



Радиолокация для всех

2-е ИЗДАНИЕ

под редакцией В.С. Вербы



МОСКВА 2024

УДК 621.396.96

ББК 32.95

P15

P15 Радиолокация для всех

2-е издание

В.С. Верба, К.Ю. Гаврилов, А.Р. Ильчук, Б.Г. Татарский, А.А. Филатов;

под ред. В.С. Вербы. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2024. –560 с.

ISBN 978-5-94836-691-3

Представленный в научно-популярной книге материал можно назвать начальным курсом по радиолокации. В издании рассмотрены основные физические и теоретические вопросы радиолокации, принципы построения радиолокационных систем и основные области их практического использования. Кроме того, рассмотрены перспективные вопросы развития радиолокации в виде радиофотонных систем и исторические аспекты становления отечественной и зарубежной радиолокации. Рассмотренные в книге примеры типовых радиолокаторов и области их применений не исчерпывают весь возможный диапазон использования радиолокационной техники и принципов получения информации радиолокационными методами в повседневной жизни человека.

Изложение материала ведется в форме беседы специалиста в области радиолокации – профессора кафедры радиолокации и студента, мало знакомого с радиотехникой и ее областью радиолокации.

Книга ориентирована в первую очередь на выпускников школ и студентов младших курсов технических вузов, может быть интересна и для студентов более старших курсов радиотехнических факультетов, а также для всех интересующихся радиолокацией.

УДК 621.396.96

ББК 32.95

© Верба В.С., Гаврилов К.Ю., Ильчук А.Р., Татарский Б.Г., Филатов А.А., 2024

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2024

ISBN 978-5-94836-691-3

Содержание

Предисловие ко второму изданию	8
Введение	9
Глава 1. Общие сведения о радиолокации	11
1.1. Основные понятия радиолокации и типы радиолокационных систем	11
1.2. Отличительные особенности функционирования радиолокационных систем	24
1.3. Типовая структура радиолокационной системы	27
Литература	30
Глава 2. Физические основы радиолокации	32
2.1. Основные закономерности распространения радиоволн, используемые в радиолокации при обнаружении целей и измерении их координат	34
2.2. Методы измерения координат и параметров движения целей	46
2.2.1. Методы измерения расстояний	46
2.2.2. Методы измерения угловых координат	53
2.2.3. Измерение относительной скорости движения цели	65
Литература	68
Глава 3. Объекты радиолокационного наблюдения	69
3.1. Особенности отражения радиоволн объектами радиолокационного наблюдения	69
3.2. Типы радиолокационных целей	72
3.3. Эффективная поверхность отражения (рассеяния) радиолокационных целей	76
3.4. Радиолокационная заметность целей и пути ее снижения	81
Литература	87
Глава 4. Обнаружение объектов	88
4.1. Основное содержание задачи обнаружения радиолокационных целей	88
4.2. Устройства обработки радиолокационного сигнала, решающие задачу обнаружения наблюдаемых целей	93
4.3. Определение основных показателей обнаружения радиолокационных целей	101
4.4. Характеристики обнаружения радиолокационных устройств обнаружения	105
Литература	108
Глава 5. Разрешение объектов радиолокационного наблюдения	109
5.1. Что такое разрешающая способность радиолокационной системы и как она определяется	109

5.2. Оценка показателей разрешающей способности радиолокационной системы.....	116
5.2.1. Связь разрешающей способности РЛС по шкале дальности с параметрами зондирующего сигнала.....	116
5.2.2. Связь разрешающей способности РЛС по шкале скорости с параметрами зондирующего сигнала.....	123
5.2.3. Связь разрешающей способности РЛС по угловым координатам с параметрами ее антенной системы.....	126
5.3. Реальная разрешающая способность радиолокационной системы.....	129
Литература.....	131
Глава 6. Точность измерения координат объектов наблюдения.....	132
6.1. Извлечение информации о координатах и параметрах движения наблюдаемых объектов.....	132
6.2. Влияние помех на процесс оценивания параметров принимаемых радиолокационных сигналов.....	134
6.3. Взаимосвязь точности измерения координат и параметров движения целей с характеристиками и параметрами РЛС.....	138
6.4. Устройства, обеспечивающие формирование оценки параметров радиолокационного сигнала.....	144
6.5. Основные этапы решения задачи фильтрации параметров радиолокационного сигнала.....	148
Литература.....	151
Глава 7. Радиолокационные сигналы и их формирование.....	152
7.1. Описание радиолокационных сигналов.....	152
7.2. Принципы формирования зондирующих сигналов.....	167
7.3. Особенности конструктивного исполнения генераторов и усилителей СВЧ-диапазона.....	173
7.4. Формирование требуемой структуры зондирующих сигналов.....	178
Литература.....	183
Глава 8. Преобразование радиолокационных сигналов в радиоволну. Радиолокационный сигнал как электромагнитная волна.....	184
8.1. Физические основы преобразования радиолокационных сигналов в электромагнитную волну.....	184
8.2. Поляризационные свойства электромагнитных волн.....	191
8.3. Типы антенных устройств РЛС.....	193
8.4. Основные характеристики антенных устройств радиолокационных систем.....	205
8.5. Антенные системы современных и перспективных РЛС.....	211
Литература.....	214
Глава 9. Прием и обработка радиолокационных сигналов.....	216
9.1. Выделение полезной информации из радиолокационного сигнала.....	216



9.1.1. Радиолокационный приемник как основной элемент выделения полезной информации.....	217
9.1.2. Типы радиолокационных приемников.....	219
9.2. Основное содержание процедуры обработки радиолокационного сигнала.....	223
9.3. Характеристики и параметры радиолокационных приемников.....	224
9.4. Особенности некогерентной и когерентной обработки радиолокационных сигналов.....	228
Литература.....	231
Глава 10. Цифровая обработка радиолокационных сигналов.....	232
10.1. Общие сведения о цифровой обработке радиолокационных сигналов.....	232
10.1.1. Способы реализации цифровой обработки радиолокационных сигналов.....	234
10.1.2. Достоинства и недостатки цифровой обработки.....	237
10.2. Особенности преобразования радиолокационного сигнала в цифровой вид.....	241
10.3. Выделение полезной информации из цифрового сигнала.....	244
10.4. Что такое цифровой фильтр?.....	251
10.5. Типы цифровых радиолокационных приемников.....	252
Литература.....	256
Глава 11. Обработка радиолокационных сигналов, отраженных от подвижных объектов.....	257
11.1. Особенности радиолокационного наблюдения подвижных объектов.....	257
11.2. Выделение информации о движении цели.....	261
11.3. Варианты построения когерентно-импульсных РЛС, обеспечивающих выделение сигналов движущихся целей.....	266
11.4. Селекция движущихся целей с помощью устройств череспериодной компенсации.....	271
11.5. Фильтровые системы селекции движущихся целей.....	277
Литература.....	279
Глава 12. Обобщенная структура радиолокационной системы.....	280
12.1. Особенности структуры построения прямо-передающих трактов когерентных и некогерентных РЛС.....	280
12.2. Система обработки радиолокационного сигнала типового радиолокатора.....	291
12.3. Представление получаемой информации о целях в современных радиолокаторах.....	293
Литература.....	301
Глава 13. Радиолокационные системы управления воздушным движением.....	302
13.1. Что такое системы управления воздушным движением?.....	302

13.2. Состав радиолокационного оборудования системы управления воздушным движением.....	304
13.3. Требования, предъявляемые к радиолокационным системам управления воздушным движением.....	307
13.4. Радиолокационные системы управления воздушным движением.....	312
Литература.....	340
Глава 14. Наземные и корабельные РЛС.....	341
14.1. Типы наземных и корабельных радиолокационных систем.....	341
14.2. Особенности решения задачи мониторинга воздушно-космического пространства.....	343
14.3. Наблюдение радиолокационных целей, скрытых за горизонтом.....	346
14.4. Общие принципы построения и функционирования надгоризонтных РЛС.....	348
Литература.....	372
Глава 15. Бортовые авиационные радиолокационные системы мониторинга воздушного пространства.....	373
15.1. Особенности функционирования бортовых авиационных радиолокационных систем.....	373
15.2. Перехват воздушных целей как процедура обнаружения объектов наблюдения и измерения их координат.....	375
15.3. Основные задачи и характеристики бортовых авиационных радиолокационных систем комплексов перехвата.....	379
15.4. Общие тенденции построения бортовых РЛС комплексов перехвата и прицеливания.....	386
15.5. Решение задачи обнаружения воздушных целей, наблюдаемых на фоне мешающих отражений, бортовой РЛС авиационного носителя.....	390
15.6. Структура бортовой РЛС комплекса перехвата.....	410
Литература.....	414
Глава 16. Радиолокационные системы дистанционного зондирования земной поверхности.....	416
16.1. Типы радиолокационных систем дистанционного зондирования земли и особенности их работы.....	416
16.2. Обработка радиолокационного сигнала при формировании радиолокационного изображения наблюдаемой поверхности в режиме реального луча.....	423
16.3. Повышение разрешающей способности РЛС обзора земли в азимутальной плоскости на основе принципа синтеза апертуры антенны.....	426
16.4. Обработка пространственно-временного сигнала в радиолокационной системе с режимом синтеза апертуры антенны.....	431

16.5. Формирование радиолокационного изображения участка наблюдаемой поверхности в режимах синтеза апертуры антенны.....	438
16.6. Разрешающая способность РЛС с режимом синтеза апертуры антенны.....	443
16.7. Выделение движущихся наземных целей и структура построения современной РЛС с режимом синтеза апертуры антенны.....	446
Литература.....	450
Глава 17. Метеорологические радиолокационные системы.....	451
17.1. Особенности функционирования метеорологических радиолокационных систем.....	451
17.2. Характерные особенности метеорологических объектов радиолокационного наблюдения.....	456
17.3. Типы метеорологических радиолокаторов.....	459
Литература.....	464
Глава 18. Другие области применения радиолокационных систем.....	466
18.1. Дистанционная диагностика состояния организма человека.....	467
18.2. Области применения биорадиолокации.....	471
18.3. Активные и пассивные радиолокационные системы в текущей жизни человека.....	473
Литература.....	489
Глава 19. Радиолокационные фотонные системы.....	490
19.1. Общие сведения о фотонике.....	490
19.2. Недостатки электронных технологий.....	491
19.3. Особенности применения оптических технологий в радиолокационных системах.....	493
19.4. Структурная схема полностью оптической радиофотонной РЛС.....	495
19.5. Основные элементы радиофотонной РЛС.....	500
Литература.....	510
Глава 20. История развития радиолокации.....	511
Заключение.....	543
Послесловие ко второму изданию.....	544
К читателю.....	545
Послесловие. Профессор В. С. Верба.....	546
Сведения об авторах.....	549
Список сокращений.....	550
Предметный указатель.....	552

ГЛАВА I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОЛОКАЦИИ



Уважаемый профессор! В средствах массовой информации часто упоминаются такие слова, как «радиолокационные системы», «радиолокационные комплексы». Не могли бы Вы пояснить, что это за системы и, в первую очередь, что такое радиолокация?

I.1. Основные понятия радиолокации и типы радиолокационных систем



Начну с Вашего последнего вопроса. Термин «радиолокация» происходит от двух латинских слов: «*radiare*», которое означает «*излучать*», и «*locatio*» — «*размещение, расположение*». Сложение этих двух слов позволяет трактовать, что радиолокация занимается определением местоположения различных объектов по излученным от них сигналам. Это самое общее толкование слова «**радиолокация**». Более точной формулировкой будет следующая. Под **радиолокацией** понимают область радиоэлектроники, которая занимается разработкой методов и технических устройств (систем), предназначенных для обнаружения и определения координат и параметров движения различных объектов с помощью радиоволн. С помощью радиолокации обеспечивается решение широкого круга задач, связанных с обнаружением воздушных и наземных объектов (целей), навигацией (обеспечением вождения) различных судов (воздушных и морских), с управлением воздушным и морским движением, управлением средствами ПВО, с обеспечением безопасности движения транспортных средств, с предсказанием возникновения погодных явлений, а также с поражением наземных (морских) и воздушных объектов в любое время суток и в любых метеоусловиях. Помимо этого, основываясь на принципах радиолокации, решаются задачи, связанные с диагностикой организма человека. Как видите, спектр задач, решаемых радиолокацией, достаточно широк, несмотря на то, что радиолокация сравнительно молодое научное направление. Первые упоминания о возможности использования радиоволн для обнаружения различных объектов относятся ко второй половине 90-х годов XIX столетия. В частности, годом рождения радиолокации в России считается 1897-й,

когда изобретатель радио Александр Степанович Попов, проводя свои эксперименты в открытом море по установлению связи с помощью беспроводного телеграфа, обнаружил эффект отражения радиоволн. Было это так.

Летом 1897 года под руководством А. С. Попова в Финском заливе проводились испытания радиоаппаратуры, изобретенного им беспроводного телеграфа. В испытаниях принимали участие два морских судна — транспорт «Европа» и крейсер «Азия». На данных судах были установлены приемная и передающая аппаратура, и между ними поддерживалась непрерывная радиосвязь. Неожиданно между кораблями прошел линейный крейсер «Лейтенант Ильин». Связь между кораблями прервалась. Через некоторое время, когда «Лейтенант Ильин» прошел линию, соединяющую корабли, связь возобновилась. Это «затенение» было замечено испытателями, и в отчете А. С. Попова по результатам экспериментов было отмечено, что появление каких-либо препятствий между передающей и приемной позициями может быть обнаружено как ночью, так и в тумане. Так родилась радиолокация.



Таким образом, радиолокация — это область радиотехники, которая занимается разработкой методов и систем, предназначенных для обнаружения различных объектов и измерения их координат и параметров движения с помощью радиоволн.

Для того чтобы были понятны последующие мои объяснения, рассмотрим основные термины и определения, которые используются в радиолокации.

Процесс просмотра заданной области пространства в целях получения информации о наличии в ней различных объектов и определения их параметров с помощью радиоволн называют *радиолокационным наблюдением*. Объекты же радиолокационного наблюдения называют *радиолокационными целями* или просто *целями*. Примерами радиолокационных целей могут служить: корабли, самолеты, танки, автомашины, люди, птицы и т. д.

Выполнение частной задачи радиолокационного наблюдения, например обнаружения цели или измерения дальности до нее, осуществляется с помощью одноименных *радиолокационных устройств* — радиолокационного обнаружителя или радиолокационного измерителя дальности (радиолокационного дальномера) соответственно. Совокупность радиолокационных устройств, предназначенных для решения какой-либо общей задачи, например обеспечения перехвата воздушной цели либо поражения наземной цели и т. п., называется *радиолокационной системой* (РЛС) или *радиолокатором*. Техническая реализация такой системы обычно именуется *радиолокационной станцией*, а в англоязычной литературе — радаром.

Источником информации о цели в радиолокации служит *радиолокационный сигнал*, который может быть сформирован либо путем отражения (вторичного излучения) электромагнитных колебаний (ЭМК) от цели, либо переизлучения (ретрансляции) данных колебаний целью, либо излучения колебаний самой целью. Электромагнитные колебания, которые используют для облучения цели или заданной области пространства, обычно называют *зондирующими колебаниями* или *зондирующим сигналом*.

Операции, выполняемые в ходе радиолокационного наблюдения над принимаемыми *радиолокационными сигналами* для извлечения информации о целях, называют *обработкой* радиолокационных сигналов. Обработка является составной частью процесса *радиолокационного приема*, который, помимо выше-названной процедуры, включает также процедуры преобразования радиолокационного сигнала, не связанные с извлечением информации о цели.

В зависимости от способов формирования радиолокационного сигнала различают следующие типы РЛС или методы радиолокации.

1. *Активные РЛС, или активный метод радиолокационного наблюдения.* При данном методе с помощью РЛС формируется радиосигнал, который излучается в направлении на цель (зондирующий сигнал). В результате взаимодействия зондирующего сигнала с целью образуется отраженный сигнал, который поступает на вход приемника РЛС и затем обрабатывается в данном устройстве в целях извлечения информации о наблюдаемой цели (рис. 1.1). Данный метод радиолокационного наблюдения получил наибольшее распространение в современных РЛС. Необходимо заметить, что при использовании активного метода устройство формирования радиосигнала (передатчик) и приемник РЛС находятся в одной точке пространства.

2. *Активные РЛС с активным ответом, или активный метод радиолокации с активным ответом.* Как и в предыдущем случае, с помощью РЛС формируется радиосигнал, который излучается в направлении на цель (зондирующий сигнал). Однако радиолокационный сигнал формируется не в результате отражения излучаемых ЭМК целью, а за счет переизлучения их с помощью

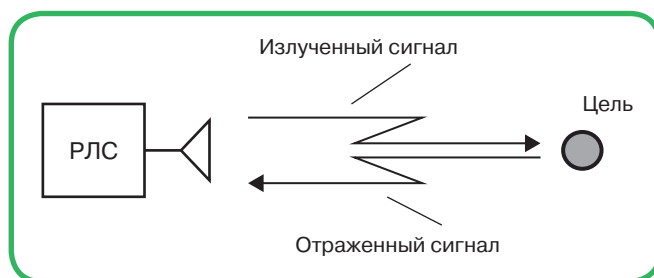


Рис. 1.1. Графическая иллюстрация принципа активной радиолокации

специального устройства, именуемого ответчиком-ретранслятором (рис. 1.2). Данный метод широко используется в системах определения государственной принадлежности наблюдаемых объектов, управления воздушным движением (УВД), а также в радионавигационных системах, например в радиотехнических системах ближней навигации при определении дальности до радиомаяка (устройство, излучающее радиосигналы, местоположение которого известно наблюдателю).

3. *Полуактивный метод радиолокации, или полуактивные РЛС.* При использовании данного метода радиолокационный сигнал формируется, как при активном методе путем отражения зондирующих ЭМК от цели. Но передающее устройство, формирующее зондирующие ЭМК (передатчик (ПРД) РЛС), и устройство, принимающее отраженные сигналы (приемник (ПРМ) РЛС), разнесены в пространстве (рис. 1.3). Данный метод, например, широко используется при наведении управляемых ракет класса «воздух — воздух» на поражаемые воздушные цели, а также в многопозиционных РЛС, под которыми обычно понимают совокупность разнесенных в пространстве нескольких устройств

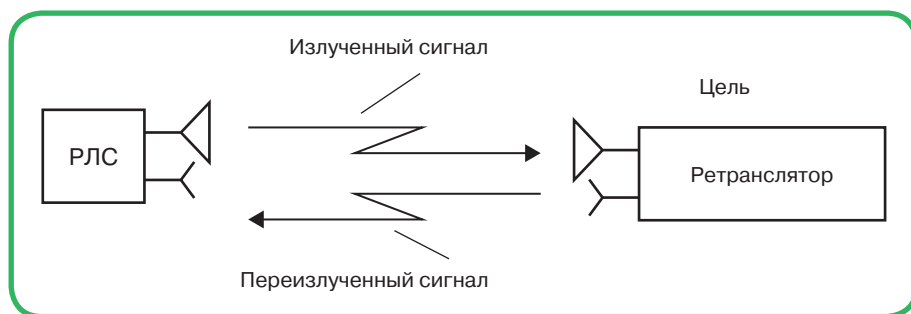


Рис. 1.2. Графическая иллюстрация принципа активной радиолокации с активным ответом

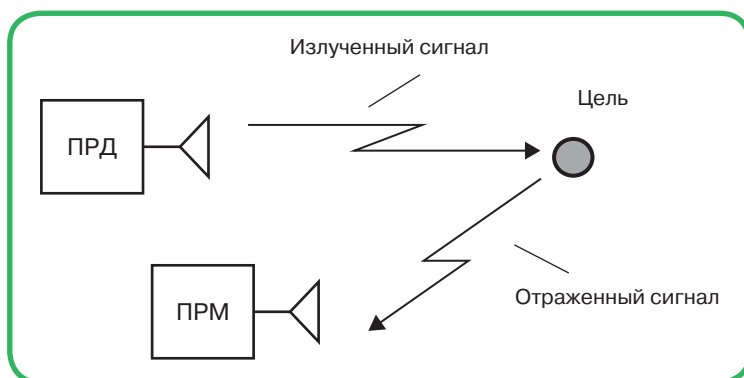


Рис. 1.3. Графическая иллюстрация принципа полуактивной радиолокации

формирования зондирующих сигналов (передатчиков) и устройств приема отраженных сигналов (приемников).

4. *Пассивная радиолокация, или пассивный метод радиолокационного наблюдения*, основан на приеме собственного радиоизлучения целей. Отличительной особенностью таких систем является наличие в их составе только приемного устройства (приемника (ПРМ)), состоящего из приемной антенны и собственно приемника (рис. 1.4). Отсутствие необходимости формирования зондирующего колебания делает такие системы высокопомехозащищенными. Данные РЛС широко применяются при пеленгации радиоизлучающих систем противника, например РЛС, входящих в систему управления ПВО противоборствующей стороны.

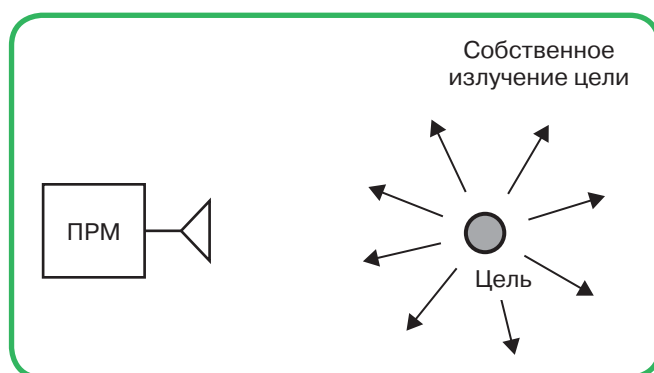


Рис. 1.4. Графическая иллюстрация принципа пассивной радиолокации



Таким образом, радиолокационные системы могут быть активными, полуактивными, активными с активным ответом и пассивными.

В ходе радиолокационного приема поступивших на вход ПРМ РЛС электромагнитных колебаний от цели, как правило, необходимо решить следующие задачи:

1) обнаружить цель, т.е. установить факт наличия полезного сигнала $s(t)$, отраженного от цели, в принимаемом колебании $y(t)$. Прием данного колебания $y(t)$, как правило, сопровождается различного рода помехами $n(t)$, природа происхождения которых может быть самой разнообразной (внутренний шум приемника РЛС, отражения от облака пассивных отражателей, искусственно организованные помехи и т.п.). Помехи относятся к категории так называемых случайных сигналов, предсказать изменение которых во времени заранее невозможно. В этой связи при действии помех заранее неизвестно, есть ли полезный сигнал, например отраженный от цели, в принятом приемником РЛС

колебании. При отсутствии помех любой сигнал, который появляется на входе приемника РЛС, будет восприниматься как полезный. В этой связи при решении задачи обнаружения, как, впрочем, и всех перечисленных выше, используется специальный математический аппарат, основанный на теории вероятностей и математической статистике;

2) разрешить радиолокационные цели, т. е. разделить обнаружить несколько одновременно существующих в принимаемом колебании $y(t)$ отраженных от целей сигналов с близкими, но различающимися параметрами, или измерить значения параметров данных сигналов.

Разрешение имеет смысл при наличии нескольких целей в зоне наблюдения РЛС;

3) измерить значения параметров α полезного сигнала $s(t, \alpha)$ в целях получения информации о координатах и параметрах движения целей. Такими параметрами чаще всего являются время запаздывания t_d , доплеровское смещение частоты $f_{дп}$ и направление прихода γ принимаемой электромагнитной волны (ЭМВ), по которому оцениваются угловые координаты наблюдаемой цели.

Дополнительными задачами радиолокационного наблюдения являются различение и распознавание целей. Если решение первой задачи позволяет определить один из классов целей (воздушные, морские или наземные цели), то решение второй позволяет определить тип цели в заданном классе (самолет, вертолет и т. д.). Решение данных задач основывается на анализе всего объема информации, который содержится в радиолокационном сигнале. Эффективное решение указанных задач возможно при использовании всех характеристик, описывающих принимаемые радиолокационные сигналы, — временных, пространственных и поляризационных.

Все существующие РЛС можно разделить на следующие основные группы. В первую группу входят РЛС класса «воздух — воздух», основной задачей которых является обнаружение, измерение координат и параметров движения воздушных целей. К данным РЛС относятся, например, радиолокационные станции перехвата и прицеливания, устанавливаемые на самолетах-истребителях (фото 1.1), либо авиационные РЛС дальнего радиолокационного обнаружения воздушных целей (фото 1.2).

Вторую группу составляют РЛС класса «воздух — поверхность». Данные РЛС служат для получения радиолокационного изображения (РЛИ) земной поверхности либо информации о координатах и параметрах движения наземных целей. К данным системам относятся, например, РЛС обзора Земли (фото 1.3), которые обеспечивают получение радиолокационного изображения поверхности Земли и информации о координатах и параметрах движения наземных целей, либо РЛС обеспечения безопасности полетов на малых и предельно малых высотах, которые позволяют получать информацию о структуре рельефа подстилающей

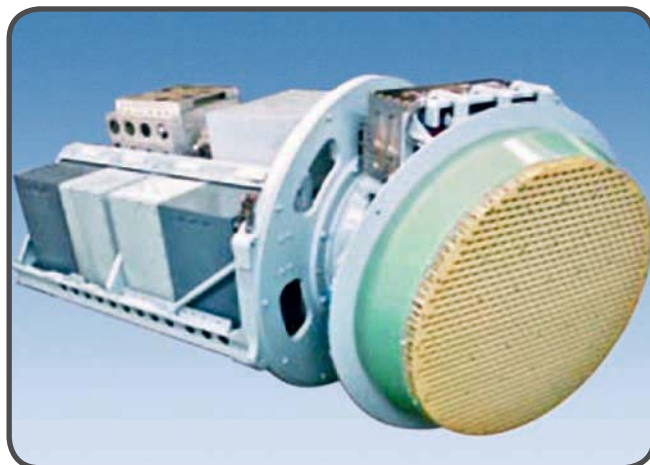


Фото 1.1. РЛС перехвата и прицеливания самолета-истребителя



Фото 1.2. Авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения



Фото 1.3. РЛС обзора Земли

поверхности Земли. В эту группу входят также и РЛС, обеспечивающие радиолокационную разведку наземных объектов и наблюдение малоразмерных наземных целей.

В третью группу входят РЛС класса *«поверхность — воздух»*, основной задачей которых, как и радиолокаторов первой группы, является обнаружение, измерение координат и параметров движения воздушных целей. Однако местом установки таких систем являются либо поверхность Земли, либо объекты наземной и морской техники (подвижные или стационарные). Типичным представителем таких систем являются РЛС обнаружения, входящие в системы управления воздушным движением (УВД) (фото 1.4) или противовоздушной обороны (ПВО) страны, а также РЛС, призванные для наблюдения за метеорологической обстановкой (фото 1.5).

Четвертую группу составляют РЛС класса *«поверхность — поверхность»*, основной задачей которых является обнаружение, измерение координат и параметров движения наземных целей либо воздушных объектов при перемещении последних по поверхности Земли. Типичным представителем таких систем являются, например, РЛС обзора летного поля (фото 1.6), которые входят в системы управления движением самолетов при рулении их по летному полю (взлетно-посадочным полосам (ВПП) и рулежным дорожкам).

Из приведенных примеров РЛС заявленных классов следует, что на первом месте в названии класса стоит слово, обозначающее место установки радиолокатора, а на втором — слово, определяющее объект, по которому работает РЛС. В частности, например, если речь идет о классе РЛС *«поверхность — воздух»*, то это значит, что РЛС находится на земной поверхности, а объектами ее наблюдения являются воздушные цели.



Фото 1.4. «Лира Т» — обзорный трассовый радиолокатор



Фото 1.5. Метеорологический радиолокатор (метеорадиолокатор) МРЛ -5Б

Кроме отмеченных, существует еще одна группа РЛС, которые строятся по *многофункциональному* принципу и объединяют в себе решение задач, например, возлагаемых как на радиолокационные системы класса «воздух — воздух», так и на системы класса «воздух — поверхность». Другими словами, данные РЛС объединяют в себе функции радиолокаторов различных классов. Такими, например, являются бортовые РЛС, устанавливаемые на современные самолеты-истребители (тактические истребители) (фото 1.7).



Фото 1.6. Радиолокатор обзора летного поля «Атлантика ЭЗ»



Фото 1.7. Многофункциональная РЛС «Копье-21»

В то же время необходимо отметить, что, несмотря на проведенное выше разделение РЛС на классы, существуют специальные РЛС, которые строятся под решение специфических задач и под данное разделение на классы не подпадают. Например, РЛС, решающие задачи диагностики состояния организма человека, либо наблюдения объектов, скрытых за преградами, либо наблюдения космических объектов и т.п. Но в целом приведенная классификация позволяет разделить все существующие РЛС по функциональному назначению.

В ряде случаев в состав бортовых систем технического средства (носителя) входят несколько РЛС, которые решают одну общую задачу. В этом случае совокупность РЛС образует *радиолокационный комплекс*. Иногда под *радиолокационным комплексом* понимают совокупность из РЛС и других технических систем или устройств, которые обеспечивают решение задачи, возлагаемой на РЛС. В частности, такой совокупностью может быть РЛС и вычислительная система, обеспечивающая процесс обработки радиолокационного сигнала.



Таким образом, радиолокационные системы делятся на пять больших классов: РЛС класса «воздух — воздух», РЛС класса «воздух — поверхность», РЛС класса «поверхность — воздух», РЛС класса «поверхность — поверхность» и многофункциональные РЛС.

По месту установки РЛС и ее составных частей различают *однопозиционные* и *многопозиционные* РЛС. Под *однопозиционными* понимают РЛС, передатчик

и приемник которых располагаются в одной точке пространства. Если данное условие не выполняется, то РЛС относят к разряду **многопозиционных**. При построении РЛС по многопозиционному принципу количество передающих и приемных позиций может быть разным (рис. 1.5). Однако если принцип действия многопозиционной РЛС основан на активном методе радиолокации, то в составе данной системы должна быть как минимум одна передающая позиция (рис. 1.6). Если в основу работы многопозиционной РЛС положен пассивный метод радиолокации, то в этом случае все ее элементы представляются в виде приемных позиций, разнесенных в пространстве (рис. 1.7). Позиции, в которых располагаются элементы многопозиционной РЛС, могут быть *неподвижными* (стационарными) и *подвижными*, т. е. располагаться на подвижных носителях или, как пишут в англоязычной литературе, на платформах.

В случае, когда в состав многопозиционной РЛС входят только два элемента (позиции), ее называют двухпозиционной. Если при этом позиции, в которых расположены элементы РЛС, являются стационарными, то такую двухпозиционную РЛС часто называют *бистатической*.

Многопозиционная РЛС может быть образована и из совокупности приемо-передающих элементов, располагаемых в каждой из разнесенных позиций (рис. 1.8), либо из совокупности разнесенных в пространстве отдельных РЛС (рис. 1.9).

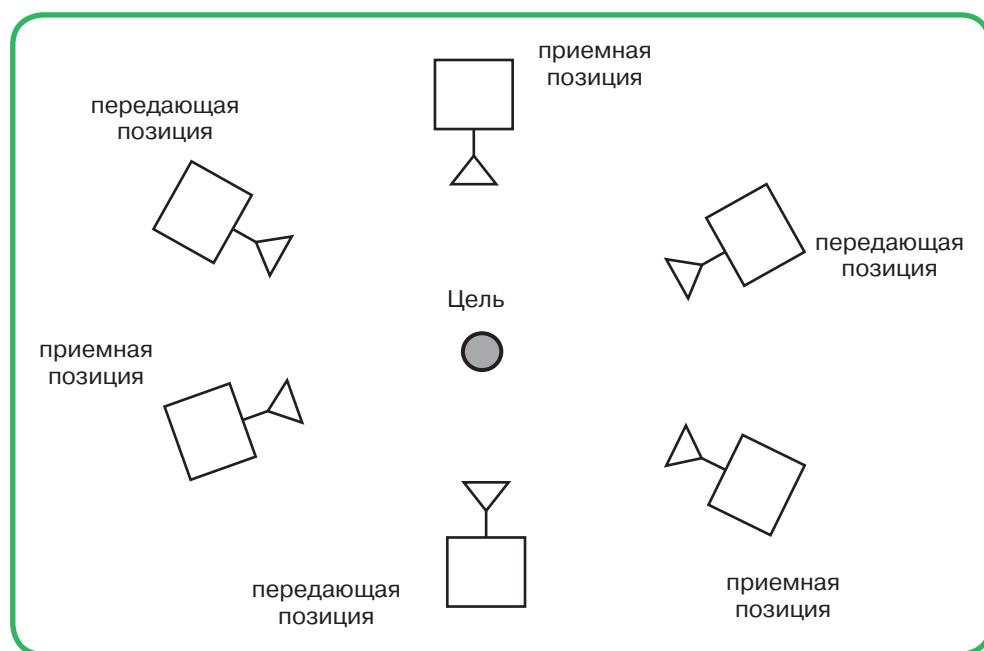


Рис. 1.5. Многопозиционная радиолокационная система, состоящая из совокупности передающих и приемных позиций

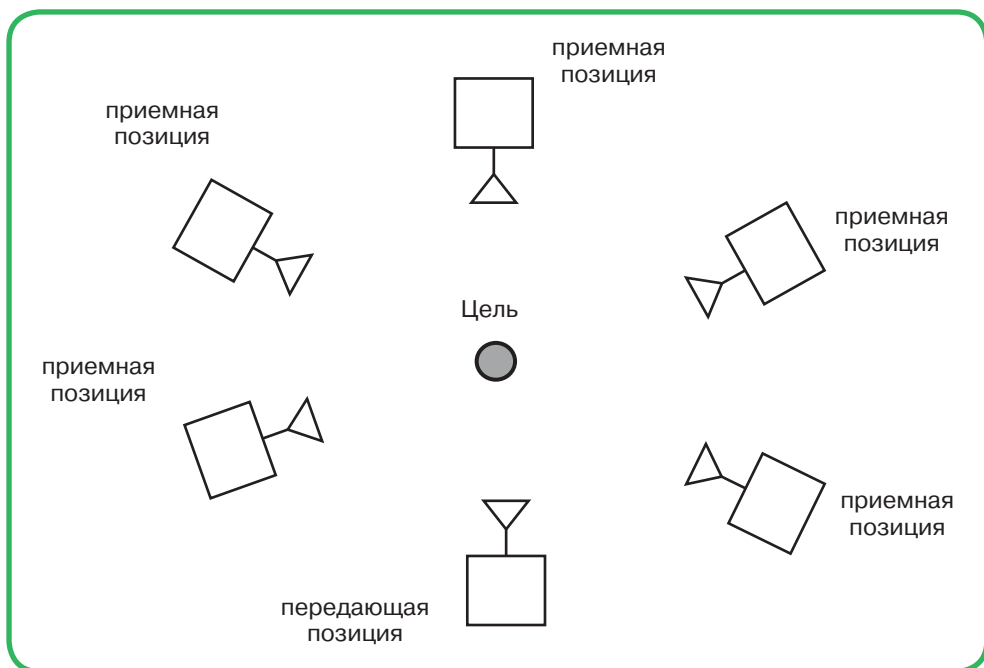


Рис. 1.6. Многопозиционная радиолокационная система, состоящая из совокупности приемных и одной передающей позиций

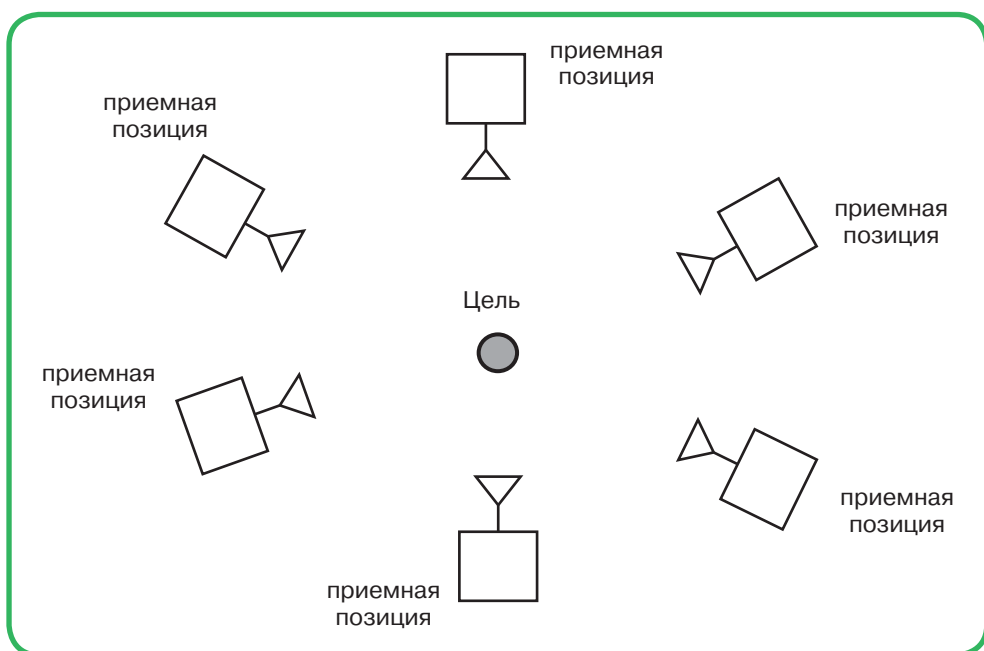


Рис. 1.7. Многопозиционная радиолокационная система, состоящая из совокупности приемных позиций

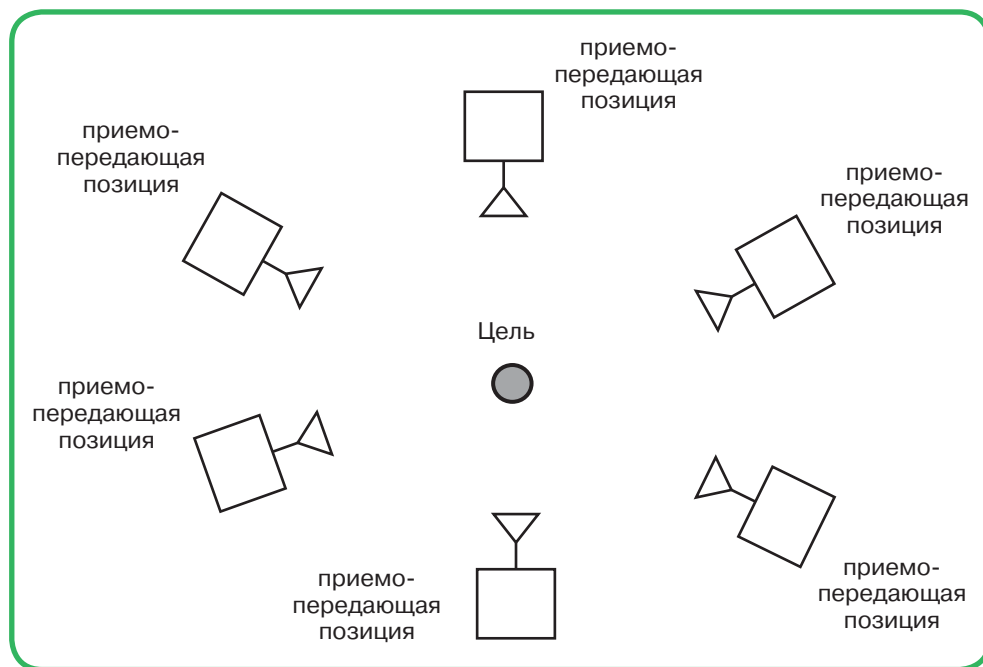


Рис. 1.8. Многопозиционная радиолокационная система, состоящая из совокупности приемо-передающих позиций

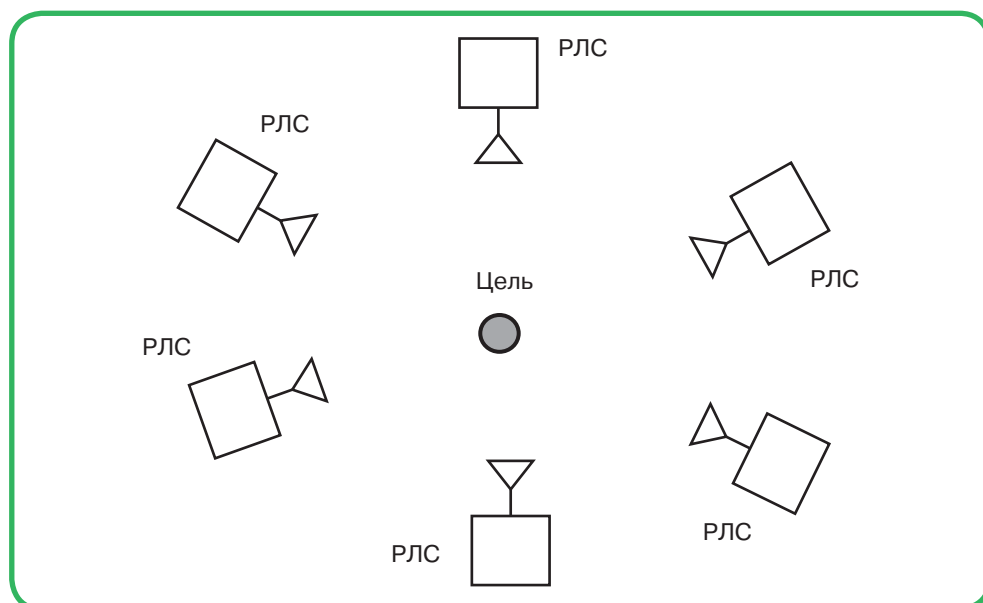


Рис. 1.9. Многопозиционная радиолокационная система, состоящая из совокупности радиолокационных станций



Таким образом, радиолокационные системы различных классов могут быть построены как на однопозиционных, так и многопозиционных принципах.



Спасибо, уважаемый профессор! Теперь я понял, что такое РЛС и какие задачи она решает. Однако хотелось бы понять, существуют ли различия в работе РЛС, относящихся к одному классу?

1.2. Отличительные особенности функционирования радиолокационных систем



Если говорить коротко, ответ положительный — да, существуют. Но для того, чтобы понять, в чем это различие, необходимо рассмотреть, что собой представляет радиолокационный сигнал.

Первоначально рассмотрим зондирующий сигнал. В самом простейшем виде его можно представить, как

$$s(t) = U(t) \cos 2\pi f_0 t, \quad (1.1)$$

где $U(t)$ — огибающая сигнала или, другими словами, функция, которая описывает изменение во времени амплитуды сигнала; $2\pi f_0 t$ — фаза зондирующего сигнала; f_0 — несущая частота сигнала; t — текущее время.

В зависимости от того, как изменяется зондирующий сигнал во времени, он может быть непрерывным или импульсным.

При импульсной форме зондирующего сигнала он представляется в виде чередующихся во времени отрезков колебаний вида (1.1), которые называют импульсами, разделенных пустыми отрезками (рис. 1.10). Форма импульсов может быть различной. В частности, на рис. 1.10а представлен зондирующий сигнал в виде последовательности из прямоугольных радиоимпульсов, а на рис. 1.10б — в виде последовательности радиоимпульсов с колоколообразной огибающей. Расстояние по оси времени между началом одного импульса до начала последующего называют периодом следования импульсов и обозначают как $T_{\text{И}}$. Протяженность же по оси времени отдельного импульса называют длительностью импульса и обозначают как $t_{\text{И}}$. Отношение периода следования импульсов $T_{\text{И}}$ к их длительности $t_{\text{И}}$ называют *скважностью* импульсов, которая показывает, сколько целых импульсов заданной длительности укладывается во временной интервал, равный их периоду следования. Кроме этого, каждый импульс, так же как и сигнал вида (1.1), описывается такими параметрами, как огибающая, фаза и несущая частота. Причем, как правило, такие параметры, как огибающая

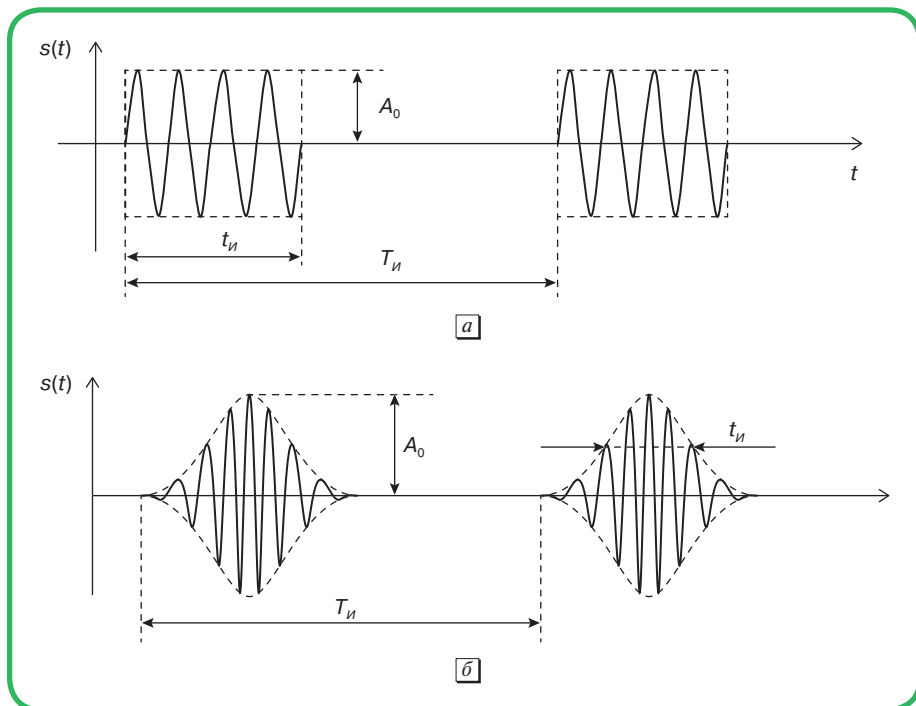


Рис. 1.10. Последовательности радиоимпульсов с прямоугольной (а) и колоколообразной (б) огибающими

и несущая частота, являются одинаковыми для каждого импульса зондирующего сигнала. На рис. 1.11 представлены огибающие отдельных импульсов, образующих зондирующий сигнал, в виде прямоугольной последовательности радиоимпульсов (рис. 1.11а) и последовательности радиоимпульсов с колоколообразной огибающей (рис. 1.11б). Кроме того, на рисунках показаны пиковые (максимальные) значения A_0 амплитуд отдельных импульсов, входящих в последовательность зондирующих сигналов.

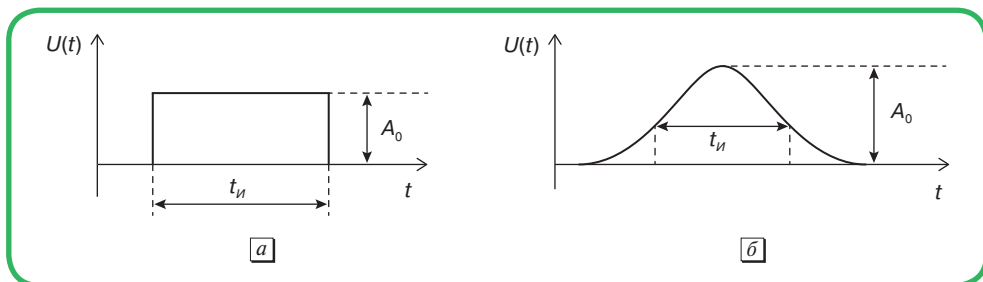


Рис. 1.11. Огибающие радиоимпульсов: прямоугольной (а) и колоколообразной (б) форм

При непрерывной форме зондирующего сигнала он представляет собой колебание, которое по оси времени меняется непрерывно. Процесс изменения его во времени ограничивается только временем работы передатчика РЛС. Данный сигнал можно описать выражением (1.1), полагая, что временной интервал изменения данного сигнала стремится к бесконечности.

В свою очередь, РЛС, которая использует импульсные зондирующие сигналы, называется *импульсной* РЛС или РЛС, работающей в *импульсном режиме излучения*. РЛС, использующая непрерывные зондирующие сигналы, называется *непрерывной* РЛС или РЛС, работающей в *непрерывном режиме излучения*. На практике наибольшее распространение получили РЛС, работающие в импульсном режиме излучения.

Сигнал, который поступает на вход РЛС (радиолокационный сигнал), отличается от излученного (зондирующего), в первую очередь, своей амплитудой и временем его появления относительно момента излучения сигнала $s(t)$. Разность данных времен обычно называют временем запаздывания радиолокационного сигнала и обозначают как t_d . Учитывая данные замечания, сигнал, действующий на входе приемника РЛС, можно записать как

$$s(t) = \beta U(t - t_d) \cos(2\pi f_0(t - t_d)), \quad (1.2)$$

где β — коэффициент, учитывающий уменьшение амплитуды принимаемого сигнала по сравнению с излученным за время распространения радиоволн от РЛС к цели и обратно.

Как видно из (1.2), информацию о цели несет в себе как огибающая сигнала, так и его фаза. В зависимости от того, используется или нет при обработке принимаемого сигнала информация об изменении его фазы, все современные РЛС делятся на две большие группы — когерентные и некогерентные. В когерентных РЛС при обработке радиолокационного сигнала используется информация, содержащаяся как в фазе сигнала, так и в его огибающей. В РЛС, которые относятся к некогерентному типу, обработка радиолокационного сигнала ведется без учета изменения его фазы. В этой связи в рамках одного класса РЛС могут быть построены как по когерентному, так и некогерентному принципам. В частности, при использовании импульсных РЛС на практике находят применение радиолокаторы, работающие с некогерентными и когерентными последовательностями радиоимпульсов и решающие одинаковые задачи.

Необходимо заметить, что когерентные РЛС по отношению к некогерентным обладают большими информационными возможностями, поскольку используют всю информацию о цели, заключенную в радиолокационном сигнале. Однако к данным РЛС предъявляют более жесткие требования по стабильности работы ее приемо-передающих элементов, чем это имеет место при построении РЛС некогерентного типа.



Из вышесказанного следует, что радиолокационные системы одного класса могут быть как когерентными, так и некогерентными. Когерентные РЛС обладают перед некогерентными преимуществами по объему извлекаемой информации из принимаемого сигнала от цели, однако уступают некогерентным РЛС по сложности построения.



Уважаемый профессор! Из Вашего объяснения следует, что существуют различные типы радиолокационных систем. В то же время хотелось понять, какие типовые элементы должны присутствовать в РЛС любого типа и какие функции на них возлагаются?

1.3. Типовая структура радиолокационной системы



Состав элементов радиолокационной системы, конечно же, зависит от назначения системы и задач, решение которых возлагается на нее. Тем не менее можно рассмотреть некоторую обобщенную структуру РЛС и рассказать о предназначении элементов такого радиолокатора. Структурная схема такой гипотетической РЛС представлена на рис. 1.12 и относится к радиолокатору, в основу работы которого положен активный метод радиолокации при импульсном режиме излучения. На данной структурной схеме представлены шесть основных элементов типовой РЛС, которые будут иметь место вне зависимости от принципов ее построения, — передатчик (ПРД), приемник (ПРМ), антенная система (АНТ), антенный переключатель (АП), система управления и синхронизации, система обработки.

Передатчик или передающий тракт РЛС обеспечивает формирование зондирующего радиосигнала, усиление его до требуемого уровня мощности и передачу в антенную систему (антенну).

Антенна в импульсном радиолокаторе работает как на передачу (режим излучения зондирующего сигнала), так и на прием (режим приема сигнала, отраженного от цели).

В режиме передачи антенна обеспечивает преобразование зондирующего радиосигнала, поступившего от ПРД, в радиоволну и излучение зондирующего колебания в направлении на цель.

В режиме приема антенна обеспечивает преобразование отраженной от цели радиоволны в радиосигнал с последующей передачей его в приемник.

Переключение антенны из режима излучения в режим приема обеспечивается с помощью антенного переключателя, который управляется сигналами системы управления и синхронизации.

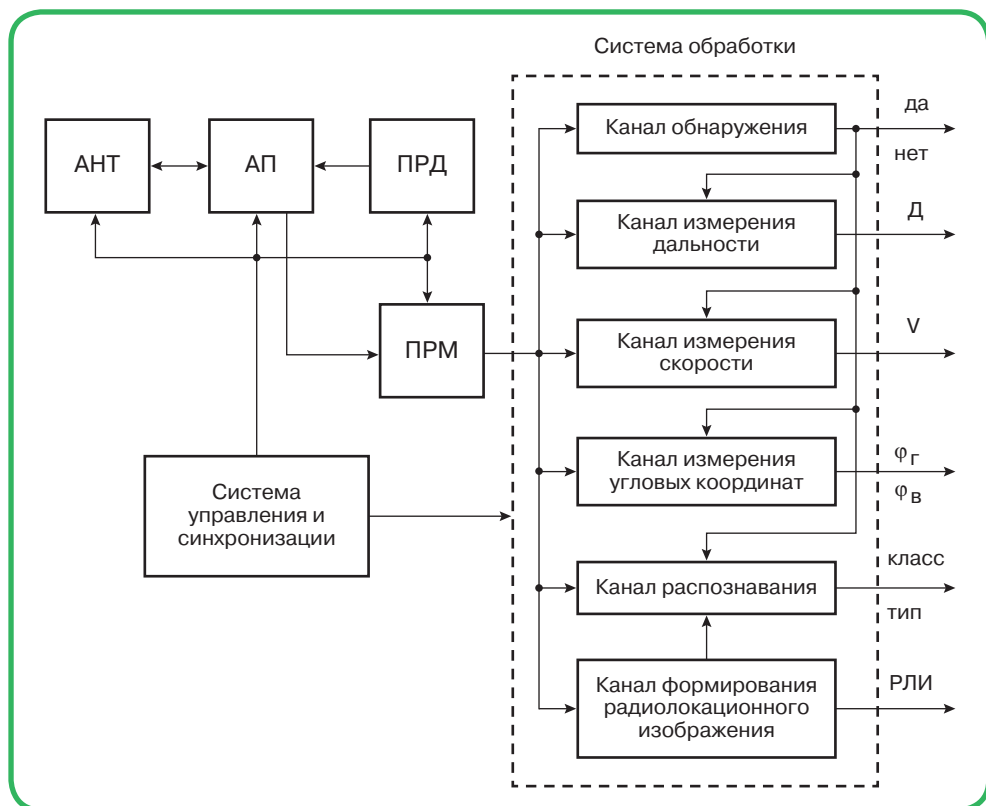


Рис. 1.12. Структурная схема гипотетической РЛС

Приемник РЛС обеспечивает предварительное преобразование принятого сигнала. Во-первых, осуществляет доведение уровня принятого сигнала до необходимого значения для успешной работы последующих узлов радиолокатора. Во-вторых, осуществляет преобразование (чаще уменьшение) несущей частоты принимаемого сигнала для снижения требований к элементам системы обработки. В-третьих, обеспечивает предварительную селекцию (выделение) полезного сигнала (сигнала, отраженного от цели) из сигналов помех, которые действуют одновременно с полезным сигналом.

После предварительного преобразования в приемнике сигнал поступает в систему обработки, в которой решаются задачи по выделению из принятого сигнала информации о цели. Система обработки в современных РЛС представляет собой цифровую вычислительную систему, подобную обычному компьютеру или совокупности компьютеров. Поэтому данный элемент РЛС часто еще называют цифровой системой обработки.

На рис. 1.12 операции, выполняемые системой обработки для решения конкретной задачи радиолокационного приема, условно объединены в канал, чтобы подчеркнуть тот факт, что данную операцию можно выполнить отдельным,

конструктивно исполненным устройством. Как видно из схемы на рис. 1.12, в составе системы обработки имеются шесть каналов — обнаружения, измерения дальности, измерения скорости, измерения угловых координат, распознавания и формирования радиолокационного изображения (РЛИ).

В цифровой системе обработки каждый канал реализуется с помощью специально разработанной совокупности алгоритмов, конкретное содержание которых отражает специфику радиолокатора. Вся совокупность алгоритмов, закладываемая в цифровую систему обработки, называется программным обеспечением.

Каждый из представленных на схеме рис. 1.12 каналов системы обработки обеспечивает решение задач, соответствующих своему наименованию. Так, канал обнаружения обеспечивает установление факта наличия цели (целей) в зоне ответственности РЛС. Каналы измерения дальности, скорости и угловых координат обеспечивают определение дальности D , скорости V и угловых координат φ_r , φ_v обнаруженных целей в горизонтальной (в плоскости азимута) и вертикальной (в плоскости угла места) плоскостях соответственно. Канал распознавания служит для выявления классов и типов наблюдаемых объектов. Канал формирования радиолокационного изображения служит для получения РЛИ земной поверхности, которое представляет собой двумерную плоскую картину, чаще всего в координатах «дальность — азимут», распределения интенсивности отраженного сигнала от объектов на поверхности Земли и самой земной поверхности в пределах участка поверхности Земли, облучаемой РЛС.

Каждая из рассмотренных групп алгоритмов (каналов) функционирует в тесной взаимосвязи друг с другом. В частности, установление факта наличия в зоне ответственности РЛС цели важно, но бессмысленно без определения ее местоположения в пространстве. А данную информацию можно получить только в том случае, если будут известны такие параметры цели, как дальность до нее и ее угловые координаты. В то же время необходимо отметить, что количество каналов зависит от предназначения РЛС. Ряд из них может отсутствовать, например, каналы распознавания и формирования РЛИ, если на РЛС данные задачи не возлагаются.

Конечно же, в реально существующей РЛС количество выполняемых операций и соответствующее им число каналов больше, чем рассмотрено в схеме на рис. 1.12. Однако мы сейчас говорим об общих принципах построения РЛС и не ставим перед собой задачу подробно рассказать обо всех особенностях, связанных с функционированием радиолокатора.

Необходимо заметить, совокупность алгоритмов, закладываемых в систему обработки, определяет возможности РЛС и качество решения задач радиолокационного приема радиолокатором. Часто говорят, что система обработки определяет «интеллект» РЛС. Хотя термин «интеллект», конечно же, применим

только к человеку. Однако современные технологии позволяют создавать технические системы, например, роботы, обладающие искусственным интеллектом. Современный уровень разработки алгоритмов в РЛС таков, что термин «искусственный интеллект» вполне применим и к современным радиолокаторам.

Управление рассмотренными элементами РЛС осуществляется системой управления и синхронизации. Данная система является своеобразным диспетчером, который обеспечивает:

- своевременное переключение каналов передачи и приема сигналов для формирования зондирующих колебаний в направлении на цель и обеспечения приема отраженных от нее сигналов;
- синхронную работу (синхронизацию) во времени всех элементов РЛС путем формирования специальных синхронизирующих сигналов и выделения необходимых временных интервалов на выполнение той или иной процедуры в ходе формирования зондирующих сигналов и обработки отраженных сигналов от цели;
- формирование специальных сигналов и опорных колебаний для обеспечения работы передающих и приемных каналов РЛС;
- управление системой обработки в целях своевременного включения в работу каналов (алгоритмов), обеспечивающих решение задач обнаружения и измерения координат и параметров движения целей, распознавания целей, а также формирования РЛИ;
- управление параметрами режимов излучения и приема РЛС в целях создания условий для обеспечения высокого качества решения текущей задачи радиолокационного наблюдения.



Таким образом, подводя итог обсуждению, можно сказать, что современный радиолокатор является сложным техническим устройством, при реализации которого используются все современные технологии, которые касаются как конструктивного исполнения элементов радиолокатора, так и его программного обеспечения. Программное обеспечение, закладываемое в систему обработки, определяет искусственный интеллект РЛС, и определяет возможности радиолокатора и качество решения возлагаемых на него задач.

Литература

1. Бакулев П. А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. — М.: Радиотехника, 2015.

2. Дудник П. И., Герасимов А. А., Ильчук А. Р., Кондратенков Г. С., Татарский Б. Г. *Авиационные радиолокационные комплексы и системы* / Под ред. П. И. Дудника. — М.: Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2006.
3. *Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник.* Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана. — М.: Радиотехника, 2007.
4. *Радиотехнические системы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника»* / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др.; под ред. Ю. М. Казаринова. — М.: Высшая школа, 1990.
5. *Радиолокационные системы* / Под ред. А. И. Николаева. — М.: Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2016.
6. Верба В. С. *Обнаружение наземных объектов. Радиолокационные системы обнаружения и наведения воздушного базирования.* — М.: Радиотехника, 2007.

ГЛАВА 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИИ



Уважаемый профессор, не могли бы Вы рассказать, на каких физических основах базируется радиолокация?

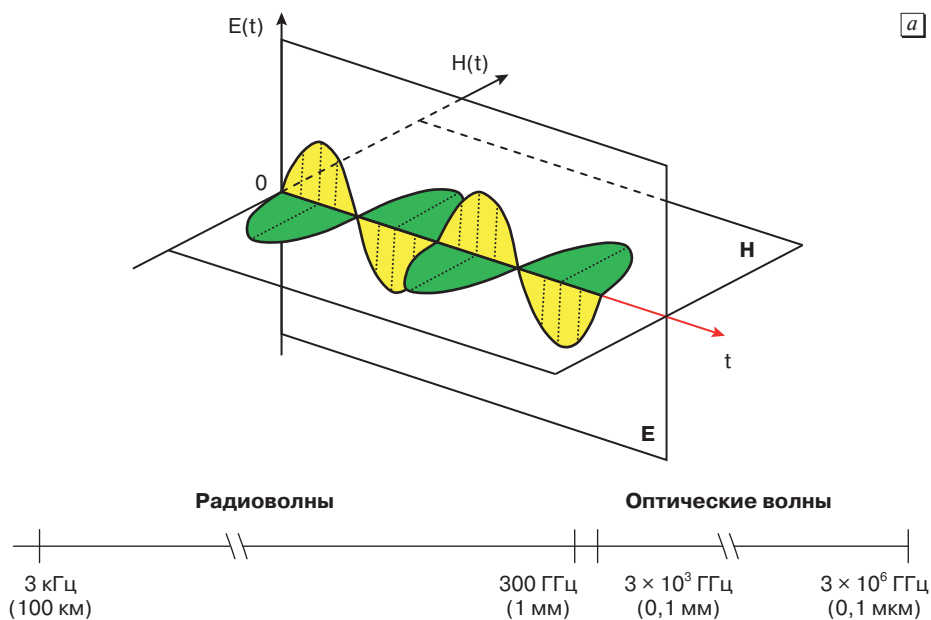


Как и любое направление развития науки и техники, радиолокация базируется на некоторых физических основах, позволяющих обеспечивать решение стоящих перед ней задач, а именно: обнаруживать различного рода объекты и определять координаты и параметры их движения с помощью радиоволн. Традиционно все объекты наблюдения в радиолокации называются *целями*, поскольку первоначально радиолокация рассматривалась как прикладная наука, способствующая автоматизации и эффективности решения только военных задач по обнаружению и измерению координат объектов противника.

Использование радиоволн (РВ) или, другими словами, электромагнитных колебаний (ЭМК) (рис. 2.1а), частотный диапазон которых сосредоточен в пределах от 3 кГц до 300 ГГц (рис. 2.1б), определяет основные преимущества радиолокационных систем (РЛС) и устройств (РЛУ) перед другими системами локации (оптическими, инфракрасными, ультразвуковыми). В первую очередь, это обусловлено тем, что закономерности распространения РВ в однородной среде достаточно стабильны как в любое время суток, так и в любое время года и, следовательно, изменение условий оптической видимости, обусловленных появлением дождя, снега, тумана или изменением времени суток, не нарушает работоспособность РЛС и РЛУ.



Закономерности распространения РВ в однородной среде достаточно стабильны в любое время суток и в любое время года.



Диапазоны волн	Диапазоны частот	Диапазоны волн	Диапазоны частот
Мириаметровые, 100...10 км	Очень низкие частоты (ОНЧ), 3...30 кГц	Инфракрасные лучи, 0,1 мм ... 0,76 мкм	$3 \times 10^{12} \dots 3,95 \times 10^{14}$ Гц
Километровые, 10...1 км	Низкие частоты (НЧ), 30...300 кГц	Видимые лучи, 0,76...0,38 мкм	$(3,95 \dots 7,89) \times 10^{14}$ Гц
Гектометровые, 1000...100 м	Средние частоты (СЧ), 300...3000 кГц	Ультрафиолетовые лучи, 0,38...0,1 мкм	$7,89 \times 10^{14} \dots 3 \times 10^{15}$ Гц
Декаметровые, 100...10 м	Высокие частоты (ВЧ), 3...30 МГц		
Метровые, 10...1 м	Очень высокие частоты (ОВЧ), 30...300 МГц		
Дециметровые, 100...10 см	Ультравысокие частоты (УВЧ), 300...3000 МГц		
Сантиметровые, 10...1 см	Сверхвысокие частоты (СВЧ), 3...30 ГГц		
Миллиметровые, 10...1 мм	Крайне высокие частоты (КВЧ), 30...300 ГГц		

б

Рис. 2.1. К пояснению понятия «радиоволна»: пространственное представление электромагнитной волны (a) и сравнительная таблица диапазонов длин волн (диапазонов частот) электромагнитных колебаний (б)