологии, основанной на закономерностях радиолокационного взаимодействия и направленной на разработку, проектирование и производство РЛ систем (*радиолокационная системотехника*).

Эти подсистемы, сохраняя свою относительную самостоятельность и подчиняясь внутренним системным законам собственного функционирования и развития, оказываются охваченными сложными связями и диалектическими взаимопереходами, при которых радиолокационное *научно-теоретическое знание* в виде логически упорядоченной совокупности радиолокационных понятий и категорий, теоретических фактов, обобщений, законов, следствий и утверждений трансформируется в методологические принципы системотехнической деятельности, а системотехническое знание в форме эмпирических фактов, обобщений, идей и гипотез, снятых в процессе разработки, экспериментальной проверки и доводки новых РЛ систем, технологий или методик, трансформируется в системотехническую основу радиолокационной теории. В некоторых сравнительно простых случаях разработки конкретных РЛ систем оказывается возможным обойтись теоретико-методологическими средствами каждой из представленных подсистем в отдельности. Однако сложные проблемы радиолокационного проектирования, особенно те из них, которые касаются пограничного со-

стояния РЛ систем, могут быть успешно преодолены только на основе системного представления о структуре последней и ее теоретико-методологических возможностях.

К наиболее важным результатам исследования можно отнести обоснование фундаментальной теоретической схемы радиолокационной системотехники, позволившей выявить общие закономерности радиолокационного обнаружения и измерения в условиях существенной априорной неопределенности информативных параметров сигнала относительно параметров внешних помех и неинформативных (мешающих) параметров на основе полных достаточных статистик наиболее распространенных моделей радиолокационных сигналов. Речь идет об основах теории несмещенной, эффективной и состоятельной (достаточной) оценки параметров сигналов в условиях адаптации пространственных и времячастотных характеристик измерительного комплекса к внешним коррелированным помехам, в то время как эта задача до настоящего времени решается только «при отсутствии неинформативных случайных параметров сигналов»,¹²⁸ то есть без учета имеющейся здесь существенной специфики.

Отмеченная специфика связана с тем, что измеряемые параметры радиолокационного сигнала при адаптации измерительного комплекса к соответствующим видам помех принимают энергетический характер: отношение сигнал/(остаток компенсации помехи + шум) становится зависимым от расстояния между целью и источником помех по измеряемому параметру. В этом случае традиционные алгоритмы измерения по максимуму неполной достаточной статистики $\ln \ell = C |Z(t, \alpha)|^2$ или ее производной оказываются смещенными, неэффективными и несостоятельными (недостаточными). Систематическая ошибка возникает за счет:

- искажения ДНА измерителя угловых координат при формировании в ней провалов в направлении на источники активных помех;
- искажения АЧС сигнала при настройке провалов (гребней подавления) АЧХ измерителя доплеровской частоты на гребни спектра пассивной помехи при ее подавлении;
- искажения характеристики дискриминатора системы сопровождения по дальности при подавлении помехи, отличающейся от сигнала временем запаздывания (в частности, при подавлении импульсной помехи, уводящей по дальности);
- искажения пространственно-поляризационных параметров ДНА измерителя при подавлении активной помехи в области главного лепестка методом поляризационной селекции.

¹²⁸ Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М. : Радиотехника, 2003. С. 162.

Неэффективность оценки (рост флуктуационной ошибки) связана с ее недостаточностью, поскольку измерение параметров сигнала на фоне внешних помех предполагает безусловный учет всех элементов достаточной статистики соответствующей модели сигнала.

На основе разработанной концептуальной модели теории обработки радиолокационных сигналов на фоне коррелированных помех различной пространственно-временной структуры проведен синтез и анализ очень выжных для практики оптимальных алгоритмов непрерывной и дискретной оценки корреляционной матрицы помех и ей обратной, а также синтез и анализ адаптивных высокоточных измерителей угловых, времячастотных и поляризационных параметров сигналов.

В целом же проблема повышения точности радиолокационного измерения на фоне помех связана с необходимостью преодоления априорной неопределенности информативных параметров сигнала α относительно параметров активных $\vec{\lambda}_1^A$, пассивных $\vec{\lambda}_1^П$ помех и энергии \mathcal{E}_0 ожидаемого сигнала \vec{Y} .

Системотехнический анализ рассматриваемой проблемы показал, что она может быть решена двумя способами:

а) с помощью неадаптивных алгоритмов, являющихся инвариантными к параметру обстановки $\vec{\lambda} = \left\| \vec{\lambda}_1^A \vec{\lambda}_1^П \right\|$. Такие алгоритмы по показателям качества измерения (систематической и флуктуационной ошибкам) детерминированы ошибками однократной оценки параметра $\vec{\lambda}$;

б) с помощью адаптивных алгоритмов, в которых используется сглаженная оценка параметра $\vec{\lambda}$. Адаптация состоит в том, что по мере накопления однократных оценок параметра обстановки результирующий алгоритм по своим показателям качества приближается к показателям качества алгоритма с известными параметрами обстановки.

При существенном превышении отношением сигнал/(помеха + шум) своего порогового значения неадаптивный и адаптивный алгоритмы измерения имеют примерно одинаковые показатели качества. При приближении отношения сигнал/(помеха + шум) к пороговому значению адаптивный алгоритм измерения обеспечивает существенно более высокую точность оценки параметра относительно неадаптивного. Выигрыш в точности нарастает по мере снижения отношения сигнал/(помеха + шум) и может достигать двух-трех и более раз. Такие эффекты могут проявляться и в многопозиционных РЛ системах (помимо известных преимуществ) при их адаптации к внешним коррелированным помехам.

Таким образом, науковедческие и методологические исследования, проведенные в области теории радиолокационных систем и собственно

радиолокации, представляют не только чисто научный интерес, но и обеспечивают весьма плодотворный выход в конкретную инженерную практику, позволяя весьма эффективно решать сложный комплекс проблем обнаружения радиолокационных сигналов и высокоточного измерения его параметров в условиях воздействия внешних помех.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АЗН	– автоматическое зависимое наблюдение
АМНЗ	– аэропорт международного значения
АМЗ	– аэропорт местного значения
АНС	– аэронавигационная система
АНИ	– аэронавигационная информация
АПЦС	– авиационно-поисковый центр спасания
АРЗ	– аэропорт регионального значения
АРМ	– автоматизированное рабочее место
АСУ	– автоматизированная система управления
АУВД	– автоматизированное управление воздушным движением
АЧС	– амплитудно-частотный спектр
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика
АФЗ	– аэропорт федерального значения
АФАР	– адаптивная антенная решетка
АФР	– амплитудно-фазовое распределение
БВМП	– блок векторно-матричного перемножения
БПЛА	– беспилотный летательный аппарат
БРПЛ	– баллистические ракеты подводных лодок
БСВ	– большие и средние высоты
БСПВ	– блок скалярного произведения векторов
ВД	– воздушное движение
ВВС	– Военно-воздушные силы
ВЗЦ	– вспомогательный зональный центр
ВКН	– воздушно-космическое нападение
ВКАО	– выносной комплекс абонентского оборудования
ВКО	– воздушно-космическая оборона
ВМФ	– Военно-морской флот
ВНС	– высокоточная навигационная система
ВП	– воздушное пространство
ВС	– воздушные суда
ВЧ	– высокая частота
ГА	– гражданская авиация
ГЛОНАСС	– Глобальная навигационная спутниковая система
ДН	– диаграмма направленности
ДНА	– диаграмма направленности антенны
ДХ	– дискриминаторная характеристика
ЕАРЛС	– Единая автоматизированная радиолокационная система

ЕКС	– единая космическая система
ЕНС	– единая навигационная система
ЕС	– единая система
ЕС АКПС	– Единая система авиационно-космического поиска и спасания
ЕС ОрВД	– Единая система организации воздушного движения
ЕС УВД РФ	– Единая система управления воздушным движением Российской Федерации
ЗГО	– загоризонтное обнаружение
ЗИП	– запасное имущество и приборы
ЗРВ	– зенитные ракетные войска
зрдн	– зенитный ракетный дивизион
ЗРК	– зенитный ракетный комплекс
зрп	– зенитный ракетный полк
ЗРС	– зенитные ракетные средства
ЗЦ	– зональный центр
ИА	– истребительная авиация
ИВП	– использование воздушного пространства
ИВП и УВД	– использование воздушного пространства и управление воздушным движением
ИКАО	– международная организация гражданской авиации
ИП	– источник помех
КА	– космический аппарат
КВП	– контроль воздушного пространства
КМ	– корреляционная матрица
КМП	– корреляционная матрица помех
КП	– командный пункт
КПТС	– комплекс программно-технических средств
КР	– крылатые ракеты
КСА	– комплекс средств автоматизации
КС	– космическая система
ЛА	– летательный аппарат
МГА	– Министерство гражданской авиации
МБР	– межконтинентальные баллистические ракеты
МВК	– межведомственная комиссия
МВЛ	– местные воздушные линии
МВП	– местные воздушные перевозки
МО	– Министерство обороны
МП	– многопозиционный
МП РЛ	– многопозиционная радиолокация
МШСС	– многоканальная широкополосная система связи
НРЛКМ	– научная радиолокационная картина мира

ОВД	– обслуживание воздушного движения
ОВП	– организация воздушного пространства
ОИВП	– организация использования воздушного пространства
ОКМП	– обратная корреляционная матрица помех (матрица, обратная корреляционной матрице помех)
ОПВД	– организация потоков воздушного движения
ОПК	– оборонно-промышленный комплекс
ОС	– объединенная система
ОТС	– общая теория систем
ПВО	– противовоздушная оборона
ПИВП	– планирование использования воздушного пространства
ПКО	– противокосмическая оборона
ПОИ	– первичная обработка информации
ПРН	– предупреждение о ракетном нападении
ПРО	– противоракетная оборона
ПУ	– пункт управления
РВСН	– ракетные войска стратегического назначения
РИЦ	– разведывательно-информационный центр
РЛ	– радиолокационные (-ая, -ое)
РЛВ	– радиолокационное вооружение
РЛИ	– радиолокационная информация
РЛК	– радиолокационный комплекс
рлр	– радиолокационная рота
РЛС	– радиолокационная станция
РЛО	– радиолокационное обеспечение
РЛП	– радиолокационное поле
Ртбр	– радиотехническая бригада
ртп	– радиотехнический полк
ртб	– радиотехнический батальон
РТВ	– радиотехнические войска
РТОП	– радиотехническое обеспечение полётов
РЦ	– региональный центр
РЭБ	– радиоэлектронная борьба
РЭП	– радиоэлектронное противодействие
РЭС	– радиоэлектронные средства
РЭТ	– радиоэлектронная техника
САИ	– служба аэронавигационной информации
СВКН	– средства воздушно-космического нападения
СВЧ	– сверхвысокая частота
СИТВ	– система информационно-технического взаимодействия
СКО	– среднеквадратическая ошибка (отклонение)

СРиПВКН	– средства разведки и предупреждения о воздушно-космическом нападении
СРЛ	– средства радиолокации
СРЛО-П «Пароль»	– система государственного радиолокационного опознавания
СРиПВКН	– система разведки и предупреждения о воздушно-космическом нападении
ССОИ	– система совместной обработки информации
СУЛТ	– стабилизация уровня ложных тревог
ТВД	– театр военных действий
ТРЛП ДН	– трассовые радиолокационные позиции двойного назначения
ТТХ	– тактико-технические характеристики
УВД	– управление воздушным движением
ФАР	– фазированная антенная решетка
ФЦП	– федеральная целевая программа
ЦКП	– центральный командный пункт
ЧПАК	– череспериодная автокомпенсация
ШАРУ	– шумовая автоматическая регулировка усиления
ЭМИ	– электромагнитное излучение
ЭПР	– эффективная площадь (поверхность) рассеяния

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Раздел 1. Единая автоматизированная радиолокационная система: основы теории и методологии	13
Глава 1. Теоретико-методологические основания и принципы построения радиолокационных систем.....	14
1.1. Теоретические основания радиолокационных систем.....	14
1.1.1. Технологический компонент теории радиолокационных систем	16
1.1.2. Системотехнический компонент теории радиолокаци- онных систем	27
1.2. Системный подход и проблемы междисциплинарной методологии	39
1.3. Обобщенная структура междисциплинарной методологии.....	42
1.3.1. Основные понятия, принципы и методы исследования операций.....	42
1.3.2. Основные понятия, исходные теоретические положения, методы и принципы системного подхода....	59
1.3.2.1. Основные понятия и исходные теоретические положения (постулаты) системного подхода.....	60
1.3.2.2. Основные методы и принципы системного подхода.....	80
1.3.3. Основы системно-информационного подхода.....	89
1.3.4. Синергетика как теория и методология неравновесных систем	96
1.3.4.1. Краткая характеристика проблемной ситуации в синергетике	96
1.3.4.2. Общая характеристика онтологических оснований синергетики.....	100
1.3.4.3. Стиль синергетического мышления	105
1.3.4.4. Особенности синергетического подхода к проблемам построения, функционирования и развития РЛ систем.....	131
1.4. Междисциплинарный подход и философская методология	136

Глава 2. Единая автоматизированная радиолокационная система страны как новый этап в развитии отечественных радиолокационных систем	140
2.1. Вводные замечания.....	140
2.2. Предпосылки создания ЕАРЛС страны.....	141
2.3. Краткая характеристика радиолокационной системы РТВ.....	147
2.4. Обобщенная структура и функции ЕС ОрВД Российской Федерации	151
2.5. Принципы построения и обобщенная структура ЕАРЛС	170
2.6. Основные принципы и направления развития ЕАРЛС.....	185
2.6.1. Принципы развития ЕАРЛС	185
2.6.2. Основные направления развития ЕАРЛС	189
2.7. ЕАРЛС как конфликтная информационная система с рефлексией	201
2.8. Показатели качества и критерии эффективности ЕАРЛС.....	211
2.9. Информационная и статистическая модели радиолокационной системы.....	215
Раздел 2. Содержание и структура радиолокационной системотехники	235
Глава 3. Радиолокация как научная дисциплина. Структура и функции теории радиолокации	236
3.1. Радиолокация как передовая отрасль радиотехники	236
3.2. Радиолокация как научная дисциплина.....	243
3.2.1. Признаки дисциплинарной организации научного знания	243
3.2.2. Научная рациональность и ее структура.....	245
3.2.3. Обобщенная структура и функции радиолокационной науки	252
3.2.4. Понятие оснований радиолокационной науки	267
3.3. Структура и функции теории радиолокации	276
3.3.1. Обобщенная структура теории радиолокации	276
3.3.2. Фундаментальные теоретические схемы радиолокации и их практические приложения	278
Глава 4. Основы статистической теории радиолокационной системотехники	285
4.1. Общие замечания	285

4.2. Основы статистической теории обнаружения и измерения параметров радиолокационных сигналов на фоне помех	286
4.2.1. Постановка задачи адаптивного обнаружения и измерения. Модели радиолокационных сигналов и помех	286
4.2.2. Общие закономерности обнаружения и измерения параметров радиолокационных сигналов в условиях априорной неопределенности	288
4.3. Достаточные статистики основных моделей радиолокационных сигналов	293
4.4. Основные алгоритмы и устройства адаптации к активным помехам	309
4.4.1. Дискретное и непрерывное оценивание изменяющейся во времени корреляционной матрицы помех	310
4.4.2. Оценивание изменяющейся во времени матрицы, обратной корреляционной матрице помех	314
4.4.3. Алгоритмы и устройства оценивания весового вектора. Применение корреляционной обратной связи в устройствах обработки	315
4.4.4. Переходные процессы при адаптации	320
4.5. Преодоление априорной неопределенности относительно неинформативных параметров сигнала	323
4.5.1. Преодоление априорной неопределенности относительно энергии ожидаемого сигнала	323
4.5.2. Преодоление априорной неопределенности относительно закона распределения амплитуды отраженного сигнала	328
4.6. Примеры слеящего и неслеящего измерения параметров сигнала на фоне активных помех	331
4.6.1. Алгоритмы и устройства адаптивного слеящего измерения углового параметра сигнала	331
4.6.2. Алгоритмы и устройства адаптивного неслеящего измерения углового параметра сигнала	339
4.6.3. Особенности синтеза адаптивного временного дискриминатора	344
4.6.4. Синтез адаптивного измерителя параметров поляризации радиолокационного сигнала	347
4.7. Преодоление априорной неопределенности параметров сигнала относительно параметров пассивных помех	350
4.7.1. Модели сигнала и помех. Когерентная весовая обработка пачки эхо-сигналов	350

4.7.2. Особенности адаптивного измерения доплеровского параметра сигнала на фоне пассивных помех.....	353
4.8. Особенности совместной оценки информативных и неинформативных параметров радиолокационных сигналов в условиях внешних помех.....	357
4.9. Адаптация при большой интенсивности полезного сигнала. Особенности пеленгации источников активных помех	362
4.10. Особенности малобазового приема радиолокационных сигналов в условиях помех.....	369
Заключение.....	379
Принятые сокращения.....	385
Оглавление	389

Научное издание

**Ботов Михаил Иванович
Вяхирев Виктор Александрович
Девотчак Виктор Владимирович**

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Монография

Редактор *Л. И. Вейсова*
Компьютерная верстка: *О. А. Кравченко*

Подписано в печать 24.12.2012. Печать плоская. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 22,9. Тираж 500 экз. Заказ № 57

Издательский центр
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79
Тел./факс (391) 206-21-49, e-mail: rio@lan.krasu.ru

Отпечатано полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел./факс (391) 206-26-67, 206-26-49
E-mail: print_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>