

Справочник
по радиолокации

В 2 книгах

Книга I

Под редакцией
Меррилла И. Сколника

Перевод с английского
под общей редакцией
д.т.н., проф. В.С. Вербы

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2014



*Издание осуществлено при поддержке
открытого акционерного общества
«Концерн радиостроения «Вега»*

УДК 621.396.96

ББК 32.95

C74

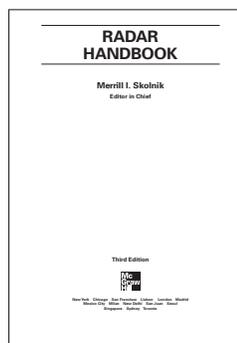
C74 **Справочник по радиолокации / Под ред. М.И. Скольника.
Пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. В 2 книгах. Книга 1**

Москва: Техносфера, 2014. – 672 с., ISBN 978-5-94836-381-3

Это третье издание всемирно известного «Справочника по радиолокации». Радиолокационная техника как для гражданского применения, так и для военных целей продолжает развиваться в направлениях расширения области применения и совершенствовании технологии. Некоторые темы, отраженные в предыдущих изданиях справочника, которые представляют сейчас меньший интерес, были исключены из текущего издания.

Авторы глав, которые являются экспертами в своей предметной области, были ориентированы на читателей, хорошо осведомленных в общем предмете, и даже экспертов в некоторой другой предметной области радиолокации, но не обязательно хорошо разбирающихся в предмете главы, которую писал автор.

Значимость справочника – результат усердия и экспертного мнения авторов, которые потратили свое время, знания и опыт, чтобы сделать это руководство полезной книгой для инженеров-локационщиков и ключевых людей, участвующих в разработке, производстве и эксплуатации радиолокационных систем.



УДК 621.396.96

ББК 32.95

Copyright © 2008 by The McGraw-Hill Companies. All rights reserved.

© 2014, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», перевод, оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-381-3

ISBN 978-0-07-148547-0 (англ.)

СОДЕРЖАНИЕ

О главном редакторе	7
Авторы книги	8
Предисловие редактора перевода	9
Предисловие	11
Глава 1. Введение и краткий обзор принципов радиолокации	13
1.1. Кратко о радиолокации и радиолокаторах	13
1.2. Типы радиолокаторов	17
1.3. Информация, извлекаемая с помощью радиолокаторов	20
1.4. Уравнение дальности действия радиолокатора	23
1.5. Диапазоны рабочих частот и их буквенные обозначения	26
1.6. Влияние рабочей частоты радиолокатора на его характеристики	27
1.7. Номенклатура радиолокаторов США	31
1.8. Основные достижения радиолокации в XX веке	33
1.9. Применения радиолокации	34
1.10. Концептуальный подход к проектированию радиолокаторов	36
Литература	37
Глава 2. Радиолокационные системы СДЦ	38
2.1. Предисловие	38
2.2. Введение в радиолокацию движущихся целей	40
2.3. Реакция фильтров подавления помех на сигналы движущихся целей	47
2.4. Характеристики пассивных помех	48
2.5. Термины и определения	57
2.6. Расчеты коэффициента улучшения	61
2.7. Оптимальное проектирование фильтров подавления помех	63
2.8. Проектирование фильтров для систем СДЦ	71
2.9. Проектирование фильтров для систем СДЦ метео-РЛС	85
2.10. Проектирование наборов доплеровских фильтров	90
2.11. Ухудшения характеристик, связанные с ограничениями в приемнике РЛС	98
2.12. Требования к стабильности параметров РЛС	105
2.13. Динамический диапазон и требования к аналого-цифровому преобразованию	117
2.14. Адаптивные системы СДЦ	120
2.15. Радиолокационные карты помеховой обстановки	123
2.16. Управление скоростной чувствительностью (УСЧ)	127
2.17. Факторы, влияющие на показатели эффективности РЛС СДЦ	131
Литература	140
Глава 3. Радиолокационные системы СДЦ воздушного базирования	143
3.1. Системы, в которых используются технологии СДЦ воздушного базирования	143
3.2. Размышления о зонах покрытия	144
3.3. Факторы, определяющие эксплуатационные качества бортовой РЛС с СДЦ	145

3.4. Воздействие движения платформы и ее высоты на работоспособность РЛС с СДЦ	145
3.5. Компенсация движения платформы на пересекающихся курсах	152
3.6. Компенсация движения при сканировании	156
3.7. Одновременная компенсация движения платформы и сканирования	158
3.8. Компенсация движения платформы, направление вперед	162
3.9. Компенсация движения за счет пространственно-временной адаптации.	164
3.10. Воздействие нескольких спектров	171
3.11. Пример системы СДЦ в РЛС воздушного базирования	173
Литература	174
Глава 4. Импульсно-доплеровская радиолокационная станция	175
4.1. Характеристики и применения	175
4.2. Пассивные помехи импульсно-доплеровским РЛС.	189
4.3. Требования к динамическому диапазону и стабильности	199
4.4. Раскрытие неоднозначности по дальности и по доплеровской частоте	207
4.5. Проектирование режима и сигнала	212
4.6. Анализ уравнения дальности РЛС	215
Литература	224
Глава 5. Многофункциональные РЛС для истребителей	228
5.1. Введение	228
5.2. Типичные боевые задачи и режимы.	239
5.3. Описание режимов и сигналов при решении задач «воздух — воздух»	247
5.4. Описание режима «воздух — земля» и сигналов.	261
Литература	278
Глава 6. Радиолокационные приемники	282
6.1. Структурная схема радиолокационного приемника	282
6.2. Соображения, касающиеся шума и динамического диапазона	285
6.3. Соображения, касающиеся ширины полосы частот	292
6.4. ВЧ-тракт приемника	294
6.5. Гетеродины	298
6.6. Регулировка усиления	306
6.7. Фильтрация.	309
6.8. Ограничители	314
6.9. Синфазно-квадратурные демодуляторы	316
6.10. Аналого-цифровые преобразователи	320
6.11. Цифровые приемники.	325
6.12. Дуплексный режим работы	331
6.13. Формирование сигнала и повышающее преобразование частоты	332
Литература	336
Глава 7. Автоматическое обнаружение, сопровождение целей и объединение информации	337
7.1. Введение	337
7.2. Автоматическое обнаружение	337
7.3. Автоматическое сопровождение целей	357
7.4. Система РЛС	383
7.5. Объединение неоднородных датчиков	386
Литература	390

Глава 8. РЛС со сжатием импульсов	394
8.1. Введение	394
8.2. Типы сложных сигналов	395
8.3. Факторы, влияющие на выбор систем сжатия импульсов	419
8.4. Реализация систем сжатия импульсов и примеры РЛС	420
Приложение	430
Литература	434
Глава 9. РЛС сопровождения	439
9.1. Введение	439
9.2. Моноимпульсные РЛС (одновременное формирование равносигнального направления)	441
9.3. Сканирование и пеленгация с использованием равносигнального метода	455
9.4. Следящие системы РЛС сопровождения	456
9.5. Обнаружение и захват цели, сопровождение по дальности	459
9.6. Специальные моноимпульсные технологии	464
9.7. Источники ошибки	466
9.8. Ошибки, вызванные целью (шум цели)	466
9.9. Другие внешние причины ошибки	478
9.10. Внутренние источники ошибки	481
9.11. Общие сведения об источниках ошибок	483
9.12. Технологии уменьшения ошибок	487
Литература	488
Глава 10. Радиолокационный передатчик	491
10.1. Введение	491
10.2. Усилители с линейным пучком	494
10.3. Магнетрон	503
10.4. Усилитель со скрещенными полями	505
10.5. Гиротроны	506
10.6. Контроль спектра передатчика	508
10.7. Лампы с сеточным управлением	510
10.8. Модуляторы	512
10.9. Какой источник СВЧ-мощности использовать?	514
Литература	517
Глава 11. Твердотельные передатчики	520
11.1. Введение	520
11.2. Преимущества твердотельных устройств	520
11.3. Твердотельные устройства	524
11.4. Проектирование полупроводниковых корпусированных передатчиков	537
11.5. Проектирование твердотельных передатчиков для фазированных антенных решеток	543
11.6. Примеры твердотельных систем	550
Литература	554
Глава 12. Зеркальные антенны	556
12.1. Введение	556
12.2. Основные принципы проектирования и параметры	557

12.3. Архитектуры зеркальных антенн	571
12.4. Облучатели зеркальных антенн	580
12.5. Анализ параметров и характеристик зеркальной антенны	586
12.6. Механические соображения при проектировании	591
Литература	597
Глава 13. Фазированные антенные решетки РЛС	600
13.1. Введение	600
13.2. Теоретические основы работы фазированных антенных решеток	608
13.3. Плоские решетки и управление лучом	613
13.4. Согласование и взаимные связи в фазированных антенных решетках. . .	617
13.5. Фазированные антенные решетки с низким уровнем боковых лепестков	625
13.6. Влияние ошибок квантования	631
13.7. Широкополосность фазированных антенных решеток	635
13.8. Системы питания (формирователи луча)	643
13.9. Фазовращатели	648
13.10. Твердотельные модули	650
13.11. Формирование многолучевой диаграммы направленности в режиме приема	652
13.12. Цифровое формирование луча	653
13.13. Формирование нуля диаграммы направленности на излучение.	655
13.14. Калибровка возбужденных фазированных антенных решеток	657
13.15. Примеры фазированных антенных решеток	659
Литература	667

О ГЛАВНОМ РЕДАКТОРЕ

Меррил Сколник работал руководителем радиолокационного отдела в научно-исследовательской лаборатории ВМС США более 30 лет. Перед этим он занимался радиолокационной тематикой в Линкольновской лаборатории Массачусетского технологического института, в Институте оборонных исследований и в исследовательском отделе компании Electronic Communications (США). Он является автором популярного руководства *Introduction to Radar Systems*, опубликованного издательством McGraw-Hill тремя изданиями (русский перевод первого издания — «Введение в технику радиолокационных систем», издательство «Мир», 1965), редактором книги *Radar Applications* издательства IEEE Press и бывшим редактором журнала *Proceedings of the IEEE* (русское издание — «Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике»). М. Сколнику присвоена докторская степень в области инженерных наук в университете имени Джона Хопкинса, где он ранее получил квалификации бакалавра и магистра по электротехнике. Он является членом американской Национальной академии инженерных наук, действительным членом (Fellow) IEEE и первым лауреатом почетной медали Д.Дж. Пикарда за достижения в области радиолокации, учрежденной IEEE.

АВТОРЫ КНИГИ

- Джеймс Дж. Олтер, научно-исследовательская лаборатория ВМС США (глава 25)
- Стюарт Дж. Андерсон, Австралийская организация оборонной науки и техники (глава 20)
- У.Г. Бат, лаборатория прикладной физики университета Джона Хопкинса (глава 7)
- Майкл Т. Борковский, Raytheon Company (глава 11)
- Джеффри О. Коулман, научно-исследовательская лаборатория ВМС США (глава 25)
- Майкл Э. Кули, Electronic Systems Northrop Grumman Corporation (глава 12)
- Дэвид Дэниелс, компания ERA Technologies (глава 21)
- Даниэль Дэвис, Electronic Systems Northrop Grumman Corporation (глава 12)
- Джеймс К. Дей, корпорация Lockheed Martin (глава 3)
- Майкл Р. Дьюков, Lockheed Martin MS 2 (глава 8)
- Альфонсо Фарина, анализ интегральных систем, SELEX Sistemi Integrati (глава 24)
- Уильям Г. Федарко, Northrop Grumman Corporation (глава 4)
- Джо Фрэнк, лаборатория прикладной физики университета Джона Хопкинса (глава 13)
- Вилхелм Греджерс-Хансен, научно-исследовательская лаборатория ВМС США (глава 2)
- Джеймс М Хэдрик, научно-исследовательская лаборатория ВМС США (глава 20)
- Дин Д. Ховард, консультант ITT Industries, Inc. (глава 9)
- Р.Дж. Килер, Национальный центр атмосферных исследований (глава 19)
- Юджин Ф. Нотт, компания Tomorrow's Research, США (глава 14)
- Карло Копп, Monash University (глава 5)
- Дэвид Линч-младший, DL Sciences, Inc. (глава 5)
- Ричард К Мур, Канзасский университет (глава 16)
- Энди Норрис, компания Navigation Systems (глава 22)
- Уэйн Л. Паттерсон, Центр космических и морских боевых систем, отдел распространения излучения в атмосфере (глава 26)
- Р. Кейт Рени, лаборатория прикладной физики университета Джона Хопкинса (глава 18)
- Джон Д. Ричардс, лаборатория прикладной физики университета Джона Хопкина (глава 13)
- Р.Дж. Серафин, Национальный центр атмосферных исследований (глава 19)
- Уильям В. Шрэдер, Shrader Associates, Inc. (глава 2)
- Меррилл Сколник (главы 1 и 10)
- Фред М. Штаудаер, научно-исследовательская лаборатория ВМС США (глава 3)
- Джон П. Стролка, Northrop Grumman Corporation (глава 4)
- Роджер Салливан, Institute for Defense Analyses, США (глава 17)
- Байрон У. Тайтджен, Lockheed Martin MS 2 (глава 8)
- Г.В. Транк, лаборатория прикладной физики университета Джона Хопкинса (глава 7)
- Томас А. Вейл (глава 10)
- Льюис Б. Ветцель, научно-исследовательская лаборатория ВМС США (глава 15)
- Николас Дж. Уиллис, корпорация Technology Service (глава 23)
- Майкл Э. Йоманс, Raytheon Company (глава 6)

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Уважаемые читатели!

Вашему вниманию предлагается новое издание «Справочника по радиолокации», подготовленное группой американских ученых и инженеров-практиков под общей редакцией широко известного ученого в области радиолокации Меррилла Скольника.

ОАО «Концерн «Вега» взял на себя нелегкий труд по организации издания русской версии данного справочника, который увидел свет благодаря продолжительному и плодотворному труду большого коллектива сотрудников издательства «ТЕХНОСФЕРА», переводчиков и редакторов, в роли которых выступили главным образом ученые концерна.

Решение о переводе на русский язык «Справочника по радиолокации» в концерне возникло ввиду следующих причин.

Во-первых, концерн «Вега» является головным предприятием в Российской Федерации по ряду приоритетных направлений создания сложных технических систем специального и гражданского назначения, а радиолокация, безусловно, является одной из центральных областей научных интересов и знаний предприятия в решении данных задач. Руководство концерна заинтересовано, чтобы его сотрудники, и особенно, молодое поколение при выполнении стоящих перед ними задач могли опираться на знания в данной предметной области, полученные не только отечественными учеными и разработчиками, но и их иностранными коллегами.

Во-вторых, в последнее время снизился информационный поток переводной литературы, посвященной радиотехнической тематике, в том числе и радиолокационной, поэтому хотелось несколько расширить объем научных знаний, поступающих от известных иностранных специалистов в области радиолокации.

В-третьих, предыдущее издание «Справочника по радиолокации» под редакцией М. Скольника получило широкую известность у российских инженеров и ученых, занимающихся вопросами разработки радиолокационных систем. Его по праву можно отнести к одной из лучших книг по радиолокации XX века. Он был настольной книгой у нескольких поколений радиоинженеров, в том числе и у участников издания данной русской версии. Однако с момента выхода предыдущего издания прошло уже более 20 лет, а теория и практика радиолокации шагнули далеко вперед.

В-четвертых, в 2014 году исполняется 10 лет концерну и 70 лет его головному предприятию (ЦКБ-17, НИИ-17, МНИИП). Приближаясь к этим знаменательным датам, ученые и инженеры концерна хотели бы преподнести в подарок радиотехническому научному сообществу новую версию «Справочника по радиолокации». Выпуск этой книги станет нашим вкладом в популяризацию технических знаний и будет способствовать привлечению в интересную и перспективную научную область радиотехники более широкого круга молодых научных работников и инженеров. В справочнике в сжатой форме изложены основные методы и подходы, существующие в радиолокации, особенности построения и возможности радиолокационных систем различного назначения, а также отражены тенденции развития радиолокационных систем.

Произошедшие изменения в теории и технике радиолокации за более чем 20-летний период нашли свое отражение в справочнике в виде новых глав (по отношению к предыдущему изданию) и в корректировке содержательной части материала ранее существующих глав.

В то же время развитие радиолокации, как и любой области науки и техники, не происходит изолированно благодаря усилиям какой-либо одной группы ученых и инженеров-разработчиков. Достаточно быстро и интенсивно данная область радиотехники развивалась и продолжает развиваться в нашей стране. Причем отцом радиолокации с полным основанием можно считать нашего соотечественника — русского физика, электротехника, изобретателя радио Попова Александра Степановича, который летом 1897 года открыл эффект отражения радиоволн, проводя в

Финском заливе практический опыт по организации электросвязи без проводов между двумя кораблями. Его открытие послужило толчком к возникновению радиолокации и превращению ее в одну из динамично развивающихся областей науки и техники. Благодаря усилиям отечественных ученых-практиков, таких как действительные члены АН СССР А.И. Берг, А.Ф. Богомоллов, Б.В. Бункин, Ю.Б. Кобзарев, В.А. Котельников, А.А. Расплетин, члены-корреспонденты АН СССР В.В. Тихомиров, А.А. Пистолькорс, действительные члены РАН Ю.В. Гуляев, И.Б. Федоров, члены-корреспонденты РАН Л.Д. Бахрах, А.П. Реутов, М.С. Рязанский и др., в нашей стране сегодня существует богатая информационная база по теоретическим основам, характеристикам объектов радиолокационного наблюдения, принципам построения, режимам работы радиолокационных систем, вопросам обработки радиолокационных сигналов, особенностям конструирования элементов данных систем. Данные аспекты радиолокационной теории и практики продолжают развиваться и сегодня, опираясь на новые знания и возможности информационных технологий, развитие элементной базы собственно РЛС и систем обработки сигналов, принципов построения антенной техники и ее элементной базы. Как правило, данные знания оформляются в виде книг, монографий, статей, учебников и учебных пособий, а также в электронной форме и представляют большой интерес для специалистов, научных работников, молодых сотрудников и будущих исследователей, интересующихся областью радиолокации. В то же время данная совокупность знаний интересна инженерам-разработчикам радиолокационных систем, поскольку они могут использовать эти знания при разработке и конструировании современных и перспективных систем. Для ученых и инженеров-разработчиков, работающих в области радиолокации, интересны и знания, которые формируются в сжатом, сконцентрированном виде как единый информационный источник — в форме справочника. Наиболее популярными в данном научно-техническом сообществе среди советских и российских изданий были и остаются «Справочник по радиоэлектронике» под редакцией А.А. Куликовского (М., «Энергия», 1969), справочная серия по радиоэлектронике под общей редакцией А.А. Куликовского в 7 томах (М., «Энергия», 1977—1979) и справочник «Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория» под редакцией Я.Д. Ширмана (М., «Радиотехника», 2007).

Необходимо заметить, что несмотря на популярность справочника, подготовленного группой специалистов американской школы радиолокации, он, тем не менее, является одним из тех источников, которыми пользуются инженеры, разработчики и ученые, работающие в предметной области радиолокации. В этой связи не менее популярны издания по радиолокационной тематике советской и российской школы радиолокации, авторами которых являются П.А. Бакут, П.А. Бакулев, Р.П. Григорин-Рябов, В.Е. Дулевич, П.И. Дудник, Ю.Б. Кобзарев, Г.С. Кондратенков, С.З. Кузьмин, М.В. Максимов., В.Н. Манжос, А.П. Реутов, В.А. Сарычев, Ю.Г. Сосулин, К.Н. Трофимов, И.Б. Федоров, М.И. Финкельштейн, Я.Д. Ширман.

Перевод на русский язык Справочника выполнили: к.т.н. А.В. Бруханский (гл. 1, 2), Ю.Л. Цвирко (гл. 3—9), Е.Б. Махиянова (гл. 10—18), А.И. Демьяников (гл. 19—26) при активном участии д.т.н. С.М. Смольского, а его научное редактирование провели д.т.н., профессор В.С. Верба (гл.1, 8), д.т.н., профессор А.Р. Ильчук (гл. 3, 4, 26), д.т.н. К.Ю. Гаврилов (гл. 11—13, 15, 16, 18, 20—23), к.т.н., доцент Д.Д. Дмитриев (гл. 7), д.т.н., профессор Б.Г. Татарский (гл. 2, 5, 6, 9, 10, 14, 17, 19), к.т.н., с.н.с. А.Г. Тетеруков (гл. 24), к.т.н. А.А. Филатов (гл. 25). Общая научная редакция справочника выполнена д.т.н., профессором В.С. Вербой.

Выражаю всем членам творческого коллектива искреннюю благодарность за проделанную важную работу и надеюсь, что данный справочник займет достойное место на столе у инженеров, разработчиков и ученых, занимающихся проектированием, исследованием и созданием радиолокационных систем.

*Научный редактор справочника,
генеральный директор — генеральный конструктор
ОАО «Концерн «Вега»,
доктор технических наук, профессор В.С. Верба*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Радиолокатор — яркий пример сложной радиоэлектронной системы. В университетских программах электротехнических специальностей обычно делается акцент на основные инструменты инженера, такие как схемотехника, теория сигналов, физика твердого тела, цифровая обработка, электронные приборы, электромагнитное поле, автоматическое регулирование, микроволновая техника и т.д. Но в реальном мире электротехники и электроники эти инструменты — только отдельные части и подсистемы более крупной системы, которая создается для получения полезной информации. В дополнение к радиолокационным системам и другим системам извлечения информации (сенсорам) радиоэлектронные системы включают системы коммуникации, управления, энергетические системы, системы обработки информации, промышленную электронику, военную технику, радионавигацию, потребительскую электронику, медицинское оборудование и др. Они-то и составляют сферу современной электроники. Без них потребность в инженерах соответствующего профиля была бы очень ограничена. Однако практический инженер, занятый в разработке и производстве электронных систем нового типа, зачастую оказывается зависимым от знаний, которые не входили в программу его или ее технической подготовки. Инженер-локационный, например, должен глубоко понимать работу крупных узлов РЛС и ее подсистем, а также знать, как они взаимодействуют друг с другом. Настоящее издание «Справочника по радиолокации» должно помочь в решении этой задачи. Кроме разработчиков радиолокационных систем справочник будет полезен тем, кто отвечает за развертывание новых радиолокационных систем, инженерам, занятым в эксплуатации РЛС, руководителям инженерных подразделений.

Третье издание «Справочника по радиолокации» — свидетельство тому, что радиолокационная техника как для гражданского использования, так и для военных целей продолжает развиваться в направлении расширения области применения и в совершенствовании технологии. Перечислим некоторые из многих достижений радиолокации, появившиеся начиная с момента выхода предыдущего издания справочника:

- широкое применение цифровых методов для эффективной обработки сигналов и радиолокационных данных, принятия решений, гибкого автоматизированного управления РЛС и расширения ее многофункциональности;
- доплеровские метеорологические РЛС;
- бортовые системы с селекцией наземных движущихся целей (СНДЦ, GMTI — Ground Moving Target Indicator Radar);
- обширная экспериментальная база данных, относящаяся к оценкам отражений от поверхности при малых углах падения сигнала, полученная Линкольновской лабораторией МТИ. Эти данные пришли на смену модели отражений, восходящей ко времени Второй мировой войны;
- подтверждение того, что микроволновому сигналу, отраженному от морской поверхности, при скользящем падении присущи эффекты, называемые «морскими шипами»;
- активные радиолокационные электронно-сканирующие антенные решетки (АФАР, AESA — Active Electronically Scanned Arrays), использующие твердотельные модули, также называемые активными решетками с электронным сканированием, привлекательные возможностью управления мощностью излучения в окружающем пространстве и легкостью сканирования;
- исследование планет с помощью радиолокации;
- компьютерные методы моделирования и расчета рабочих характеристик РЛС с учетом реальных условий распространения сигнала в окружающей среде;
- практическое использование загоризонтных РЛС декаметрового диапазона;
- усовершенствованные методы СДЦ, включающие адаптивную пространственно-временную обработку;
- практическое использование РЛС с инверсной синтезированной апертурой для распознавания целей;

- интерферометрические РЛС с синтезированной апертурой (ИнРСА, InSAR — Interferometric Synthetic Aperture Radar), используемые для оценки высоты наземных отражателей, для выделения движущихся наземных целей и получения трехмерных радиолокационных изображений поверхности;
- достижение высокой точности радиолокационных высотометров космического базирования, позволяющих оценить форму геоида Земли с точностью до нескольких сантиметров;
- сверхширокополосные радиолокаторы для подповерхностного зондирования Земли и других приложений;
- повышение мощности широкополосных клистронов, основанных на групповых (пространственно-развитых) объемных резонаторах, и многолучевых клистронов;
- появление полупроводниковых приборов с широкой запрещенной зоной, которые позволяют получить большую мощность и работают при более высоких температурах;
- доступность мощных генераторов миллиметровых волн, основанных на применении гироклистронов;
- нелинейная ЧМ (FM — Frequency Modulated) зондирующих импульсов, позволяющая получить сжатый сигнал с низким уровнем боковых лепестков;
- замена компьютером оператора РЛС как субъекта выделения информации и лица, принимающего решения.

Вышеупомянутые достижения перечислены в произвольном порядке, и при этом нельзя считать данный список полным перечислением достижений радиолокации с момента появления предыдущего издания. Некоторые темы, отраженные в предыдущих изданиях *справочника*, которые представляют сейчас меньший интерес, были исключены из текущего издания.

Авторы глав, являющиеся экспертами в своей частной области, были ориентированы на читателей, хорошо осведомленных в общем предмете, и даже экспертов в некоторой другой частной области радиолокации, но необязательно хорошо разбирающихся в предмете главы, которую писал автор.

Следовало ожидать, что по прошествии времени после выхода в свет *«Справочника по радиолокации»* не все авторы глав предыдущих изданий оказались доступны для участия в подготовке третьего издания. Многие из авторов предыдущих изданий ушли в отставку или больше не с нами. Авторы и соавторы шестнадцати из двадцати шести глав этого издания не участвовали в подготовке предыдущих изданий.

Тяжелая работа по написанию этих глав была проделана опытными авторами, являющимися экспертами в своей области. Таким образом, значимость *«Справочника по радиолокации»* — результат усердия и экспертного мнения авторов, которые потратили свое время, знания и опыт, чтобы сделать это руководство полезной книгой для инженеров-локационщиков и всех тех людей, деятельность которых является жизненно важной для разработки, производства и эксплуатации радиолокационных систем. Я глубоко благодарен всем авторам за их тщательную работу и долгие часы, которые они посвятили выполнению своей задачи. Это авторы, которые делают успешным любое издание. Моя искренняя благодарность им всем.

Как упоминается в предисловии к предыдущему изданию, читателей, желающих сделать ссылку или процитировать материал из *справочника*, просим указывать фамилии авторов именно тех глав, на которые выполняется ссылка.

Меррилл Сколник
Балтимор, Мэриленд

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ И КРАТКИЙ ОБЗОР ПРИНЦИПОВ РАДИОЛОКАЦИИ*

Меррил Сколник

1.1. Кратко о радиолокации и радиолокаторах

Радиолокатор (радар, радиолокационная станция, РЛС) — электромагнитный информационный датчик, предназначенный для обнаружения и определения координат и параметров движения отражающих объектов. Его функционирование может быть описано следующим образом.

- Радиолокатор формирует зондирующий сигнал, который с помощью антенны преобразуется в электромагнитную волну и излучается в пространство.
- Часть излученной энергии ЭМВ попадает на объект, расположенный на некотором расстоянии от радиолокатора и обычно называемый *целью*.
- Энергия, перехваченная объектом, переизлучается по многим направлениям, в том числе и в направлении на радиолокатор.
- Переизлученная часть энергии (отраженного сигнала) в направлении на радиолокатор принимается антенной радиолокатора, которая преобразует принятую ЭМВ в электрический сигнал.
- После усиления в приемнике и соответствующей обработки сигналов выносятся решение о том, присутствует ли сигнал, отраженный от цели, на выходе приемника. В последнем случае определяются координаты цели и может быть извлечена другая информация о ней.

Обычная форма сигнала, излучаемого РЛС, — последовательность относительно узких, почти прямоугольных радиоимпульсов. Примером зондирующего сигнала для РЛС средней дальности действия, предназначенной для обнаружения самолетов, является серия коротких радиоимпульсов продолжительностью одна микросекунда (1 мкс) с периодом следования одна миллисекунда (1 мс), что соответствует частоте повторения 1 кГц; пиковая мощность передатчика РЛС может составить, к примеру, один миллион ватт (1 МВт). С этими значениями средняя мощность излучения составляет один киловатт. Средняя мощность 1 кВт — это меньше, чем мощность электрического освещения типовой учебной аудитории. Предположим для примера, что эта РЛС может работать в середине микроволнового[†] частотного диапазона в полосе частот от 2,7 до 2,9 ГГц, которая является типичной для гражданских обзорных РЛС аэропортов. Ее длина волны может составить приблизительно 10 см (округлено для простоты). С подходящей антенной такой радиолокатор может обнаружить самолет на дальности¹ 50–60 морских

* Эта глава — краткий обзор радиолокации для не слишком знакомых с предметом. Более подготовленным читателям она поможет освежить свои знания.

[†] Микроволны примерно определены как те частоты, на которых в качестве линий передачи используются волноводы, и где роль резонансных контуров выполняют объемные резонаторы или цепи с распределенными параметрами, а не компоненты с сосредоточенными характеристиками. Микроволновые радиолокаторы могли бы работать в диапазоне от 400 МГц до 40 ГГц, но эти пределы приблизительно.

¹ В радиолокации под дальностью в общем случае понимается расстояние от радиолокатора до цели, в то же время в радиолокации под дальностью обнаружения понимается максимальное удаление цели от РЛС, при котором она обнаруживается с заданными показателями качества (с требуемой вероятностью правильного обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги). — *Прим. ред.*

миль (93—111 км) и, возможно, несколько больше или меньше. Мощность сигнала, отраженного от цели, принимаемая радиолокатором, может изменяться в очень широком диапазоне значений, но мы произвольно, в иллюстративных целях полагаем, что мощность типичного отраженного сигнала может составить 10^{-13} ватт. Если мощность излучения составляет 10^6 ватт (один мегаватт), то отношение мощности отраженного сигнала к мощности передатчика РЛС в этом примере составляет 10^{-19} , то есть отраженный сигнал на 190 дБ меньше по мощности, чем излученный сигнал. Это реальная разница между величиной излученного сигнала и принимаемым отраженным сигналом.

Некоторые радиолокаторы должны обнаруживать цели на дальностях, столь же коротких, как размеры бейсбольной площадки (чтобы измерить скорость мяча при подаче), в то время как другие радиолокаторы должны работать на дальностях, столь же больших, как расстояния до ближайших планет. В соответствии с назначением радиолокатор может быть как малым, чтобы помещаться в ладони, так и большим, чтобы занимать пространство нескольких футбольных полей.

Радиолокационными целями могут быть самолеты, суда или ракеты, но в качестве целей РЛС могут рассматриваться также люди, птицы, насекомые, атмосферные осадки, турбулентности ясного неба, ионизированные среды, особенности земной поверхности (растительность, горы, дороги, реки, аэродромы, здания, ограждения и столбы линий электропередачи), море, лед, айсберги, буи, подземные объекты, метеоры, полярное сияние, космические корабли и планеты. В дополнение к измерению дальности и углового положения цели РЛС может также измерять относительную скорость цели, вычисляя скорость изменения расстояния либо извлекая информацию о радиальной скорости из доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала. Если координаты движущейся цели измеряются на протяжении некоторого периода времени, то может быть определена траектория ее движения и, как следствие, вычислены абсолютная скорость цели, направление ее движения и сделан прогноз относительно ее будущего положения. Специальным образом сконструированные РЛС могут определить размер и форму цели и даже отличить один тип или класс цели от другого.

Основные части радиолокатора. Рис. 1.1 представляет собой упрощенную структурную схему РЛС, на которой показаны подсистемы, обычно присутствующие в ее составе. *Передатчик*, который показан здесь как усилитель мощности, генерирует радиосигнал определенной частоты и модуляции в соответствии с назначением РЛС, который именуют зондирующим сигналом. Средняя мощность этого сигнала может быть как малой, т.е. лежать в пределах милливатт, так и большой, т.е. лежать в пределах мегаватт. Средняя мощность излучаемого сигнала — более достоверный показатель рабочих характеристик радиолокатора, чем его пиковая мощность. Большинство радиолокаторов использует сигнал в виде коротких

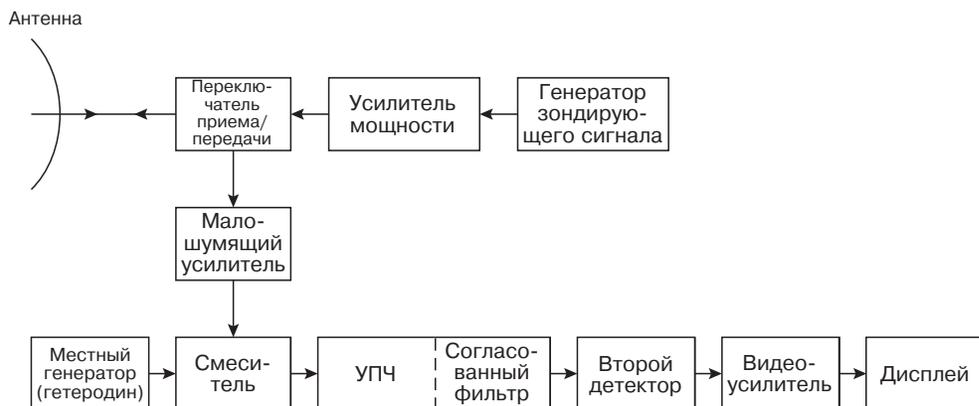


Рис. 1.1. Структура простого радиолокатора, использующего усилитель мощности в качестве передатчика, в верхней части схемы и супергетеродинный приемник в ее нижней части

импульсов, таким образом, единственная антенна может использоваться в режиме разделения времени и для передачи, и для приема.

Переключатель приема/передачи позволяет единственной антенне работать как на передачу, предохраняя от повреждения чувствительный приемник во время генерации импульса передатчиком, так и на прием, направляя полученный отраженный сигнал к приемнику, а не к передатчику.

Антенна — устройство, позволяющее электромагнитной энергии зондирующего сигнала распространяться в пространстве и собирающее энергию отраженного сигнала на вход приемника. Это почти всегда узконаправленная антенна, то есть такая, которая концентрирует излучаемую энергию в узком луче, чтобы увеличить плотность потока мощности, а также позволяет решить задачу точного определения направления на цель. Антенна, имеющая узкий направленный луч на передачу, обычно имеет большую площадь на прием, чтобы собирать энергию слабых отраженных сигналов цели с большей площади. Антенна не только концентрирует энергию при передаче и собирает энергию отраженного сигнала при приеме, но также действует как пространственный фильтр, обеспечивающий угловое разрешение и другие возможности.

Приемник усиливает слабый принятый сигнал до уровня, который обеспечивает его обнаружение. Наличие шума — принципиальное ограничение способности РЛС принять достоверное решение об обнаружении цели и возможности извлечь информацию о ней, поэтому требуется обеспечить малый уровень собственного шума приемника. На микроволновых частотах, где работает большинство РЛС, источником шума, воздействующего на рабочие характеристики радиолокатора, обычно являются первые каскады приемника, обозначенные на рис. 1.1 как *малошумящий усилитель*. Для многих радиолокационных приложений, где способность обнаружения ограничена *мешающими отражениями* от окружающей среды (называемыми также *пассивной помехой*), приемник должен иметь достаточно большой динамический диапазон, чтобы избежать подавления слабых сигналов движущихся целей сильной помехой, вызывающей насыщение усилительных каскадов. *Динамический диапазон* приемника, обычно выражаемый в децибелах, определяется [1] как отношение максимальной и минимальной мощностей входного сигнала, при которых приемник может обеспечить требуемые рабочие характеристики. Максимальный уровень сигнала ограничивается допустимыми нелинейными эффектами в приемнике (например величиной мощности сигнала, при которой характеристика усиления приемника начинает отличаться от линейной), а за минимальную мощность можно принять мощность самого слабого обнаруживаемого сигнала. *Процессор сигналов*, в качестве которого часто рассматривают часть приемного тракта, работающего на промежуточной частоте, можно описать как устройство, которое отделяет полезный сигнал от нежелательных сигналов, способных осложнить процесс обнаружения. Сигнальная обработка включает *согласованный фильтр*, который максимизирует отношение сигнал/шум на своем выходе. Сигнальная обработка также включает обработку доплеровских сигналов, которая максимизирует отношение сигнал/помеха для сигналов движущихся целей, когда уровень пассивных помех больше, чем шум приемника. Это позволяет отделить одну движущуюся цель от других движущихся целей и от пассивных помех. *Решение об обнаружении* принимается на выходе приемника: цель считается обнаруженной, когда сигнал на выходе приемника превышает заранее установленный порог. Если порог установлен слишком низко, шум приемника может вызвать частые ложные срабатывания. Если порог установлен слишком высоко, то некоторые цели, которые могли бы быть обнаружены, оказываются пропущенными. Критерием установки порога на определенный уровень может быть требование допустимой частоты ложных тревог, вызванных собственным шумом приемника.

После того как решение об обнаружении принято и измерены координаты цели, может быть определена траектория ее движения, состоящая из совокупности измерений координат в течение некоторого времени. Определение траектории — это пример *обработки радиолокационных данных*. Обработанная информация об обнаружении цели или ее траектории может быть показана оператору РЛС, или может быть использована для автоматического наведения ракеты на цель, или же далее обработана, чтобы получить другую, более детальную информацию о характеристиках цели. *Подсистема управления радиолокатором* обеспечивает совместную

работу его различных частей и гарантирует их координацию, например, подавая синхронизирующие сигналы к различным частям РЛС в соответствии с требованиями.

Инженер — разработчик РЛС оперирует следующими ресурсами: *временным интервалом приема сигналов*, который должен обеспечить хорошую спектральную обработку принимаемых сигналов, *шириной спектра сигнала*, необходимой для высокой разрешающей способности по дальности, *пространственным объемом*, от которого зависят допустимые размеры антенны, и *мощностью излучения* для обеспечения необходимой дальности действия и точных измерений. Внешние факторы, воздействующие на рабочие характеристики РЛС, включают *характеристики самой цели*, *внешний шум*, принимаемый антенной, *мешающие отражения* от земли, моря, птиц и дождя, *интерференцию* с другими источниками электромагнитного излучения и *эффекты распространения* сигнала, связанные с земной поверхностью и состоянием атмосферы. Эти факторы упомянуты с целью подчеркнуть их значение в процессе проектирования и использования РЛС.

Радиолокационные передатчики. Передатчик РЛС должен не только обеспечить достаточную пиковую и среднюю мощности, требуемые для обнаружения цели на максимальной дальности, но также генерировать сигнал с требуемой формой и стабильностью, необходимыми для решения специфических задач. Передатчики могут использовать генераторы или усилители мощности на выходе, но последние обычно предпочтительны, так как имеют определенные преимущества.

Существует много типов источников высокочастотной мощности, используемых в радиолокаторах (см. гл. 10). Магнетрон как генератор мощности был когда-то очень популярен, но сейчас он редко используется, за исключением гражданских морских РЛС (см. гл. 22). Ввиду относительно низкой средней мощности (один-два киловатта) и недостаточной стабильности частоты магнетроны уступают другим источникам СВЧ-мощности, используемым в РЛС для обнаружения небольших движущихся целей на большой дальности при наличии сильных мешающих отражений. Магнетронный генератор мощности — пример устройств, называемых *приборами со скрещенными полями*. Есть также родственный ему *усилитель со скрещенными полями* (CFA — Crossed-Field Amplifier), который использовался в некоторых радиолокаторах в прошлом, но он также страдает наличием ограничений для важных радиолокационных применений и особенно в РЛС для обнаружения движущихся целей при наличии пассивных помех. Мощный клистрон и лампа бегущей волны (ЛБВ) являются примерами *СВЧ-приборов с продольной группировкой электронов*. При большой выходной мощности, часто требуемой радиолокаторами, эти оба последних типа приборов имеют широкие полосы пропускания и высокую стабильность, необходимую для обработки доплеровских сигналов, благодаря чему они стали популярны.

Полупроводниковые усилители мощности, такие как транзисторные, также используются в радиолокаторах, особенно в их фазированных антенных решетках. Хотя у одного транзистора относительно небольшая мощность, каждый из многочисленных антенных излучающих элементов антенной решетки может использовать множество транзисторов, чтобы получить большую мощность, необходимую для многих радиолокационных приложений. При использовании твердотельных транзисторных усилителей разработчик РЛС должен быть в состоянии обеспечить работу в высоконагруженном режиме, режиме работы длинными импульсами, предполагающем сжатие сигналов, и в режиме работы с импульсами разной длительности, позволяющем осуществлять обнаружение как на малых, так и на больших дальностях. Таким образом, использование передатчиков на твердотельных приборах может оказать влияние на другие части радиолокационной системы. В миллиметровом диапазоне волн очень большая мощность может быть получена с помощью гиротронов, используемых как усилитель или генератор. *Электровакuumные приборы с сеточным управлением* в течение долгого времени были востребованы в РЛС микроволнового диапазона и более низких частот, но интерес к радиолокаторам низких частот в настоящее время невелик.

Хотя с этим не все могут согласиться, но некоторые инженеры — разработчики РЛС при наличии выбора предпочли бы клистронный усилитель в качестве источника большой СВЧ-мощности современного радиолокатора при условии, что разрабатываемый локатор допускает применение клистронов.

Радиолокационные антенны. Антенна — это тот элемент, который соединяет РЛС с внешним миром (см. гл. 12, 13). Она выполняет несколько задач: 1) концентрирует излучаемую энергию при передаче, то есть имеет направленное действие и узкую ширину луча; 2) собирает энергию сигнала, отраженного от цели; 3) обеспечивает измерение углового положения цели; 4) обеспечивает пространственное разрешение целей по угловым координатам; 5) позволяет выбрать для наблюдения желаемый сектор пространства. Антенна может быть параболическим зеркалом с механическим приводом сканирования, плоской фазированной решеткой с механическим сканированием или антенной продольного излучения также с механическим сканированием. В качестве антенны может использоваться фазированная решетка с электронным управлением лучом, использующая единственный передатчик с параллельным возбуждением излучателей или с пространственным (квазиоптическим) способом питания каждого элемента антенны. Это может быть пространственно-развернутая структура с распределением мощности излучения между ее отдельными элементами или антенная решетка с электронным сканированием, каждый элемент которой — «миниатюрный» твердотельный радиолокатор (называется также *активной фазированной антенной решеткой*). У каждого типа антенны есть свои специфические преимущества и ограничения. Вообще говоря, чем больше размеры антенны, тем лучше, но всегда существуют практические ограничения ее размеров.

1.2. Типы радиолокаторов

Хотя не существует никакого единственного способа классифицировать радиолокаторы, здесь мы это сделаем на основании основных особенностей, которые отличают один тип РЛС от другого.

Импульсный радиолокатор. Это радиолокатор, который излучает последовательность периодически повторяющихся почти прямоугольных радиоимпульсов. Этот тип РЛС можно назвать канонической формой радиолокатора. Именно его имеют в виду обычно, когда ничего не сказано о каких-либо характеристиках РЛС.

Радиолокатор высокого разрешения (с высокой разрешающей способностью). Высокая разрешающая способность может относиться к дальности, углу или радиальной скорости, но под радиолокатором с высоким разрешением обычно подразумевают РЛС с высокой разрешающей способностью по дальности. У некоторых радиолокаторов высокого разрешения разрешающая способность по дальности измеряется долями метра, хотя она может достигать и нескольких сантиметров.

Радиолокатор со сжатием импульсов. Это радиолокатор, излучающий длинные импульсы с внутриимпульсной модуляцией (обычно частотной или фазовой), чтобы совместить большую энергию длинного импульса с высоким разрешением по дальности, присущей коротким импульсам.

*Радиолокатор непрерывного излучения (РЛС НИ, CW radar — Continuous Wave radar)*¹. Этот тип РЛС излучает непрерывную синусоидальную радиоволну. Его основное назначение — использование доплеровского сдвига частоты для обнаружения движущихся целей или для измерения относительной радиальной скорости цели.

*Радиолокатор с непрерывным частотно-модулированным сигналом (РЛС НЧМС, FM-CW radar — Frequency Modulation CW radar)*². Это радиолокатор непрерывного излучения, в котором частотная модуляция сигнала дает возможность измерения дальности.

Обзорный радиолокатор (РЛС обзора — Surveillance Radar). Хотя словарь передает смысл слова «surveillance» как *наблюдение*, но на самом деле РЛС обзора — это такой радиолокатор, который обнаруживает присутствие цели (такой как самолет

¹ В русскоязычной технической литературе CW radar называют радиолокационной системой с непрерывным излучением РЛС НИ. — *Прим. ред.*

² В русскоязычной технической литературе FM-CW radar называют радиолокатором с непрерывным частотно-модулированным сигналом и обозначают как РЛС НЧМС. — *Прим. ред.*

или судно) и определяет ее координаты по дальности и углу. В его задачи может входить наблюдение цели в течение некоторого времени, чтобы проследить траекторию ее движения.

*Радиолокатор с системой селекции движущихся целей (РЛС с СДЦ, индикатор движущихся целей, МТИ — Moving Target Indication)*¹. Это импульсный радиолокатор, который обнаруживает движущиеся цели при наличии пассивных помех, используя низкую частоту повторения импульсов (ЧПИ, PRF — Pulse Repetition Frequency)². Низкая ЧПИ обеспечивает однозначность измерения дальности, однако ей присуща неоднозначность в области доплеровских частот, из чего следует существование так называемых «слепых скоростей».

Импульсно-доплеровский радиолокатор. Есть два типа импульсно-доплеровских РЛС, которые излучают импульсный сигнал либо с *высокой ЧПИ* (РЛС ВЧП, HPRF — High Pulse Repetition Frequency), либо со *средней ЧПИ* (РЛС СЧП)³. И та и другая используют доплеровский сдвиг частоты принимаемого сигнала, чтобы идентифицировать сигналы движущихся целей на фоне мешающих отражений и определить радиальную скорость их движения. У РЛС с ВЧП отсутствуют неоднозначность в частотной области и слепые скорости, но ей присуща неоднозначность измерения дальности. У РЛС с СЧП имеется неоднозначность как по дальности, так и по скорости, хотя есть другие достоинства.

РЛС сопровождения. Это радиолокатор, который осуществляет слежение за целью, определяя параметры траектории ее движения. Различные способы осуществления сопровождения и соответствующие режимы работы РЛС, обозначаемые как STT, ADT, TWS и следящие ФАР, описаны ниже.

*Сопровождение одной цели (STT — Single Target Tracker)*⁴. РЛС сопровождает единственную цель по угловым координатам, постоянно оценивая направление визирования со скоростью обновления данных, которая является достаточно высокой, чтобы обеспечить точное слежение за маневренной целью. Типичный интервал времени между двумя последовательными оценками — 0,1 с. (темп обновления данных — 10 измерений в секунду). Эти системы обычно используют моноимпульсный метод пеленгации для получения точных данных об угловых координатах.

*Автоматическое обнаружение и сопровождение (ADT — Automatic Detection and Tracking)*⁵. Этот режим работы выполняется обзорной РЛС. Локатор может сопровождать очень большое количество целей, используя данные измерений их угловых координат, полученные по множеству последовательных обзоров. Данный режим часто называют режимом сопровождения целей «на проходе». Скорость обновления данных в этом методе не столь высока, как при STT. Время между последовательными измерениями в этом режиме колеблется от 1 до 12 секунд в зависимости от приложения.

Сопровождение в режиме обзора (TWS — Track-While-Scan). Этот метод сопровождения также осуществляется обзорной РЛС, выполняющей сканирование пространства в узкой области пространства по одному или двум угловым измерениям. Тем самым обеспечивается высокая скорость обновления информации о координатах всех целей, находящихся в пределах ограниченной зоны обзора по углам. Этот метод использовался в прошлом в наземных РЛС, сопровождающих

¹ В русскоязычной технической литературе МТИ называют селекцией движущихся целей и обозначают как СДЦ. — *Прим. ред.*

² В русскоязычной технической литературе PRF называют частотой повторения импульсов и обозначают как ЧПИ. — *Прим. ред.*

³ В русскоязычной технической литературе HPRF и MPRF называют высокой частотой повторения импульсов и средней частотой повторения импульсов и обозначают как ВЧПИ и СЧПИ. — *Прим. ред.*

⁴ В русскоязычном издании вместо термина «Single Target Tracker» (STT) используется термин «РЛС сопровождения единственной цели» или «РЛС непрерывного сопровождения». — *Прим. пер.*

⁵ В русскоязычной технической литературе ADT называют режимом сопровождения целей «на проходе» либо автоматическим сопровождением целей в режиме обзора и обозначают соответственно СНП или АСЦРО. — *Прим. ред.*

самолеты при посадке, а также в некоторых типах РЛС наведения оружия и в некоторых бортовых радиолокаторах военного назначения.

Следящая ФАР. Фазированная решетка с электронным управлением лучом может (почти) непрерывно сопровождать более чем одну цель с высокой скоростью обновления данных. Возможно также одновременное сопровождение множества целей при более низкой скорости передачи данных, аналогичное методу АДТ.

РЛС картографирования. Этот тип РЛС предназначен для получения двумерных радиолокационных изображений протяженных объектов, таких как часть поверхности Земли и всего, что на ней находится. Эти радиолокаторы обычно устанавливаются на движущихся платформах.

*Бортовая РЛС бокового обзора (SLAR — Sidelooking Airborne Radar)*¹. Эта самолетная РЛС картографирования формирует радиолокационные изображения с высоким разрешением по дальности и подходящим разрешением по углу благодаря узкой ширине луча антенны.

*РЛС с синтезированной апертурой (РСА, SAR — Synthetic Aperture Radar)*². РСА — когерентный* радиолокатор картографирования, размещенный на движущемся летательном аппарате, который использует фазовую информацию отраженного сигнала для формирования изображения подстилающей поверхности с высоким пространственным разрешением в продольном и поперечном направлениях. Высокое разрешение по дальности достигается за счет сжатия импульсов.

*РЛС с инверсной (обратной) синтезированной апертурой (ИРСА, ISAR — Inverse Synthetic Aperture Radar)*³. ИРСА — когерентная РЛС формирования изображений сложных движущихся целей, обладающая высоким разрешением по дальности и столь же высоким разрешением в поперечном направлении. Высокое поперечное разрешение достигается благодаря относительному боковому движению цели и соответствующей обработке отраженного сигнала в частотной области. Эта РЛС может располагаться на движущемся носителе или быть стационарной.

РЛС управления оружием. Это название обычно относится к следящей системе сопровождения одной цели, такая система используется для защиты от воздушного нападения.

РЛС наведения. Обычно это радиолокатор, установленный на ракете, которая позволяет последней «нацелиться» на объект или осуществлять самонаведение на цель.

Метеорологический радиолокатор наблюдения. Данные радиолокаторы обнаруживают, распознают и измеряют такие параметры, как интенсивность осадков, направление и скорость ветра, осуществляют наблюдение за другими атмосферными явлениями, важными для метеорологических целей. Они могут быть специализированными метео-РЛС или быть реализованы в качестве одной из функций обзорных РЛС.

Доплеровская метеорологическая РЛС. Это радиолокатор наблюдения за погодой, который использует доплеровский сдвиг частоты, вызванный движущимися атмосферными массами, чтобы определить скорость ветра и резкие изменения его направления и скорости. Такая РЛС может указать на опасные погодные явления, такие как торнадо или резкие нисходящие воздушные потоки и другие метеорологические эффекты.

РЛС распознавания целей. В ряде случаев оказывается важным распознать тип цели, наблюдаемой радиолокатором (например автомобиль или птица), определить ее подтип (легковой автомобиль или грузовик, скворец или воробей) или отличить цель одного класса от другого (круизный лайнер от танкера). В системах военного

¹ В русскоязычной технической литературе SLAR называют бортовой РЛС бокового обзора и обозначают как БРЛС. — *Прим. ред.*

² В русскоязычной технической литературе термин SAR переводится в зависимости от контекста: либо как режим синтезирования апертуры, либо как РЛС с заданным режимом и обозначают как РСА. — *Прим. ред.*

* Термин «когерентный» подразумевает, что фаза радиолокационного сигнала играет важную роль в процессе его обработки в РЛС.

³ В русскоязычной технической литературе режим ISAR называют режимом инверсного синтезирования апертуры и обозначают как ИРСА. — *Прим. ред.*

назначения эту задачу обычно называют *некооперативным радиолокационным распознаванием целей* (NCTR — Noncooperative Target Recognition) в противовес кооперативной системе распознавания, такой как система опознавания «свой—чужой» (IFF — Identification Friend or Foe), которая не является радиолокационной¹. Когда распознавание относится к природным объектам и окружающей среде, то РЛС, предназначенную для этой задачи, обычно называют *радиолокатором дистанционного зондирования* (окружающей среды).

Многофункциональная РЛС. Если каждая из вышеупомянутых РЛС полагалась выполняющей какую-либо одну радиолокационную функцию, то многофункциональная РЛС предназначена для выполнения более чем одной такой функции. Причем обычно в каждый момент времени выполняется одна функция, то есть реализуется режим разделения времени.

Есть много иных способов описать радиолокаторы, принимая во внимание место их установки: земля, море, авиационный носитель, космический аппарат; степень мобильности: мобильный, транспортабельный, стационарный; назначение: авиадиспетчерская служба, военного применения, подповерхностного зондирования, загоризонтные, инструментальные; особенности частотного диапазона, в котором они работают: УВЧ, L, S, лазерные (лидары), сверхширокополосные, и другие параметры.

1.3. Информация, извлекаемая с помощью радиолокаторов

Само по себе обнаружение целей имеет небольшую ценность, если никакой другой информации о цели не извлекается. Аналогично информация о цели без ее обнаружения также бессмысленна.

Дальность. Вероятно, главный отличительный признак типового радиолокатора — его способность определить расстояние до цели путем измерения времени распространения сигнала от радиолокатора до цели и обратно. Никакой другой измерительный прибор (сенсор) не может измерить расстояние до объекта, находящегося на большой дальности, с точностью, обеспечиваемой радиолокатором. Ограничение точности дальнометрии на больших дальностях связано в основном с точностью знания скорости распространения электромагнитной волны в среде. При умеренных дальностях точность может составлять несколько сантиметров. Для измерения временной задержки излучаемый сигнал должен иметь своего рода *метки времени*. Метками времени могут служить короткие импульсы (амплитудная модуляция сигнала), но это может быть также периодическая частотная или фазовая модуляция. Точность измерения расстояния зависит от ширины полосы частот зондирующего сигнала: чем шире полоса, тем больше точность. Таким образом, *ширина полосы* — основной показатель точности измерения дальности.

Радиальная скорость. Радиальная скорость цели может быть вычислена как изменение ее дальности за единицу времени, но она может быть также оценена с помощью измерения доплеровского сдвига частоты. Точное измерение радиальной скорости требует времени. Следовательно, время — основной параметр, определяющий точность измерения радиальной скорости. Скорость и направление движения цели могут быть найдены по ее траектории, которая определяется радиолокатором путем измерений координат цели в течение некоторого интервала времени.

Угловое направление цели. Один из методов измерения углового направления цели состоит в определении угла, при котором величина отраженного сигнала на выходе сканирующей антенны максимальна. Этот метод обычно требует использования антенны с узкой шириной луча (антенны с высоким коэффициентом усиления). РЛС для обзора воздушного пространства с вращающимся антенным лучом определяет угловое положение цели именно таким способом. Направление на

¹ В соответствии с отечественной классификацией РЛС, принятой в гражданской авиации, эта система относится к радиолокационным системам с активным ответом или ко вторичным радиолокационным системам. — *Прим. пер.*

цель в одном угловом измерении может также быть определено при помощи двух антенных лучей, несколько смещенных по углу относительно друг друга, путем сравнения амплитуды отраженных сигналов в каждом луче. Для одновременного измерения азимута цели и угла места (возвышения над горизонтом) необходимы четыре луча. Хорошим примером такого метода является моноимпульсная радиолокационная станция сопровождения, описанная в главе 9. Точность угловых измерений зависит от *электрического размера антенны*, то есть от размера антенны, выраженного в длинах волны.

Размер и форма цели. Если РЛС обладает достаточной разрешающей способностью по дальности или углу, то она может выполнять измерения размеров цели по той координате, где имеется высокое разрешение. Обычно удается достичь высокой разрешающей способности по дальности, то есть в продольном направлении. Высокое разрешение в поперечном направлении, равное произведению дальности на ширину луча антенны, может быть получено только при очень узкой ширине луча. Однако ширина луча антенны ограничена максимальными размерами антенны. Таким образом, поперечное разрешение, полученное этим методом, не может быть столь же высоким, как разрешающая способность по дальности. Очень высокое поперечное разрешение может быть получено при анализе доплеровского спектра отраженных сигналов. Этот метод используется в РСА (РЛС с синтезированной апертурой) и ИРСА (РЛС с инверсной синтезированной апертурой), которым посвящена глава 17. Получить высокое поперечное разрешение с помощью РСА и ИРСА можно только при наличии бокового перемещения локатора относительно цели или цели относительно локатора. Если имеется достаточное разрешение и в продольном и в поперечном направлениях, то помимо оценки размеров цели возникает возможность оценить ее форму и использовать эту информацию для различения целей.

Важность ширины полосы частот в радиолокации. Ширина полосы частот связана с информационной емкостью или объемом информации, передаваемой за единицу времени, следовательно, это очень важный параметр для многих радиолокационных приложений. Есть два типа ширины полосы, с которыми приходится иметь дело радиолокации. Первый тип — *ширина полосы сигнала*, которая определяется длительностью импульса или шириной спектра внутриимпульсной модуляции сигнала. Второй тип — *ширина полосы настройки*. Сигнальная ширина полосы простого радиоимпульса длительностью τ равна $1/\tau$. Сложные импульсные сигналы, описанные в главе 8, могут иметь ширину полосы, намного большую, чем обратная величина длительности импульса. Широкая сигнальная полоса необходима для высокого разрешения по дальности, для точного измерения дальности цели и для того, чтобы иметь некоторую возможность различения одного типа цели от другого. Высокое разрешение по дальности также может быть полезным для уменьшения эффектов *мерцания* в РЛС сопровождения для реализации одного из методов оценки высоты полета воздушных целей, основанного на измерении задержки между прямым отраженным сигналом и сигналом, переотраженным земной поверхностью (называемого *методом многолучевого определения высоты*). Высокое разрешение по дальности способствует повышению отношения сигнал/помеха. В военных системах высокая разрешающая способность по дальности может использоваться для подсчета количества отдельных целей в плотной группе воздушных судов, а также для обнаружения и защиты от некоторых типов радиоэлектронного противодействия.

Ширина полосы настройки предполагает возможность изменять (перестраивать) рабочую частоту сигнала в пределах широкого диапазона выделенного спектра. Это может использоваться для того, чтобы понизить взаимные помехи среди РЛС, работающих в той же самой полосе частот, и для того, чтобы сделать радиоэлектронное противодействие противника менее эффективным. Чем выше рабочая частота, тем легче получить широкую полосу сигнала и широкую полосу настройки.

Ограничение на доступность частотного спектра, выделяемого радиолокационными системам, устанавливают национальные правительственные регулирующие агентства (в Соединенных Штатах — Федеральная комиссия по связи FCC — International Telecommunications Union), а на международном уровне — Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunication Union). После успешного применения радиолокации во Второй мировой войне радиолокационным системам выделили более одной трети всего микроволнового диапазона. За прошедшие годы

выделенная область спектра была значительно сокращена в связи с появлением многих коммерческих пользователей спектра, работающих в «эру беспроводных технологий», и других служб, требующих своей доли спектра электромагнитных волн. Таким образом, инженер — разработчик РЛС все острее и острее чувствует дефицит доступных областей спектра и сложность размещения требуемой полосы частот, которая является жизненно важной для успеха многих радиолокационных приложений.

Отношение сигнал/шум. Точность всех радиолокационных измерений, как и достоверность обнаружения целей, зависит от отношения E/N_0 , где E — полная энергия принятого сигнала после его обработки радиолокатором и N_0 — мощность шума на единицу ширины полосы пропускания приемника. Таким образом, отношение E/N_0 — важный критерий возможностей РЛС.

Многочастотная работа. Возможность работы на более чем одной рабочей частоте дает радиолокатору важные преимущества [2]. Под *быстрой перестройкой частоты* обычно имеется в виду изменение несущей частоты от импульса к импульсу. *Частотное разнесение* обычно предполагает использование множества частот, которые широко разнесены по спектральной оси — иногда на несколько радиолокационных диапазонов. При использовании частотного разнесения РЛС может работать на каждой частоте одновременно или почти одновременно. Этот метод использовался почти во всех гражданских радиолокаторах управления воздушным движением. Быстрая перестройка частоты, однако, несовместима с использованием доплеровской обработки сигналов для обнаружения движущихся целей при воздействии пассивных помех, а частотное разнесение может быть совместимым с таким применением. Частотный диапазон, занимаемый сигналом, и при быстрой перестройке, и при разнесении намного больше, чем ширина полосы простого импульса длительностью t .

Устранение провалов диаграммы направленности по углу места. Работа радиолокатора на единственной частоте может привести к образованию лепесткового характера диаграммы излучения антенны в вертикальной плоскости в результате интерференции прямого сигнала (РЛС — цель) и рассеянного поверхностью сигнала (РЛС — поверхность земли — цель). Под лепестковым характером излучения мы подразумеваем пониженное излучение под некоторыми углами места (провалы) и увеличенную мощность сигнала под другими углами (выступы). Изменение частоты позволяет изменить локализацию провалов и выступов так, чтобы провалы, существующие на одной частоте, компенсировались выступами на другой частоте и результирующая диаграмма излучения в целом стала бы более гладкой. При этом вероятность пропуска отраженного сигнала цели должна уменьшиться. Например, измерения, проводимые с помощью широкополосного экспериментального радиолокатора, известного как Senrad, работающего на частотах от 850 до 1400 МГц, показали, что в одночастотном режиме работы усредненная по большому числу наблюдений вероятность появления отметки цели при сканировании была равна 0,78. Когда же радиолокатор работал на четырех различных сильно разнесенных частотах, вероятность появления отметки цели при сканировании стала равной 0,98 — очень существенное увеличение, обусловленное только частотным разнесением [2].

Повышение вероятности обнаружения целей. Эффективная площадь отражения (ЭПО) сложной цели, такой как самолет, может очень существенно меняться с изменением частоты излучения. На некоторых частотах ЭПО будет малой величиной, а на других — большой. Если РЛС работает в одночастотном режиме, то существует вероятность получить слабый отраженный сигнал и, как следствие, пропуск цели. При смене частот ЭПО цели оказывается то малой, то большой, и успешное обнаружение становится более вероятным, чем при работе на единственной частоте. Это одна из причин, по которой почти все РЛС управления воздушным движением работают на двух частотах. При этом рабочие частоты разнесены на такую величину, при которой отраженные от цели сигналы оказываются взаимно некоррелированными, поэтому вероятность обнаружения увеличивается.

Понижение эффективности электронного противодействия противника. Любой реальный радиолокатор военного назначения должен быть готов к использованию противником мер радиоэлектронного подавления, снижающих эффективность этого локатора. Работа в широком диапазоне частот делает радиопротиводействие более трудным, чем при работе на одной частоте. При использовании шумовой заградительной помехи изменение частоты непредсказуемым для противника способом в

широкой полосе частот заставляет станцию помех распределять свою мощность по широкому частотному диапазону. Следовательно, снижается мощность помехи в полосе частот, занимаемой сигналом радиолокатора в момент отдельного зондирования. Частотное разнесение в широкой полосе также делает более трудным (но возможным) перехват рабочей частоты приемником противника, а противорадиолокационной ракете это затрудняет обнаружение и наведение на РЛС.

Доплеровское смещение частоты в радиолокации. Важность учета доплеровского сдвига частоты для импульсного радиолокатора была оценена вскоре после Второй мировой войны. Его использование со временем становилось все более и более важным фактором во многих радиолокационных приложениях. Современный радиолокатор был бы намного менее интересным или полезным, если бы эффект Доплера не существовал. Доплеровский сдвиг частоты f_d может быть найден в соответствии с выражением

$$f_d = 2v_r / \lambda = (2v \cos\theta) / \lambda, \quad (1.1)$$

где $v_r = v \cos\theta$ — относительная скорость цели (по отношению к РЛС) в м/с, v — абсолютная скорость цели в м/с, λ — длина волны РЛС в метрах и θ — угол между вектором скорости движения цели и линией визирования. С точностью примерно 3% доплеровская частота в герцах приблизительно равна скорости v_r в узлах, поделенной на длину волны λ в метрах.

Доплеровский сдвиг частоты широко используется для выделения движущихся целей на фоне неподвижных мешающих отражателей, как это описано в главах 2—5. Такие радиолокаторы известны как РЛС с СДЦ (РЛС с системой селекции движущихся целей), бортовая РЛС с СДЦ и импульсно-доплеровские РЛС. Все современные РЛС управления воздушным движением, все важные военные наземные радиолокаторы, бортовые РЛС обзора воздушного пространства и все самолеты-истребители используют в своих интересах эффект Доплера. Отметим, что во время Второй мировой войны ни один импульсный радиолокатор не использовал эффект Доплера. Радиолокаторы с непрерывным излучением также используют эффект Доплера для обнаружения движущихся целей, но практическое применение данных РЛС для этих целей сейчас не столь популярно, как это было в свое время. Загоризонтные РЛС декаметрового диапазона (см. гл. 20) не могли бы обнаружить ни одной движущейся цели из-за очень сильных отражений от поверхности Земли без использования эффекта Доплера.

Другим существенным радиолокационным приложением, зависящим от доплеровского смещения частоты, являются РЛС наблюдения за погодой, такие как РЛС Nexrad американской Национальной метеорологической службы (см. гл. 19).

Принцип работы РСА и ИРСА может быть описан с точки зрения использования доплеровского сдвига частоты (см. гл. 17). Бортовая доплеровская метеорологическая РЛС также основана на доплеровском смещении. Использование эффекта Доплера в радиолокаторах, вообще говоря, налагает большие требования на стабильность передатчика РЛС и повышает сложность обработки сигналов. Тем не менее эти требования охотно принимаются разработчиками, чтобы достигнуть существенных преимуществ, предоставляемых эффектом Доплера. Нужно также отметить, что доплеровское смещение — ключевая способность радиолокаторов, предназначенных для измерения скорости, например полицейских радаров, предназначенных для слежения за ограничением скорости транспортных средств, и других приложений, где требуется дистанционное измерение скорости.

1.4. Уравнение дальности действия радиолокатора

Уравнение дальности действия радиолокатора (или для краткости уравнение радиолокации¹) не только служит очень полезной цели — расчету дальности действия как функции характеристик радиолокатора, но также полезно как ориентир

¹ В отечественной литературе это уравнение принято называть основным уравнением радиолокации. — *Прим. пер.*

при проектировании радиолокационных систем. Простая форма уравнения радиолокации выглядит следующим образом:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot A_e. \quad (1.2)$$

Правая сторона уравнения записана как произведение трех сомножителей, чтобы отразить имеющие место физические процессы. Первый сомножитель справа — *плотность потока мощности излученного сигнала* на расстоянии R от радиолокатора, излучающего мощность P_t антенной с коэффициентом усиления G_t . Числитель второго сомножителя σ — эффективная площадь отражения (ЭПО) цели. Она имеет размерность площади (например квадратные метры) и является мерой энергии, переизлученной целью назад в направлении радиолокатора. Знаменатель второго сомножителя учитывает рассеяние отраженного сигнала на его обратном пути к радиолокатору. Произведение первых двух множителей представляет собой мощность отраженной радиоволны, падающей на единичную площадь приемной антенны радиолокатора. Отметим, что определение эффективной площади отражения цели σ *следует именно из этого уравнения*. Приемная антенна, имеющая эффективную площадь A_e , собирает мощность P_r отраженного сигнала, вернувшегося к радиолокатору. Если максимальную дальность действия радиолокатора R_{max} определить из условия равенства мощностей принятого сигнала и минимального обнаруживаемого сигнала радиолокатора S_{min} , то простая форма уравнения радиолокации будет выглядеть следующим образом:

$$R_{max}^4 = \frac{P_t G_t A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{min}}. \quad (1.3)$$

Большинство РЛС использует одну антенну и для передачи, и для приема. Из теории антенн известно соотношение между коэффициентом усиления антенны G_t на передачу и ее эффективной площадью на прием: $G_t = 4\pi \cdot A_e / \lambda^2$, где λ — длина волны РЛС. Подстановка этого выражения в (1.3) дает две других полезных формы записи уравнения радиолокации (непоказанные здесь). Одна из них представляет антенну только ее коэффициентом усиления, другая — только ее эффективной площадью.

Простая форма уравнения радиолокации поучительна, но не очень полезна, так как не учитывает много факторов. Минимальный обнаруживаемый сигнал ограничен шумом приемника и может быть выражен как

$$S_{min} = k T_0 B F_n (S/N)_1. \quad (1.4)$$

В этом выражении $k T_0 \cdot B$ — так называемый тепловой шум нагретого омического проводника, где k — постоянная Больцмана, T_0 — стандартная температура 290 °K и B — ширина частотной полосы приемника (обычно это ширина полосы УПЧ, если используется приемник супергетеродинного типа). Произведение $k T_0$ равно $4 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц. Чтобы учесть дополнительный шум, вносимый реальным (неидеальным) приемником, выражение теплового шума умножается на коэффициент шума F_n приемника, определенный как отношение мощности шума реального приемника к мощности шума идеального приемника. Принятый сигнал считается обнаруживаемым, если его мощность больше, чем мощность шума приемника, умноженная на коэффициент, обозначенный здесь как $(S/N)_1$. Эта величина — отношение сигнал/шум $(S/N)_1$, необходимое для обнаружения, если принимается только один импульс. Это отношение должно быть достаточно большим, чтобы при заданной вероятности ложной тревоги (возникающей, когда шум превышает порог приемника) получить заданную вероятность правильного обнаружения (как это описано во множестве учебников по радиолокации [3, 4]). Однако радиолокаторы, вообще говоря, принимают больше одного импульса прежде чем принять решение об обнаружении. Мы полагаем, что зондирующий сигнал радиолокатора — периодическая последовательность почти прямоугольных радиоимпульсов. Эти импульсы интегрируются (суммируются) перед тем, как будет вынесено решение об обнаружении. Чтобы учесть эти добавленные сигналы, числитель уравнения радиолокации умножается на коэффициент $n \cdot E(n)$, где $E(n)$ — показатель эффективности операции сложения n импульсов вместе. Эта величина может также быть найдена в стандартных учебниках и справочниках.

Мощность P_t — пиковая мощность импульса радиолокатора. Средняя мощность P_{av} лучше характеризует способность РЛС обнаруживать цели, и поэтому иногда ее включают в уравнение радиолокации с помощью подстановки $P_t = P_{av} / f_p \cdot \tau$, где f_p — частота повторения импульсов радиолокатора и τ — длительность импульса. Поверхность Земли и ее атмосфера могут сильно воздействовать на распространение электромагнитных волн и изменить область действия и возможности радиолокатора. В уравнении радиолокации эти эффекты распространения учитываются коэффициентом F^4 в числителе правой части уравнения, как описано в главе 26. С учетом упомянутой подстановки простая форма уравнения радиолокации записывается в виде

$$R_{\max}^4 = \frac{P_{av} G A_e \sigma n E_i(n) F^4}{(4\pi)^2 k T_0 F_n f_p (S/N)_1 L_s}. \quad (1.5)$$

В процессе вывода уравнения (1.5) полагалось, что $B \cdot \tau \approx 1$, что обычно применимо к радиолокационным приемникам. Коэффициент L_s (большой, чем единица), называемый коэффициентом системных потерь, добавлен в выражение, чтобы учесть множество источников потерь, которые могут возникнуть в радиолокаторе. Коэффициент потерь может быть довольно большим. Если системными потерями пренебречь, то при расчете ожидаемой дальности действия радиолокатора можно совершить очень грубую ошибку. Величина потерь от 10 до 20 дБ считается весьма обычной, когда приняты во внимание все источники потерь радиолокационной системы.

Уравнение (1.5) применимо к радиолокатору, который наблюдает цель достаточно долго, чтобы принять n отраженных импульсов. Более строго оно применимо, если время наблюдения цели t_0 равно n/f_p . Примером может служить РЛС сопровождения, которая непрерывно наблюдает единственную цель в течение времени t_0 . Для обзорной РЛС это уравнение, однако, должно быть модифицировано. Допустим, что обзорная РЛС наблюдает пространственную зону протяженностью Ω стерадиан с периодом обзора (периодом возврата к той же точке пространства) t_s . У РЛС авиадиспетчерской службы это время составляет от 4 до 12 секунд. Таким образом, у обзорной РЛС появляется дополнительное ограничение, связанное с необходимостью просмотреть пространственную зону Ω за время t_s . Период обзора t_s равен $t_0 \cdot (\Omega/\Omega_0)$, где $t_0 = n/f_p$ и Ω_0 — пространственная ширина луча антенны (стерадианы), связанная с коэффициентом усиления антенны G приближенным соотношением $G = 4\pi/\Omega_0$. Заменяя n/f_p в (1.5) эквивалентным выражением $4\pi t_s / G \Omega$, получим уравнение радиолокации для обзорной РЛС

$$R_{\max}^4 = \frac{P_{av} A_e \sigma E_i(n) F^4}{(4\pi)^2 k T_0 F_n (S/N)_1 L_s} \cdot \frac{t_s}{\Omega}. \quad (1.6)$$

Разработчик РЛС имеет небольшое влияние на выбор времени обзора t_s и размера зоны обзора Ω , которые определены главным образом задачами, выполняемыми РЛС. Эффективная площадь отражения также определена назначением РЛС. Если к обзорной РЛС предъявляется требование большой дальности действия, то у такой РЛС должна быть достаточно большая величина произведения $P_{av} \cdot A_e^1$. Поэтому общим показателем возможностей обзорной РЛС является *энергетическо-апертурный коэффициент*. Заметим, что рабочая частота не присутствует явно в уравнении обзорной РЛС. Выбор частоты, однако, будет сделан неявно другими способами.

Подобно тому, как уравнение радиолокации для обзорной РЛС отличается от общепринятой формы уравнения (1.5) или простой формы (1.2), каждый особенный тип радиолокаторов, вообще говоря, должен использовать уравнение радиолокации, скроенное по типу этого локатора. Если мешающие отражения от земли, моря или атмосферных объектов превышают шум приемника, уравнение радиолокации должно быть модифицировано так, чтобы учесть помехи, мешающие обнаружению в большей степени, чем шум приемника. Может сложиться ситуация, при которой

¹ В русскоязычной научно-технической литературе чаще говорят об энергетическом потенциале, под которым подразумевают произведение энергии излучения и эффективной площади приемной антенны. — *Прим. пер.*

возможности обнаружения целей в одной области действия РЛС ограничиваются пассивной помехой, а в другой — собственным шумом приемника. В этих условиях могут существовать два набора характеристик РЛС: один — оптимизированный для шума и другой — оптимизированный для помехи. Тогда при выборе технических параметров РЛС разработчику приходится идти, как это всегда бывает, на компромиссные решения. Совсем другой вид уравнение радиолокации принимает, когда дальность действия РЛС ограничена радиопротиводействием противника.

1.5. Диапазоны рабочих частот и их буквенные обозначения

Не всегда удобно указывать точные числовые границы частотного диапазона, в котором работает та или иная РЛС. Для многих РЛС военного назначения точное значение рабочей частоты обычно не раскрывается. Таким образом, использование буквенных обозначений диапазонов частот, в которых работают радиолокаторы, оказывается очень полезным. ИИЭР — Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, IEEE — Institute of Electrical and Electronic Engineers, официально стандартизировал буквенные обозначения радиолокационных диапазонов волн (частот), которые приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Условные обозначения радиолокационных частотных диапазонов, стандартизированные IEEE [5]

Обозначение диапазона	Номинальные границы диапазона	Частотные диапазоны ИТУ для радиолокационных систем. Регион 2
ВЧ	3—30 МГц	
ОВЧ	30—300 МГц	138—144 МГц 216—225 МГц
УВЧ	300—1000 МГц	420—450 МГц 890—942 МГц
L	1,0—2,0 ГГц	1215—1400 МГц
S	2,0—4,0 ГГц	2,3—2,5 ГГц 2,7—3,7 ГГц
C	4,0—8,0 ГГц	4,2—4,4 ГГц 5,25—5,925 ГГц
X	8,0—12,0 ГГц	8,5—10,68 ГГц
K _u	12,0—18,0 ГГц	13,4—14,0 ГГц 15,7—17,7 ГГц
K	18,0—27,0 ГГц	24,05—24,25 ГГц 24,65—24,75 ГГц
K _a	27,0—40,0 ГГц	33,4—36,0 ГГц
V	40,0—75 ГГц	59,0—64,0 ГГц
W	75,0—110 ГГц	76,0—81 ГГц 92,0—100 ГГц

Комментарии к таблице [6]. Международный союз электросвязи (ИТУ) назначает отдельные участки спектра электромагнитных волн для использования радиолокационными системами, как показано в третьей колонке таблицы, которая относится к региону 2 ИТУ (Северная и Южная Америка). Распределение частотного спектра в двух других регионах ИТУ незначительно отличается от приведенного.

Таким образом, радиолокатор L-диапазона может работать только в пределах полосы частот от 1215 до 1400 МГц, и даже в пределах этой полосы могут быть ограничения. Некоторые из выделенных ИТУ диапазонов ограничены в использовании, например, полоса частот между 4,2 и 4,4 ГГц зарезервирована (с несколькими исключениями) для авиационных бортовых радиовысотомеров. Нет никаких частот, официально выделенных ИТУ для радиолокации, в HF-диапазоне, но большинство HF-радиолокаторов делит частоты с другими радиосистемами. Буквенное обозначение диапазона миллиметровых волн для радиолокаторов — *mm*, и есть несколько частотных полос, выделенных радиолокационным системам в этой области, но они не указаны в таблице. Хотя официальные границы диапазона миллиметровых волн, установленные ИТУ, — от 30 до 300 ГГц, в действительности технические решения РЛС K_a -диапазона* ближе к технологиям микроволновых частот, чем к технологиям W-диапазона. Специалисты, работающие с радиолокационной техникой миллиметровых волн, часто рассматривают этот частотный диапазон как имеющий нижнюю границу 40 ГГц, а не «законную» нижнюю границу 30 ГГц с учетом значительной разницы в технологиях и областях применения радиолокаторов микроволнового и миллиметрового диапазонов. Понятие «микроволны» не было определено этим стандартом, но этот термин вообще относится к РЛС, которые работают на частотах от УВЧ до K_a . Есть причина, по которой буквенные обозначения диапазонов оказались малознакомыми инженерам нерадарной области. Она состоит в том, что эти обозначения были первоначально использованы для описания рабочих частот радиолокаторов периода Второй мировой войны. Секретность того времени требовала, чтобы соответствие буквенных обозначений и реальных диапазонов частот, на которых работали РЛС, было известно только узким специалистам. У инженеров, работающих в области радиолокации, редко возникают трудности с использованием буквенных обозначений радиолокационных диапазонов.

Для обозначения других диапазонов электромагнитных волн используются другие буквы латинского алфавита, но эти диапазоны малоприспособлены для радиолокационных приложений, поэтому соответствующие обозначения никогда не использовались в радиолокационной практике. Одна из систем условных обозначений диапазонов радиоволн использует буквы A, B, C и т.д. Эта система была первоначально разработана для частотных диапазонов систем радиоэлектронного подавления [7]. Упомянутый ранее стандарт IEEE отмечает, что эти обозначения «несовместимы с радиолокационной практикой и не должны использоваться для описания диапазонов рабочих частот радиолокаторов». Таким образом, может существовать станция помех D-диапазона, но не может быть РЛС D-диапазона.

1.6. Влияние рабочей частоты радиолокатора на его характеристики

Диапазон рабочих частот известных к настоящему времени радиолокаторов простирается от 2 МГц (только немного выше диапазона AM-радиовещания) до нескольких сотен гигагерц (область миллиметровых волн). Однако чаще частоты РЛС лежат в интервале от 5 МГц до 95 ГГц, редко выше. Это очень широкая область частот, и, следовательно, нужно ожидать, что технические решения, используемые в РЛС, их характеристики и сфера применения значительно меняются в зависимости от частотного диапазона, в котором эта РЛС работает. У РЛС каждого конкретного диапазона обычно имеются определенные свойства и характеристики, отличающие его от РЛС других диапазонов частот. Вообще большую дальность действия легче получить на более низких частотах, потому что проще создать мощные передатчики и физически большие антенны более низких частот. С другой стороны, на более высоких частотах легче достичь большей точности измерений дальности и других координат, потому что более высокие частоты предоставляют более широкую полосу для размещения спектра сигнала, ширина

* Радиоволны K_a -диапазона имеют длину от 8,3 мм до 9 мм, что формально относит их к миллиметровому диапазону, точнее к его нижней границе.

которого и определяет точность измерения дальности и разрешающую способность по дальности. На высоких частотах также проще создать остронаправленную антенну при ограниченных физических размерах самой антенны, поскольку угловая точность и угловое разрешение определяются отношением длины волны к размеру антенны. Далее кратко описаны практические применения радиолокационных систем в зависимости от используемого диапазона частот. Различия в использовании смежных диапазонов, однако, редко оказываются принципиальными, поэтому возможно перекрытие в характеристиках РЛС, относящихся к смежным диапазонам частот.

HF (ВЧ)¹ (3–30 МГц). Основным назначением РЛС ВЧ-диапазона (глава 20) является обнаружение целей на очень больших дальностях (до 2000 морских миль) с использованием явления отражения ВЧ-радиоволны от ионосферы, находящейся высоко над поверхностью Земли. Радиолокаторы называют это явление *коротковолновым распространением* и используют для общения на больших расстояниях. Целями для РЛС ВЧ-диапазона могут быть самолеты, суда, баллистические ракеты, а также отражения от самой морской поверхности, которые несут информацию о направлении и скорости ветра, создающего волнение моря.

VHF (ОВЧ) (30–300 МГц). В начальный период появления радиолокаторов в 1930-х годах РЛС работали в этой полосе частот, потому что эти частоты представляли границу возможностей радиотехники того периода. Это подходящая частота для дальнего обзора воздушного пространства или обнаружения баллистических ракет. На этих частотах коэффициент отражения от поверхности может быть очень большим, особенно от поверхности воды. В результате интерференции прямого и поверхностного отраженного сигналов в случае их синфазного сложения значительно возрастает дальность действия РЛС ОВЧ-диапазона. Иногда этот эффект может почти удвоить дальность действия РЛС. Однако если есть усиливающая интерференция, которая увеличивает дальность, то должна существовать и ослабляющая интерференция, уменьшающая дальность обнаружения почти до нуля вдоль некоторых направлений диаграммы излучения антенны в вертикальной плоскости. Ослабляющее взаимодействие прямого и отраженного сигналов может привести к уменьшению дальности действия целей, наблюдаемых под малыми углами к поверхности. Наблюдаемость движущихся целей на фоне пассивных помех часто лучше при более низких рабочих частотах, если в РЛС используется доплеровская фильтрация, потому что неоднозначность по частоте Доплера, вызывающая слепые скорости, проявляется на низких частотах в гораздо меньшей степени. Радиолокаторам ОВЧ-диапазона не мешают отражения от дождя, но на них могут влиять многократные отражения от метеорной ионизации и полярного сияния. Эффективная площадь отражения самолетов в ОВЧ-диапазоне вообще больше, чем на более высоких частотах. РЛС этого диапазона часто дешевле по сравнению с радиолокаторами такой же дальности действия, работающими на более высоких частотах.

Хотя ОВЧ-диапазон имеет много достоинств при использовании в системах дальнего обнаружения, у него есть и некоторые серьезные недостатки. Ранее были упомянуты глубокие провалы диаграммы излучения антенны РЛС в вертикальной плоскости, в том числе при малых углах места. Области спектра, доступные РЛС ОВЧ, достаточно узки, в результате — низкая разрешающая способность по дальности. Ширина луча антенны обычно более широкая, чем на микроволновых частотах, и, как следствие, — плохое угловое разрешение и невысокая точность угловых измерений. Диапазон ОВЧ² переполнен важными гражданскими потребителями частотных ресурсов, такими как телевидение и ЧМ-радиовещание, дополнительно снижающими доступность спектра для радиолокационных применений.

¹Между обозначениями частотных диапазонов, используемых в настоящем справочнике, и обозначениями диапазонов, принятых в России согласно ГОСТ 24375-80, существуют следующие соответствия: HF — ВЧ (высокие частоты); VHF — ОВЧ (очень высокие частоты); UHF, L, нижняя часть S-диапазона — УВЧ (ультравысокие частоты); верхняя часть S-диапазона, C, X, K_c, K и нижняя часть K_a-диапазона — СВЧ (сверхвысокие частоты); диапазон миллиметровых волн — КВЧ (крайне высокие частоты). — *Прим. пер.*

²Он же вещательный УКВ-диапазон (нижняя часть УКВ-диапазона, под которым обычно понимают объединение диапазонов ОВЧ и УВЧ). — *Прим. пер.*

Уровень внешнего шума, действующего на РЛС через антенну, в ОВЧ-диапазоне выше, чем на микроволновых частотах. Возможно, главное ограничение возможностей радиолокаторов в диапазоне ОВЧ — трудность получения достаточно широкой полосы спектра на этих переполненных частотах.

Несмотря на упомянутые ограничения, РЛС обзора воздушного пространства ОВЧ-диапазона широко использовались в Советском Союзе, потому что это была большая страна и более низкая стоимость РЛС данного диапазона делала их предпочтительными для обеспечения обзора ее большого воздушного пространства [8]. Сообщалось, что в СССР было выпущено большое количество обзорных РЛС ОВЧ-диапазона. Некоторые из них имели очень большие размеры и большую дальность, и большинство было транспортабельно. Интересно отметить, что бортовые РЛС перехвата воздушных целей широко использовались немцами во Второй мировой войне. Например, бортовой радиолокатор Lichtenstein SN-2 работал на частотах приблизительно от 60 МГц до более чем 100 МГц, в различных модификациях. РЛС этих частот не были подвержены помехам, создаваемым так называемыми *дипольными отражателями* или *чаф* (также известными как *уиндоу*¹).

УВЧ (300—1000 МГц). Многие из характеристик радиолокаторов, работающих в диапазоне ОВЧ, в некоторой степени применимы также к РЛС диапазона УВЧ. Частоты УВЧ-диапазона хорошо подходят для работы бортовых систем селекции движущихся целей (БСДЦ, АМТИ — Airborne Moving Target Indication)² в авиационных РЛС раннего предупреждения о нападении, как отмечается в главе 3. Этот диапазон удобен также для РЛС большого радиуса действия, предназначенных для слежения за спутниками и баллистическими ракетами. В верхней части этого диапазона располагаются частоты корабельных РЛС обзора воздушного пространства на больших дальностях, а также частоты радиолокаторов, называемых *виндпрофайлерами*, которые измеряют скорость и направление ветра.

Радиолокатор подповерхностного зондирования (земли) (GPR — Ground Penetrating Radar), описанный в главе 21, является примером того, что называют сверхширокополосными UWB³ радиолокационными системами. Полоса частот сигналов GPR иногда охватывает диапазоны ОВЧ и УВЧ. Ширина спектра сигналов и приемного тракта такой РЛС может простираться, например, от 50 до 500 МГц. Широкая полоса пропускания необходима, чтобы получить высокую разрешающую способность по дальности. Более низкие частоты необходимы, чтобы позволить электромагнитной энергии распространяться в грунте. Даже в этом случае потери мощности сигнала при распространении в толще земли настолько высоки, что дальность действия простого мобильного GPR составляет только несколько метров. Такие дальности оказываются достаточными для обнаружения подземных кабелей электропередач и трубопроводов и других зарытых в землю предметов. РЛС, предназначенная для обнаружения целей, расположенных на поверхности земли, но под листвой деревьев, должна иметь частоты, аналогичные частотам GPR.

L-диапазон (1,0—2,0 ГГц). Это предпочтительная полоса частот для работы дальних (до 200 морских миль) РЛС обзора воздушного пространства. Хорошим примером такого радиолокатора является РЛС управления воздушным движением большого радиуса действия. Поскольку частоты этого диапазона выше, чем у описанных ранее, эффект дождя начинает сказываться на рабочих характеристиках радиолокатора. Таким образом, проектировщику РЛС, возможно, придется побеспокоиться об ослаблении эффекта дождя в L-диапазоне и на более высоких частотах. Этот диапазон хорошо подходит для дальнего обнаружения спутников и межконтинентальных баллистических ракет.

S-диапазон (2,0—4,0 ГГц). Радиолокаторы управления воздушным движением в районе аэропорта — это РЛС S-диапазона волн. Их радиус действия обычно

¹ Уиндоу (window) — станиолевые ленты, используемые английской бомбардировочной авиацией для создания пассивных помех во время Второй мировой войны. — *Прим. пер.*

² В русскоязычной технической литературе АМТИ называют бортовой селекцией движущихся целей и обозначают как БСДЦ. — *Прим. ред.*

³ В русскоязычной технической литературе UWB называют сверхширокополосным сигналом и обозначают как СШПС. — *Прим. ред.*

составляет 50—60 морских миль. В S-диапазоне возможно создание трехкоординатного радиолокатора, определяющего дальность, азимут и угол места цели.

Как было отмечено ранее, для дальнего обзора пространства лучше подходят низкие частоты, а для точного измерения координат — высокие. Если для решения обеих задач используется один и тот же радиолокатор, работающий в полосе одного диапазона, то S-диапазон — хороший компромисс. Иногда также допустимо использовать С-диапазон для РЛС, выполняющей обе функции. Обзорный радиолокатор авиационного комплекса (AWACS — Airborne Warning and Control System) — системы раннего предупреждения и управления — также работает в S-диапазоне. Обычно большинство радиолокационных систем работают в той полосе частот, в которой их рабочие характеристики оптимальны. Однако упомянутый радиолокатор системы AWACS — это РЛС S-диапазона, а аналогичный радиолокатор авиационной системы раннего предупреждения E2 AEW Военно-морского флота США — РЛС УВЧ-диапазона. Несмотря на значительную разность в частотах, известно, что у обеих РЛС сопоставимые рабочие характеристики [9]. Это исключение из общего правила относительно выбора оптимальной частоты для каждого конкретного радиолокационного приложения.

Метеорологический радиолокатор Nexrad также работает в S-диапазоне. Это хорошая частота для наблюдения за погодой, потому что на более низкой частоте отражения от дождя были бы намного слабее, так как мощность отраженного от дождевых капель сигнала изменяется пропорционально четвертой степени частоты. Выбор более высокой частоты привел бы к ослаблению радиоволны, распространяющейся сквозь потоки дождя, и точное измерение интенсивности дождевых осадков было бы проблематично. Существуют метеорологические РЛС, работающие на более высоких частотах, но они обычно имеют меньшую дальность, чем Nexrad, и используются для решения более частных задач по сравнению с комплексом точных метеорологических измерений, выполняемых Nexrad.

С-диапазон (4,0—8,0 ГГц). Эта полоса частот находится между S- и X-диапазонами и имеет промежуточные свойства по отношению к свойствам этих диапазонов. Поскольку у этого диапазона нет собственных специфических особенностей, часто выбор разработчиков склоняется в пользу S- или X-диапазонов, хотя в прошлом в С-диапазоне существовали важные радиолокационные приложения.

X-диапазон (8,0—12,0 ГГц). Это самый распространенный радиолокационный диапазон для военных применений. Он широко используется в военных бортовых РЛС на самолетах-перехватчиках, истребителях и штурмовиках, атакующих наземные цели, как описано в главе 5. Он также часто используется в РЛС картографирования с синтезированной апертурой и в РЛС с инверсной синтезированной апертурой. X-диапазон — подходящая частота для гражданских морских радиолокаторов, бортовых метео-РЛС обнаружения грозных фронтов, бортовых доплеровских метео-РЛС и полицейских радаров измерения скорости. Системы радиолокационного наведения ракет иногда работают в X-диапазоне. Радиолокаторы X-диапазона имеют вообще небольшой размер и поэтому представляют интерес для приложений, где важны мобильность и малый вес, а очень большая дальность действия не является важным требованием. Относительно широкая полоса частот, доступная в X-диапазоне, и возможность получить узкую ширину луча у относительно малых антенн — важные свойства для приложений, требующих высокой разрешающей способности. Из-за высокой частоты X-диапазона дождь может стать серьезной причиной ухудшения рабочих характеристик систем этого диапазона.

К_u, К и К_a-диапазоны (12,0—40 ГГц). Поскольку каждый из рассматриваемых нами диапазонов имеет более высокую частоту, чем предыдущий, то, соответственно, уменьшаются физические размеры антенн и становится все труднее генерировать большую мощность излучения. Таким образом, дальность действия радиолокаторов на частотах, более высоких, чем X-диапазон, обычно меньше, чем в X-диапазоне. Военные бортовые РЛС К_u-диапазона нашли свое применение наряду с аналогичными локаторами X-диапазона. Эти частотные области являются предпочтительными, когда к РЛС предъявляются требования малого размера, но не требуется большая дальность действия. РЛС обзора летного поля, которые обычно устанавливаются на вышке здания диспетчерского пункта больших

аэропортов, работают в K_u -диапазоне прежде всего из-за лучшего пространственного разрешения, чем в X -диапазоне. В исходном K -диапазоне имеется линия поглощения водяных паров 22,2 ГГц, вызывающая ослабление, которое может быть серьезной проблемой в некоторых приложениях. Это обстоятельство было выявлено в начальный период разработки радиолокаторов K -диапазона во время Второй мировой войны и явилось причиной, по которой позже были введены K_u - и K_a -диапазоны. Сильные отражения сигналов от дождя могут ограничить возможности радиолокаторов на этих частотах.

Миллиметровые волны. Хотя эта частотная область имеет очень большую ширину, основной интерес для миллиметровой радиолокации представляют частоты вблизи 94 ГГц, где существует минимум ослабления радиоволны атмосферой, называемый *окном*. Окно — область малого затухания относительно соседних частот. Окно вблизи 94 ГГц столь же широко, как весь микроволновый диапазон. Как было отмечено ранее, для радиолокационных применений область миллиметровых волн практически начинается с 40 ГГц или даже с еще более высоких частот. Техника радиолокации миллиметровых волн и эффекты распространения в окружающей среде не просто отличаются от техники и эффектов микроволнового диапазона — они намного более ограничены внешними факторами. В отличие от микроволнового миллиметровый радиосигнал может сильно ослабляться, распространяясь в прозрачной для глаза атмосфере. Степень ослабления изменяется в пределах области миллиметровых волн. Ослабление в окне 94 ГГц фактически более высокое, чем ослабление внутри атмосферной спектральной линии поглощения водяного пара на 22,2 ГГц. Ослабление сигнала при его распространении в одном направлении на частоте поглощения кислорода 60 ГГц составляет приблизительно 12 дБ на километр, что по существу делает невозможным использование этой частоты радиолокаторами. Ослабление в дожде может быть также серьезным ограничением области миллиметровых волн.

Интерес к миллиметровым РЛС возник главным образом из-за стремлений разработчиков ответить на те вызовы, которые миллиметровый диапазон поставил перед инженерным сообществом, и их желания получить от его использования практическую пользу. Главное достоинство диапазона — возможность использовать сигналы с широкой полосой и, как следствие, высокая разрешающая способность РЛС по дальности и узкая ширина луча при небольших размерах антенны. Среди прочих достоинств — трудность использования противником средств электронного подавления и повышенная сложность перехвата частоты работающего передатчика по сравнению с более низкими частотами. В прошлом передатчики миллиметровых волн имели среднюю мощность, не превышающую нескольких сотен ватт, а обычно их мощность была намного меньше. Успехи в разработке гиротронов (глава 10) могут увеличить среднюю мощность передатчиков на несколько порядков относительно мощности типовых источников энергии миллиметрового излучения. Таким образом, требование большой мощности по отношению к миллиметровой РЛС уже не является ограничением, как это было ранее.

Лазерный локатор. Лазеры могут генерировать достаточно высокую полезную мощность в диапазоне оптических частот и в инфракрасной области спектра. Лазерным локаторам доступна широкая полоса спектра (работа очень короткими импульсами) и очень узкая ширина луча. Апертура антенны, напротив, намного меньше, чем в микроволновом диапазоне. Ослабление лазерного излучения в атмосфере и дожде очень высоко, и рабочие характеристики в сложных метеорологических условиях сильно ограничены. Шум приемника определяется главным образом квантовыми эффектами, а не тепловым шумом. По многим причинам лазерные локаторы получили ограниченное применение.

1.7. Номенклатура радиолокаторов США

Каждый вид военного электронного оборудования США, включая РЛС, имеет условное обозначение в соответствии с Объединенной системой обозначений типов электроники JETDS (Joint Electronics Type Designation System), утвержденной стандартом MIL-STD-196D. Буквенная часть обозначения состоит из букв *AN*, наклонной черты и трех дополнительных букв, специально подобранных для

Таблица 1.2. Условные обозначения JETDS, относящиеся к радиолокационным системам

Место установки (первая буква)	Тип оборудования (вторая буква)	Назначение (третья буква)
A. Пилотируемая авиация B. Подводное транспортное средство, подводная лодка D. Беспилотный летательный аппарат F. Стационарное наземное размещение G. Универсальное наземное размещение K. Амфибии M. Наземные мобильные платформы P. Портативные (носимые) S. Корабельные T. Транспортируемые наземные U. Универсальные V. Самоходные наземные транспортные средства W. Универсальное судовое (надводные и подводные суда) Z. Пилотируемая и беспилотная авиация, комбинированное	L. Электронное подавление P. Радиолокаторы S. Специального назначения или комбинированные W. Вооружение (специфическое, не отнесенное к другим категориям)	B. Бомбардировочное оборудование D. Радиопеленгаторы, средства разведки и наблюдения G. Управление огнем N. Навигационные Q. Специального назначения или комбинированные R. Приемники сигналов S. Обнаружение, измерение дальности, угловых координат, поиск целей T. Передача сигналов W. Автоматизация полетов и удаленное управление X. Идентификация и распознавание Y. Обзор (обнаружение и сопровождение целей) и управление (управление оружием и воздушным движением)

указания места установки оборудования, типа оборудования и его назначения. После трех букв стоит тире и число. Число означает номер конкретного образца оборудования, последовательно увеличивающийся для каждой отдельной комбинации букв. В табл. 1.2 приведены буквенные обозначения, относящиеся к радиолокационным системам.

За основным обозначением следует буква суффикса (*A, B, C...*), отражающая модификацию оборудования при условии сохранения взаимозаменяемости. Буква *V* в скобках, добавленная к обозначению, указывает на системы с изменяемыми характеристиками, функции которых могут различаться в связи с добавлением или удалением частей, блоков, узлов или их комбинаций. Если вслед за основным обозначением следует тире, буква *T* и номер, то оборудование предназначено для обучения. Кроме Соединенных Штатов эти обозначения могут также использоваться Канадой, Австралией, Новой Зеландией и Великобританией. Специальные группы номеров зарезервированы для этих стран. Дополнительная информация об обозначениях может быть найдена в стандарте MIL-STD-196D.

Федеральное авиационное агентство США использует следующие обозначения для РЛС управления воздушным движением:

- **ASR** (Airport Surveillance Radar) — аэродромная обзорная РЛС управления воздушным движением (УВД);
- **ARSR** (Air Route Surveillance Radar) — трассовая обзорная РЛС УВД;
- **ASDE** (Airport Surface Detection Equipment) — радиолокационное оборудование обзора летного поля;
- **TDWR** (Terminal Doppler Weather Radar) — аэроузловой доплеровский метеорологический радиолокатор.

Цифры, стоящие после буквенного обозначения, указывают порядковый номер разработки радиолокатора.

Метеорологические РЛС, разработанные Метеорологической службой США (NOAA — National Oceanic and Atmospheric Administration), обозначаются как WSR (WSR — Weather Surveillance Radar). Номер после обозначения — год начала эксплуатации РЛС. Таким образом, WSR-88D — доплеровский радиолокатор Nexrad, введенный в эксплуатацию в 1988 году. Буква *D* указывает, что это доплеровская метеорологическая РЛС.

1.8. Основные достижения радиолокации в XX веке

Приведем краткий перечень основных достижений в области радиолокационной техники и функциональных возможностей РЛС двадцатого века. Перечень приводится в хронологическом, хотя и нестрогом порядке.

- Разработка радиолокаторов ОВЧ-диапазона наземного, корабельного и авиационного базирования для целей противоздушной обороны в предшествующие годы и в течение Второй мировой войны.
- Изобретение магнетрона микроволнового диапазона и освоение техники волноводов в начале Второй мировой войны, позволивших создать РЛС микроволнового диапазона, обладавших значительно меньшими размерами и большей мобильностью.
- Разработка более ста различных моделей РЛС в лаборатории исследования излучений Массачусетского технологического института за пять лет ее существования во время Второй мировой войны, заложившая основы техники микроволновых РЛС.
- Теория радиолокационного обнаружения Маркума.
- Изобретение и разработка усилителей на клистронах и ЛБВ, обеспечивших большую мощность наряду с хорошей стабильностью.
- Использование доплеровского сдвига частоты для обнаружения сигналов от движущихся целей на фоне мешающих отражений существенно большей интенсивности.
- Разработка РЛС для управления воздушным движением.
- Технология сжатия сложных сигналов.
- Разработка моноимпульсной РЛС сопровождения с высокой точностью слежения и лучшей устойчивостью к мерам радиоэлектронного противодействия, чем предшествующие РЛС сопровождения.
- РЛС с синтезированной апертурой, обеспечивающая получение подробных изображений поверхности Земли и расположенных на ней объектов.
- Бортовая РЛС обзора с системой СДЦ, позволяющая обнаруживать цели на больших дальностях и следить за ними при наличии пассивных помех.
- Стабильные компоненты и подсистемы, а также антенны с очень низким уровнем боковых лепестков, позволившие создать импульсно-доплеровские РЛС режима ВЧП (используемые в системе AWACS) с эффективным подавлением пассивных помех.
- Загоризонтная РЛС декаметрового диапазона, увеличившая на порядок дальность обнаружения самолетов и судов.
- Цифровая обработка, появившаяся в начале 1970-х годов, оказавшая очень существенное влияние на улучшение характеристик РЛС.
- Автоматическое обнаружение и слежение в обзорных РЛС.
- Серийное производство РЛС с фазированными антенными решетками с электронным управлением лучом.
- РЛС с инверсной синтезированной апертурой (ИРСА), которая обеспечивает разрешение, необходимое для распознавания типов судов.
- Доплеровская метеорологическая РЛС.
- РЛС космического базирования, предназначенные для локации планет, таких как Венера.
- Точное компьютерное вычисление эффективной площади отражения сложных целей.
- Многофункциональная бортовая военная РЛС, имеющая относительно малые размеры и небольшой вес, располагающаяся в носовой части самолета-истребителя

и способная выполнять большое количество различных функций в режимах воздух — воздух и воздух — поверхность.

Какие из достижений в области радиолокации являются более важными — всегда спорный вопрос. Кто-то мог бы составить другой список. Не все существенные достижения в области радиолокации были включены в приведенный перечень. Он, возможно, был бы намного длиннее и, возможно, включал бы множество примеров, относящихся к тематике каждой из других глав этой книги. Однако и этот список в достаточной мере отражает характер достижений, которые были важны для улучшения характеристик РЛС.

1.9. Применения радиолокации

Военные применения. Радиолокатор был изобретен в 1930-х годах, что было обусловлено необходимостью защиты от тяжелых военных бомбардировщиков. Радиолокаторы предназначались прежде всего для военного применения, ставшего, вероятно, самой важной областью их использования и стимулом большинства усовершенствований, которые в дальнейшем нашли применение и в гражданских РЛС.

Основным назначением военных радиолокаторов наземного, морского и авиационного базирования стала противовоздушная оборона (ПВО). Без использования РЛС успешное осуществление ПВО было практически невозможно. РЛС ПВО используются для обзора воздушного пространства на больших дальностях, обнаружения на близких расстояниях низколетящих целей, внезапно появляющихся из-за возвышенностей, для управления оружием, наведения ракет, опознавания по данным запроса и распознавания типа целей и для оценки потерь, причиненных боевыми действиями. Дистанционный радиовзрыватель во многих видах оружия также является примером радиолокатора. Отличным критерием успеха РЛС ПВО являются большие суммы денег, которые были потрачены на методы снижения эффективности таких радиолокаторов. Они включают радиоэлектронное подавление и другие аспекты радиоэлектронной борьбы, противорадиолокационные ракеты, наводящиеся на средства ПВО, самолеты и суда с малой ЭПО. РЛС также используются военными для разведки, наведения оружия на наземные или морские цели и для обзора пространства над поверхностью моря.

На поле боя от РЛС требуется выполнить функции обзора воздушного пространства (включая слежение за самолетами, вертолетами, ракетами и беспилотными летательными аппаратами), управления оружием, перехвата воздушных целей, определения местоположения оружия противника (минометов, артиллерии и ракетных установок), обнаружения вторжений и управления воздушным движением.

Использование РЛС для защиты от баллистических ракет вызывает интерес со времени появления угрозы от них в конце 1950-х годов. Большие дальности, высокие сверхзвуковые скорости и сравнительно малый размер целей, какими являются баллистические ракеты, создают серьезные проблемы для разработчиков РЛС. В этом случае отсутствуют естественные мешающие отражения, как при защите от воздушного нападения, но баллистические ракеты могут появиться при наличии большого количества ложных целей и других контрмер, которые противник может использовать, чтобы скрыть вход в атмосферу летательного аппарата, несущего боеголовку. При защите от баллистических ракет более важной становится задача распознавания, а не обнаружение и сопровождение. Необходимость предупреждения о приближении баллистических ракет привела к появлению множества РЛС различных типов, выполняющих эту функцию. Аналогично были развернуты РЛС, предназначенные для обнаружения и слежения за спутниками.

Родственной задачей для гражданских РЛС является обнаружение и перехват воздушного наркотрафика. Есть несколько типов РЛС, выполняющих эту задачу, включая загоризонтные РЛС декаметрового диапазона.

Дистанционное исследование окружающей среды. Основное применение в этой категории находят метеорологические РЛС, такие как радиолокатор Nexrad,

результаты работы которого часто демонстрируют в телевизионных прогнозах погоды. Существуют также РЛС вертикального зондирования атмосферы, которые определяют скорость ветра и его направление как функцию высоты, обнаруживая очень слабое радиолокационное эхо от ясного неба. В районе аэропортов располагаются метеорологические РЛС, использующие эффект Доплера (TDWR). Эти РЛС способны предупреждать об опасном погодном эффекте, известном как *сдвиг ветра*, который может сопровождать грозы. Обычно в носовой части как малых, так и больших самолетов есть специально разработанный метеорологический радиолокатор предупреждения о грозе и другой опасной погоде.

Другим примером РЛС, успешно применяемой для дистанционного зондирования, является бортовой спутниковый высотомер, который измеряет форму *геоида* (средний уровень моря, неодинаковый для разных районов земного шара) в различных точках мирового океана с исключительно высокой точностью. В прошлом предпринимались попытки использования РЛС для определения влажности почвы и для оценки состояния урожаев в сельском хозяйстве, но они не обеспечивали удовлетворительную точность. Спутниковые или авиационные РЛС картографирования используются для оказания помощи судам в осуществлении навигации в северных морях, покрытых льдом, так как РЛС может определить тип льда, который легче преодолеть судну.

Управление воздушным движением. Высокий уровень безопасности современного воздушного сообщения отчасти обеспечивается успешным применением РЛС для эффективного, рационального и безопасного управления воздушным движением. Большинство аэропортов используют наземные обзорные РЛС (ASR) для наблюдения за воздушным движением в окрестностях аэропорта. Такие РЛС также предоставляют информацию о погоде в близлежащих районах, что позволяет скорректировать курс самолета для предотвращения его попадания в плохие метеоусловия. В больших аэропортах также имеется РЛС, называемая радиолокатором (оборудованием) обзора летного поля (ASDE — Airport Surface Detection Equipment), который используется для наблюдения и безопасного управления передвижением самолетов и транспортных средств аэропорта на земле. Для управления воздушным движением на пути от одного аэропорта в другой во всем мире используются трассовые РЛС дальнего радиуса действия (ARSR — Air Route Surveillance Radar). Система управления воздушным движением с радиоответчиками (ATCRBS — Air Traffic Control Radar Beacon System) не является радиолокационной и используется для опознавания самолетов во время полета¹. Здесь используется технология, аналогичная радиолокационной, и аппаратура опознавания, основанная на системе «свой—чужой» (IFF), которая применяется в военной авиации.

Прочие применения. Очень большое значение имело использование радиолокации для получения информации, которая не могла быть получена любыми другими методами. Таким применением было исследование поверхности планеты Венера с помощью РЛС картографирования, способной «видеть» изображение поверхности планеты, находящейся под постоянным облачным покровом. Одной из самых широко используемых и наименее дорогих РЛС является гражданская судовая РЛС, применяемая во всем мире для осуществления безопасной навигации больших и малых судов. Некоторые читатели, несомненно, сталкивались с полицией на автомагистралях, использующей доплеровские РЛС непрерывного излучения для измерения скорости автомобиля. РЛС подповерхностного зондирования используется, чтобы обнаружить подземные коммуникации, а также полицейскими для нахождения закопанных предметов. Археологи используют ее, чтобы определить, где следует искать артефакты под землей. РЛС оказывается полезной как для орнитологов, так и для энтомологов для лучшего понимания перемещений птиц и насекомых. Было также продемонстрировано, что РЛС может обнаружить просачивание газа, которое часто происходит над залежами нефти и газа [10].

¹ В отечественной литературе эти системы носят название вторичных радиолокаторов или РЛС с активным ответом. — *Прим. пер.*

1.10. Концептуальный подход к проектированию радиолокаторов

Существуют различные аспекты проектирования РЛС. Но прежде чем новая РЛС, не существовавшая ранее, может быть создана, должна быть разработана *концепция* будущей системы, которая станет основой для последующего фактического проектирования. Основой концепции проекта являются требования к РЛС, которые удовлетворяют ее заказчика или эксплуатационщика. Результатом разработки концепции проекта должно стать появление набора характеристик радиолокатора, тех самых, что входят в основное уравнение радиолокации и связанные с ним формулы, а также общих характеристик подсистем (передатчика, антенны, приемника, устройств обработки сигналов и т.д.), которые должны быть реализованы. Уравнение радиолокатора используется в качестве важного инструмента для анализа альтернатив и принятия сбалансированных решений разработчиком РЛС и для выработки подходящей концепции, удовлетворяющей необходимым требованиям. В этом разделе кратко описан подход к концептуальному проектированию нового радиолокатора, которым может руководствоваться инженер-разработчик. Не существует строго установленных процедур концептуального проектирования. Каждая компания, разрабатывающая РЛС, и каждый инженер-разработчик вырабатывают его или ее собственный стиль. То, что здесь описано, является кратким изложением одного из подходов к концептуальному проектированию РЛС.

Общее руководство. Следует отметить, что существуют по крайней мере два пути проектирования новой РЛС для некоторого конкретного применения. Один из методов основан на использовании преимуществ какого-либо нового изобретения, нового технического решения, нового устройства или нового знания. В качестве примера можно привести изобретение магнетрона в начале Второй мировой войны. После появления магнетрона облик новых радиолокаторов стал отличаться от предшественников. Другой и, вероятно, более общепринятый метод разработки концепции РЛС должен начинаться с изучения задач, которые новый радиолокатор должен выполнять, исследовать различные пути, позволяющие достичь требуемых показателей, тщательно оценить каждый из возможных путей и затем выбрать тот, который лучше всего удовлетворяет требованиям заказчика и финансовым ограничениям. Короче говоря, разработка концепции могла бы состоять из следующих шагов:

- *Описание поставленных задач и требований, которые должны быть выполнены.* Это делается с точки зрения заказчика или пользователя радиолокатора.
- *Взаимодействие между заказчиком и системным инженером.* Осуществляется в целях проработки альтернативных решений, о которых заказчик мог не знать, но которые могли бы позволить получить лучший результат без чрезмерного увеличения стоимости или риска. К сожалению, диалог между потенциальным пользователем РЛС и системным инженером не всегда происходит на равных.
- *Поиск и анализ возможных решений.* Этот этап включает осознание преимуществ и ограничений различных возможных решений.
- *Выбор оптимального или близкого к оптимальному решений.* Во многих инженерных решениях оптимальное не означает наилучшее, так как наилучшее может быть нереализуемым или недостижимым в данное время. Оптимальное, как здесь принято, означает наилучшее с учетом ряда имеющихся ограничений. Инженерная разработка часто завершается достижением почти оптимального, но не оптимального решения. Выбор предпочтительного решения должен быть основан на строго определенном критерии.
- *Детализированное описание выбранного подхода.* На этом этапе конкретизируются характеристики РЛС и тип подсистем, входящих в ее состав.
- *Анализ и оценка предлагаемого проекта.* Это делается для проверки правильности выбранного метода.

Включившись в этот процесс, можно зайти в тупик и снова начинать с нуля, иногда не раз. Необходимость снова начинать с нуля не является чем-то необычным в процессе новой разработки.

Для разработки проекта РЛС невозможно предложить однозначный набор инструкций. Если бы это было возможно, то проект радиолокатора мог бы полностью быть выполнен компьютером. Так как обычно полная информация отсутствует, то для успешного завершения большинству инженерных разработок в определенный момент требуются независимая оценка и экспериментальная проверка.

Уравнение радиолокатора в концепции проекта. Уравнение радиолокатора служит основой при разработке концепции проекта РЛС. Некоторые параметры этого уравнения определяются функциями, которые радиолокатор должен выполнять. Другие могут быть в одностороннем порядке выбраны заказчиком, но это должно быть сделано с осторожностью. Именно заказчик обычно определяет тип целей и особенности окружающей обстановки, в которой работает радиолокатор, ограничения на размер и вес, форму представления радиолокационной информации и любые другие накладываемые ограничения. Эти сведения используются инженером — разработчиком РЛС для определения эффективной площади отражения цели, периода обзора, точности измерения дальности и угловых координат, удовлетворяющих требованиям заказчика. На некоторые параметры, такие как коэффициент усиления антенны, могут оказывать влияние несколько условий или требований. Например, на определение ширины луча антенны могут влиять точность слежения, требования по угловому разрешению целей, близко расположенных друг к другу, максимальный размер, который может иметь антенна с учетом места установки РЛС, необходимость обеспечения требуемой дальности действия радиолокатора и выбора его рабочей частоты. Частота, на которой работает радиолокатор, обычно определяется многими параметрами, включая допустимость использования определенного частотного диапазона. Рабочая частота может быть последним из выбираемых параметров после того, как были определены компромиссные значения других параметров.

Литература

1. IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms, 4th Ed. New York: IEEE, 1988.
2. M. I. Skolnik, G. Linde, and K. Meads. Senrad: an advanced wideband air-surveillance radar, IEEE Trans., vol. AES-37, pp. 1163—1175. October 2001.
3. M. I. Skolnik. Introduction to Radar Systems, New York: McGraw-Hill, 2001, Fig. 2.6.
4. F. E. Nathanson. Radar Design Principles, New York: McGraw-Hill, 1991. Fig. 2.2.
5. IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands, IEEE Std. 521—2002.
6. Описание радиолокационных диапазонов частот можно найти в «FCC Online Table of Frequency Allocations», 47 C.F.R. § 2.106.
7. Performing electronic countermeasures in the United States and Canada, U.S. Navy OPNAVINST 3430.9B, October 27, 1969. Similar versions issued by the U.S. Air Force, AFR 55-44; U.S. Army, AR 105-86; and U.S. Marine Corps, MCO 3430.1.
8. A. Zachevitsky, VHF (metric band) radars from Nizhny Novgorod Research Radiotechnical Institute, IEEE AES Systems Magazine, vol. 15, pp. 9—14, June 2000.
9. Anonymous, AWACS vs. E2C battle a standoff, EW Magazine, p. 31, May/June 1976.
10. M. Skolnik, D. Hemenway, and J. P. Hansen. Radar detection of gas seepage associated with oil and gas deposits, IEEE Trans, vol. GRS-30, pp. 630—633. May 1992.