

В.С. Верба, Б.Г. Татарский

Основы теории радиолокационных систем и комплексов

2-е исправленное издание

*Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением
в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей
и направлений подготовки 11.00.00*

*«Электроника, радиотехника и системы связи»
в качестве учебника для обучающихся по специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»*

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2025

УДК 621.396

ББК 32.95

В31

Рецензент:

Д.т.н., профессор В.А. Сарычев,

кафедра «Радиоэлектронные системы и комплексы»

В31 Верба В.С., Татарский Б.Г.

Основы теории радиолокационных систем и комплексов

2-е исправленное издание

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2025. – 312 с. ISBN 978-5-94836-734-7

В учебнике излагаются основные вопросы современной теории радиолокационных систем (РЛС) и комплексов (РЛК), касающиеся решения задач обнаружения радиолокационных целей, их разрешения и оценивания координат и параметров движения объектов радиолокационного наблюдения. Кроме того, рассматриваются вопросы, касающиеся дальности действия РЛС, способов организации обзора окружающего пространства и проведения угловых измерений. В ходе изложения материала обращается внимание на привязку данной теории к основным тактическим показателям РЛС и РЛК. Изложение материала базируется на знаниях, полученных студентами при изучении курсов «Радиотехнические цепи и сигналы» и «Статистическая радиотехника». Каждая глава учебника завершается контрольными вопросами и упражнениями, позволяющими читателю проверить степень усвоения им материала, изложенного в главах.

Учебник предназначен для студентов радиотехнических вузов, обучающихся по специальности 11.05.01 – Радиоэлектронные системы и комплексы.

УДК 621.396

ББК 32.95

© Верба В.С., Татарский Б.Г., 2025

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2025

ISBN 978-5-94836-734-7

Содержание

Предисловие	8
Введение	9
Глава 1. Общие сведения о радиолокационных системах и комплексах	14
1.1. Типы радиолокационных систем.....	15
1.2. Основные задачи, решаемые радиолокационными системами	17
1.3. Типовая структура радиолокационной системы.....	19
1.4. Основные тактические и технические характеристики радиолокационных систем	22
1.4.1. Тактические характеристики РЛС	22
1.4.2. Технические характеристики РЛС	24
1.5. Контрольные вопросы и упражнения	25
Глава 2. Обнаружение радиолокационных сигналов и целей	27
2.1. Обнаружение радиолокационных сигналов в виде когерентной пачки радиоимпульсов	27
2.1.1. Образование импульсных радиолокационных сигналов в виде пачек радиоимпульсов.....	27
2.1.2. Обнаружение радиолокационного сигнала в виде когерентной пачки радиоимпульсов со случайной начальной фазой.....	28
2.2. Обнаружение радиолокационного сигнала в виде некогерентной пачки радиоимпульсов	32
2.3. Сравнение алгоритмов обнаружения когерентных и некогерентных радиолокационных сигналов	35
2.3.1. Понятие коэффициента различимости.....	35
2.3.2. Коэффициент различимости при обнаружении некогерентной пачки радиоимпульсов	36
2.3.3. Коэффициент различимости при обнаружении когерентной пачки радиоимпульсов	38
2.4. Характеристики обнаружения когерентного и некогерентного радиолокационных приемников.....	41
2.4.1. Общие понятия.....	41
2.4.2. Характеристики обнаружения радиолокационного сигнала в виде когерентной пачки радиоимпульсов со случайной начальной фазой	41
2.4.3. Характеристики обнаружения радиолокационного сигнала в виде некогерентной пачки радиоимпульсов.....	45
2.5. Обнаружение радиолокационных сигналов при флуктуирующей амплитуде и случайной фазе	46
2.6. Контрольные вопросы и упражнения	49
Глава 3. Дальность действия радиолокационных систем	50
3.1. Энергетические соотношения в радиолокации и формула максимальной дальности действия РЛС в свободном пространстве	50

3.1.1. Энергетические соотношения в радиолокации	50
3.1.2. Формула максимальной дальности действия РЛС (дальности обнаружения целей) в свободном пространстве	52
3.2. Максимальная дальность обнаружения цели при наличии поглощения радиоволн в атмосфере	55
3.2.1. Общие сведения	55
3.2.2. Дальность действия радиолокационной системы в условиях поглощения радиоволн на ограниченном участке трассы распространения сигналов	57
3.2.3. Дальность действия радиолокационной системы при наличии поглощения радиоволн на всей трассе распространения	60
3.3. Энергетические соотношения и дальность обнаружения целей при действии преднамеренных активных радиоэлектронных и пассивных помех	62
3.3.1. Спектральная плотность мощности преднамеренных активных шумовых помех	62
3.3.2. Максимальная дальность обнаружения цели при действии преднамеренных активных помех	64
3.3.3. Tактический коэффициент подавления РЛС и сравнение РЛС по эффективности обнаружения целей в условиях помех	66
3.3.4. Максимальная дальность обнаружения цели при воздействии на РЛС источников пассивных помех	67
3.4. Влияние на дальность действия РЛС отражений от земной поверхности	68
3.5. Влияние кривизны земной поверхности и атмосферной рефракции на дальность действия РЛС	72
3.6. Контрольные вопросы и упражнения	76
Глава 4. Разрешающая способность радиолокационных систем	78
4.1. Понятие разрешающей способности и критерии разрешения	78
4.1.1. Понятие разрешающей способности	78
4.1.2. Критерии разрешения	79
4.2. Принцип неопределенности в радиолокации. Функция неопределенности радиолокационных сигналов и ее свойства	81
4.3. Потенциальные разрешающие способности РЛС по времени запаздывания (дальности) и доплеровскому смещению частоты (радиальной скорости)	84
4.3.1. Потенциальная разрешающая способность РЛС по времени запаздывания (дальности)	85
4.3.2. Потенциальная разрешающая способность РЛС по доплеровскому смещению частоты (радиальной скорости движения цели)	87
4.3.3. Диаграмма неопределенности	89
4.4. Возможности РЛС по разрешению при использовании типовых зондирующих сигналов	91

4.4.1. Некогерентная пачка радиоимпульсов	91
4.4.2. Когерентная пачка радиоимпульсов	95
4.4.3. Радиосигналы с внутриимпульсной линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналы)	98
4.4.4. Сигналы с фазо-кодовой модуляцией (ФКМ-сигналы)	101
4.5. Формирование и обработка типовых сложных сигналов	105
4.5.1. Формирование и обработка ЛЧМ-сигналов	105
4.5.2. Формирование и обработка ФКМ-сигналов	114
4.5.3. Особенности устройств обработки ФКМ-сигналов	117
4.6. Возможности радиолокационных систем по разрешению и скрытности при использовании других типов сложных сигналов	120
4.6.1. Сигналы с фазо-кодовой модуляцией, построенные на основе кодов Фрэнка	120
4.6.2. Частотно-кодированные сигналы	123
1. Вид частотно-кодированных сигналов (ЧКС) и их функция неопределенности	123
2. Сигналы Костаса (ЧКС Костаса)	124
4.6.3. Применение сложных (широкополосных) сигналов для обеспечения малой вероятности перехвата радиолокационных сигналов системами радиоэлектронной разведки	129
1. Общие вопросы создания РЛС с малой вероятностью перехвата сигналов	129
2. Основные соотношения при обеспечении малой вероятности перехвата сигналов РЛС	130
3. Виды сигналов, обеспечивающих малую вероятность перехвата средствами РЭР	133
4.7. Разрешающая способность РЛС по угловым координатам	137
4.7.1. Апертура РЛС как входная пространственная характеристика радиолокатора	137
4.7.2. Пространственная функция неопределенности	140
4.7.3. Параметр разрешения целей по угловым координатам	140
4.8. Повышение разрешающей способности РЛС по угловой координате	143
4.8.1. РЛС бокового обзора	143
4.8.2. Синтезирование апертуры антенны	144
4.9. Контрольные вопросы и упражнения	151
Глава 5. Точность измерения координат и параметров движения радиолокационных целей	152
5.1. Оценка точности измерения параметров радиолокационного сигнала	152
5.1.1. Общие сведения. Точность радиолокационных измерений	152
5.1.2. Потенциальная точность измерения неэнергетического информационного параметра радиолокационного сигнала	154

5.2. Выбор параметров РЛС для обеспечения требуемой точности измерения координат и параметров движения целей	157
5.2.1. Потенциальная точность измерения времени запаздывания отраженного сигнала и дальности до цели	157
5.2.2. Потенциальная точность измерения доплеровского смещения частоты и радиальной скорости движения цели.....	160
5.3. Выбор параметров антенной системы для обеспечения требуемой точности измерения угловых координат наблюдаемых целей	163
5.4. Реальные точности радиолокационных измерений	168
5.5. Оптимальные устройства измерения координат и параметров движения цели	169
5.5.1. Оптимальные измерители (дискриминаторы)	169
5.6. Оценивание координат и параметров движения цели, изменяющихся во времени.....	174
5.7. Контрольные вопросы и упражнения	177
Глава 6. Радиолокационный обзор пространства	179
6.1. Общие сведения	179
6.2. Последовательные способы обзора пространства	181
6.2.1. Круговой и секторный обзор	181
6.2.2. Винтовой обзор	183
6.2.3. Спиральный обзор	186
6.2.4. Зигзагообразный (построчный) обзор	188
6.3. Программируемый (управляемый) обзор пространства.....	192
6.4. Энергетические соотношения при обзоре пространства	195
6.5. Контрольные вопросы и упражнения	197
Глава 7. Пространственно-одноканальные и многоканальные устройства измерения угловых координат целей	199
7.1. Основные закономерности пространственно-временной обработки радиолокационных сигналов	199
7.1.1. Общие сведения	199
7.1.2. Оптимальные устройства пространственно-временной обработки сигналов	201
7.2. Пространственно-одноканальные радиолокационные системы определения угловых координат.....	205
7.2.1. Амплитудно-модуляционный метод пеленгации целей.....	205
7.2.2. Структурная схема устройства амплитудно-модуляционной пеленгации	208
7.2.3. Влияние амплитудных флуктуаций сигналов на точность измерения угловых координат при амплитудно-модуляционном методе	212
7.3. Моноимпульсные радиолокационные системы определения угловых координат целей	215

7.3.1. Общие вопросы. Принципы измерения угловых координат	215
7.3.2. Обобщенная структурная схема моноимпульсной радиолокационной системы.....	220
7.3.3. Способы нормировки сигналов в моноимпульсных устройствах измерения угловых координат	222
7.3.4. Основные типы моноимпульсных устройств измерения угловых координат и их пеленгационные характеристики.....	229
7.3.5. Способы уплотнения каналов в моноимпульсных РЛС	236
7.4. Фазированные антенные решетки в радиолокационных системах	240
7.4.1. Общие вопросы применения ФАР	240
7.4.2. Принцип электронного управления лучом ФАР	241
7.4.3. ФАР как система оптимальной пространственно-временной обработки сигналов	246
7.4.4. Основные типы ФАР в радиолокационных системах.....	249
7.4.5. Адаптивные РЛС с ФАР	254
7.5. Контрольные вопросы и упражнения	259
Заключение	261
Приложение 1. Устройства оптимальной обработки сигналов	262
Приложение 2. Характеристики обнаружения полностью известного сигнала на фоне белого гауссовского шума	271
Приложение 3. Плотность вероятности сигнала на выходе детектора огибающей.....	277
Приложение 4. Отношение правдоподобия для импульсной последовательности радиоимпульсов с флуктуирующей амплитудой и случайной начальной фазой	283
Приложение 5. Таблица определенных интегралов.....	289
Приложение 6. Таблица перевода относительных единиц в дБ и обратно	291
Литература, использованная при написании учебника	292
Список сокращений	293
Предметный указатель	298

Предисловие

Современное общество с полным основанием называют информационным обществом. Мы не мыслим себя без окружающих нас технических средств, которые позволяют получать полезную информацию об окружающем мире. Одним из таких всепогодных и всесезонных средств является радиолокационная система. На сегодняшний день существует гигантское многообразие подобных систем, которые находят широкое применение в гражданской и военной сферах.

Курсы по радиолокационным системам являются одними из основных при подготовке будущих радиоинженеров по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы», которые читаются в технических вузах нашей страны. Радиолокация по своей сути является сложной интегрированной дисциплиной, и для ее освоения студентам радиотехнических специальностей, помимо лекционных курсов, необходима и учебная литература в виде учебников и учебных пособий. В этой связи я с удовольствием представляю читателю учебник авторов В.С. Вербы и Б.Г. Татарского «Основы теории радиолокационных систем и комплексов», который подготовлен на базе лекционных материалов по одноименной дисциплине. Примечательно, что авторы учебника, помимо богатого опыта преподавательской деятельности, имеют за плечами и многолетний опыт научно-исследовательской и конструкторской работы в области радиолокации, что позволило при написании учебника учесть вопросы практического применения теории радиолокации.

Материал учебника излагается на хорошем методическом уровне и будет полезен не только студентам, но и аспирантам, молодым преподавателям и радиоинженерам, делающим первые свои шаги на профессиональном поприще.

*Президент МИРЭА –
Российского технологического университета,
академик РАН*



А.С.Сигов

Введение

Современные радиолокационные системы (РЛС) и комплексы (РЛК) являются сложными техническими средствами, которые позволяют получать информацию об объектах или целях, находящихся в зоне их ответственности, при любых погодных условиях и в любое время суток, а также в условиях искусственного снижения оптической видимости объектов наблюдения и их маскировки. В то же время возможности РЛС, как и любой технической системы, ограничены. Они непосредственно следуют из целевого предназначения радиолокатора и определяются его тактико-техническими характеристиками. В этой связи важно понимать, как та или иная характеристика РЛС или ее показатель влияют на решение основных задач радиолокационного наблюдения. Например, какие характеристики и параметры радиолокатора влияют на качество обнаружения наблюдаемой цели? Какие параметры и характеристики РЛС обеспечивают ее возможность обнаруживать цели на фоне различного рода помех или выделять интересующие цели из совокупности наблюдаемых объектов? От чего зависит точность определения координат и параметров движения целей? Возможно ли наблюдение различных целей с качеством, сравнимым с качеством оптических систем? От чего зависит возможность РЛС по решению задач классификации и распознавания наблюдаемых объектов?

Ответы на поставленные вопросы дает материал, который излагается в дисциплине «Основы теории радиолокационных систем и комплексов», читаемой студентам технических вузов Российской Федерации по направлению подготовки «Радиоэлектронные системы и комплексы», и представлен в учебнике с одноименным названием авторов, имеющих богатый опыт преподавания радиолокационных дисциплин и ведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по проблемам радиолокации.

Перед авторами стояла сложная задача — связать в единый курс материал по основам теории радиолокационных систем и комплексов, который бы охватывал различные подходы к вопросам изложения материала по радиолокации, сложившиеся в научных школах таких легендарных учебных заведений, как Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Московский энергетический институт, Московский авиационный институт, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Военно-воздушная инженерная академия имени Н.Е. Жуковского. Кроме того, необходимо было учесть практические подходы к радиолокации, сложившиеся в научных организациях, занятых разработкой радиолокационных систем и комплексов, таких известных концернов как «Алмаз-Антей» и «Вега». Задача облегчалась тем, что основы теории радиолокационных систем и комплексов являются общими вне зависимости от того, относятся они к воздушным, наземным, морским или космическим системам и комплексам. Однако различие в терминологии различных школ существует. В этой связи при изложении материала авторы старались обращать внимание на данные моменты и пояснять терминологию, принятую в учебнике.

Учитывая, что большинство технических вузов страны изучают дисциплину по основам теории радиолокационных систем и комплексов в течение одного се-

местра, материал, изложенный в учебнике, ориентирован именно на данный срок и ограничен рассмотрением основ теории данных систем, функционирующих на принципах однопозиционной активной радиолокации.

Структурно учебник состоит из введения, семи глав, заключения и шести приложений. Авторы старались построить материал учебника таким образом, чтобы при его изучении необходимость обращения к другим источникам была минимальной. В этой связи в приложение учебника включен вспомогательный материал, относящийся к вопросам оптимальной обработки сигналов на фоне различного рода помех и флуктуаций параметров радиолокационных сигналов, а также справочный материал, используемый при выводе основных формульных соотношений и обеспечивающий решение практических задач радиолокации. Данный материал позволит студентам при необходимости восполнить пробелы в знаниях, относящихся к вопросам обработки радиосигналов, и принесет пользу при решении задач по обнаружению, разрешению целей, измерению их координат и параметров движения.

Изложение материала учебника начинается с главы 1, в которой кратко рассматриваются задачи, решаемые радиолокационными системами и комплексами, их основные типы и тактико-технические характеристики.

Глава 2 «Обнаружение радиолокационных сигналов и целей» непосредственно посвящена вопросам обнаружения наблюдаемых целей по отраженным от них сигналам. В отличие от вопросов обнаружения, которые рассматриваются в курсе «Статистическая радиотехника», в данной главе идет речь об обнаружении типовых радиолокационных сигналов в виде пачек радиоимпульсов. Рассматриваются вопросы обнаружения двух типов пачек — когерентных и некогерентных. При этом обращается внимание как на физику возникновения понятия «пачка радиоимпульсов», алгоритмы и структуры обнаружителей сигналов данного типа, так и на характеристики и показатели, позволяющие оценить эффективность их работы при вариации условий наблюдения. Изложение теории обнаружения базируется на знаниях, которые студенты получают при изучении дисциплин «Радиотехнические цепи и сигналы» и «Статистическая радиотехника».

Вспомогательный материал по теории обнаружения изложен в приложениях 1—4 и позволяет, с одной стороны, восстановить информацию по обнаружению полностью известных сигналов, а с другой — получить новые знания по теории обнаружения и устройствам обработки при наблюдении сигналов на фоне коррелированных шумов, что представляет интерес при наблюдении целей, например, на фоне отражений от земной поверхности.

Глава 3 «Дальность действия радиолокационных систем» посвящена рассмотрению одного из важных тактических показателей РЛС — дальности обнаружения радиолокатора. Данная тема непосредственно связана с проблемой обнаружения целей и опирается на такие понятия, как характеристики и показатели обнаружения, пороговое отношение сигнал/шум, коэффициент различимости. Кроме того, понятие «дальность обнаружения» непосредственно связано с энергетической характеристикой цели — величиной ее эффективной площади отражения, которая предопределяет уровень принимаемого сигнала, отраженного от цели.



Теоретические аспекты дальности действия радиолокационных систем рассматриваются во всем многообразии, начиная от вывода основного энергетического уравнения РЛС в свободном пространстве, затем при учете поглощения энергии радиолокационного сигнала на трассе распространения и заканчивая влиянием различного рода помех, земной поверхности и нижнего слоя атмосферы Земли.

В главе 4 «Разрешающая способность радиолокационных систем» рассматриваются важные вопросы, связанные с обеспечением разрешающей способности РЛС, т.е. ее способности разделять обнаруживать или измерять параметры отраженных сигналов от близко расположенных целей (объектов). Рассмотрение теории по данному направлению позволяет определить потенциально достижимые показатели разрешения РЛС по всем координатам наблюдаемых целей и связать их с параметрами используемых зондирующих сигналов и антенной системы радиолокатора. Поскольку современные РЛС могут использовать различные типы радиосигналов, в материалах главы рассматриваются вопросы разрешающей способности при использовании в радиолокаторе типовых радиолокационных сигналов — пачек радиоимпульсов (когерентных и некогерентных), сигналов без внутриимпульсной модуляции и при наличии таковой. Обращается внимание на вопросы, связанные с обеспечением малой вероятности перехвата радиолокационных сигналов средствами радиоэлектронной разведки и высокой разрешающей способности РЛС по временным и пространственным параметрам, а также рассматриваются возможные варианты повышения разрешения радиолокатора по угловой шкале.

Глава 5 «Точность измерения координат и параметров движения целей» посвящена теоретическим вопросам, связанным с обеспечением требуемой точности измерения координат и параметров движения наблюдаемых объектов. Рассмотрение вопросов точности измерения важно, поскольку работа РЛС всегда происходит в условиях действия помеховых сигналов различной физической природы. В этой связи необходимо знать, как помехи влияют на точность оценивания параметров отраженных сигналов от целей (координат и параметров их движения). При этом приводятся выражения, позволяющие оценить потенциально достижимую точность оценивания радиолокатором координат и параметров движения целей. Отмечается, что оцениваемые параметры могут изменяться или быть неизменными в процессе радиолокационного наблюдения, в этой связи процедура оценки данных параметров рассматривается при различном характере изменения оцениваемых параметров.

Параметр «точность», как и «разрешающая способность», является важным тактическим показателем РЛС. Данные показатели определяют возможности радиолокатора по детальному и точному радиолокационному наблюдению целей. Поэтому рассматривается связь данных показателей, которая имеет место вне зависимости от измеряемых параметров.

В материалах главы наряду с определением основных выражений, определяющих точность измерений, рассматриваются также структуры оптимальных и квазиоптимальных измерителей, которые позволяют проводить оценку координат и параметров движения целей с требуемой точностью. При этом материал, связанный с возможными вариантами построения угломерных устройств современных РЛС (РЛК), ввиду его большого объема вынесен в отдельную главу.

Глава 6 «Радиолокационный обзор пространства» посвящена вопросам, связанным с организацией процедуры просмотра зоны ответственности РЛС. Рассмотрены различные способы последовательного обзора пространства, применяемые в современных РЛС, показана взаимозависимость между дальностью действия радиолокатора и временем обзора пространства. Рассмотрены особенности, связанные с организацией одновременного обзора пространства. Обращено внимание на реализацию программируемого обзора как способа, позволяющего минимизировать время, затрачиваемое на выполнение процедуры поиска и обнаружения наблюдаемых целей.

Глава 7 «Пространственно-одноканальные и многоканальные устройства измерения угловых координат целей» посвящена вопросам, связанным с теорией построения угломерных устройств и систем РЛС. Первоначально рассматриваются основы пространственно-временной обработки радиолокационных сигналов, позволяющие подойти к задаче измерения угловых координат наблюдаемых целей с более общих позиций, затем осуществляется переход к рассмотрению особенностей построения одноканальных и многоканальных устройств измерения угловых координат. Особое внимание обращается на многоканальные антенные системы моноимпульсного типа, рассматриваются особенности связанные с нормировкой сигналов в данных системах и уплотнением каналов. Кроме того, обращается внимание на многоканальные системы, реализованные на фазированных антенных решетках (ФАР) пассивного и активного типов, а также на основные типы ФАР в радиолокационных системах. В завершение материалов главы рассматриваются адаптивные РЛС с ФАР.

При выводе основных соотношений радиолокации в материалах учебника широко использовались табличные интегралы. В этой связи в приложении 5 приведены наиболее распространенные табличные интегралы, которые позволяют существенно упрощать необходимые преобразования при выводе основных формул радиолокации.

Учитывая, что при решении радиолокационных задач и проведении расчетов в радиолокации широко используются относительные единицы — децибелы (дБ), в приложении 6 приведена таблица, позволяющая переводить величины, выраженные в разгах, в дБ и обратно, что существенно сокращает процесс вычислений при решении практических задач по радиолокации.

В заключении к учебнику отмечается преемственность получаемых знаний и необходимость знания теоретических основ радиолокационных систем и комплексов для разработчиков данных систем.

Каждая глава учебника состоит из параграфов, которые при необходимости разбиваются на подпараграфы. Содержание каждой главы и приложений состоит из текстового материала, рисунков и формул. В некоторых из них также присутствуют графики и таблицы. В конце каждой главы приводится перечень контрольных вопросов и упражнений, позволяющий студентам и читателям учебника проверить степень усвоения изученного материала. При этом нумерация формул идет в пределах одной главы и состоит из двух цифр, заключенных в скобки и разделенных точкой. Первая цифра соответствует номеру главы, вторая — порядковому номеру формулы в главе. Нумерация рисунков также осуществляется по главам и состоит из

двух цифр, разделенных точкой, которым предшествуют литеры «Рис.». В отличие от нумерации формул, идентификатор рисунка не заключен в скобки.

Нумерация формул в пределах приложения к учебнику изменяется и состоит из литеры и двух цифр, разделенных точкой и заключенных в скобки. Литера «П», стоящая на первом месте номера формулы, означает, что данное обозначение относится к приложению. Цифра, стоящая после литеры, соответствует номеру приложения, а цифра, стоящая после точки, указывает на порядковый номер формулы в данном материале.

В конце учебника приведен список литературы, которая была использована при его написании.

Сокращения, используемые при написании материала учебника, указаны в списке сокращений.

Завершается учебник предметным указателем, который позволяет читателю быстро найти необходимый ему материал и при необходимости изучить его.

ГЛАВА I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ И КОМПЛЕКСАХ

Прежде чем приступить к рассмотрению теоретических основ радиолокационных систем (РЛС) и комплексов (РЛК), необходимо, во-первых, уточнить ряд определений из области радиолокации, которые мы будем использовать ниже, и, во-вторых, поговорить о предназначении данных систем.

Как известно, с помощью радиолокации за счет использования основных закономерностей распространения электромагнитных волн (ЭМВ) радиодиапазона обеспечивается решение задач обнаружения воздушных и наземных объектов (целей), навигации различных судов (воздушных и морских), управления воздушным и морским движением, управление средствами противовоздушной обороны (ПВО), наведение средств поражения на наземные (морские) и воздушные объекты в любое время суток и в любых метеоусловиях.

Причем процесс просмотра заданной области пространства (*зоны ответственности* РЛС) в целях получения информации о наличии в ней различных объектов, измерения их координат и параметров движения, определения классов и типов объектов называют *радиолокационным наблюдением*. Объекты же радиолокационного наблюдения называют *радиолокационными целями* или просто *целями*. Примерами радиолокационных целей могут служить корабли, самолеты, танки, автомашины и т.д.

Размер зоны ответственности РЛС зависит от ее предназначения и режимов работы, а также от конкретно складывающейся реальной фоно-целевой обстановки (тактической ситуации). При этом под фоном понимают помеховые сигналы различной физической природы, например внутренние шумы приемника РЛС, отражения от искусственных и естественных пассивных отражателей, сигналы, излучаемые сторонними радиоэлектронными системами, и т.п.

Радиосигнал, излучаемый в пространство для обеспечения просмотра зоны ответственности и выявления в ней целей, называется *зондирующим*.

Источником радиолокационной информации служит *радиолокационный сигнал*, который может быть сформирован путем либо отражения (вторичного излучения) электромагнитных колебаний от цели, либо переизлучения (ретрансляции) данных колебаний целью, либо излучения колебаний самой целью.

Операции, выполняемые в ходе радиолокационного наблюдения над принимаемыми *радиолокационными сигналами* для получения информации о целях, называют *обработкой* радиолокационных сигналов.

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 информационного 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**.

1.1. Типы радиолокационных систем

Все РЛС по способу получения информации можно разделить на следующие основные группы: **активные РЛС**, **активные РЛС с активным ответом**, **полупассивные РЛС** и **пассивные РЛС**. Первые для решения стоящих перед ними задач излучают в пространство зондирующий сигнал и извлекают затем информацию из отраженного сигнала от цели. РЛС данного типа являются основными как для военного, так и для гражданского применения. РЛС второго типа также излучают сигнал, которым облучается цель (запросный сигнал), но в ответ на данный сигнал излучается ответный, который формируется специальным ответчиком, установленным на объекте наблюдения. Частоты запросного и ответного сигналов отличаются. При этом как запросный, так и ответный сигналы кодируются специальным образом. РЛС данного типа используются в системах управления воздушным движением, а также в системах государственного опознавания. РЛС третьего типа также излучают сигнал, которым облучается цель, но прием отраженного сигнала ведется в точке, пространственно разнесенной с точкой положения излучателя зондирующего сигнала. РЛС данного типа, например, используются при поражении воздушных целей с помощью управляемых ракет. РЛС четвертого типа работают только по сигналу, который излучается собственно целью. Поэтому в составе данных РЛС имеется только приемник, который фиксирует и обрабатывает сигнал, излученный целью. РЛС данного типа используются для скрытного определения координат радиоизлучающих средств противоборствующей стороны.

По типу используемого зондирующего сигнала все РЛС делятся на радиолокаторы с **импульсным** или **непрерывным** режимом излучения. В первом случае зондирующий сигнал представляет собой последовательность радиоимпульсов с фиксированными длительностью $t_{\text{и}}$, периодом следования $T_{\text{и}}$ и несущей частотой f_0 . Во втором — непрерывное колебание, которое, например, может быть описано гармоническим колебанием заданной частоты f_0 . Для простоты обычно радиолокаторы первого типа называют **импульсными** РЛС, а второго — **непрерывными**.

По типу используемого рабочего диапазона длин волн РЛС делятся на радиолокаторы миллиметрового (мм), сантиметрового (см), дециметрового (дм), метрового (м) и более длинных диапазонов длин волн. Выбор рабочего диапазона частот зависит от предназначения РЛС. Например, в бортовых РЛС летательных аппаратов (ЛА) более предпочтительными являются мм-, дм- и см-диапазоны длин волн. В наземных и корабельных РЛС, кроме того, используются радиоволны и метрового диапазона.

В наземных же системах дальнего радиолокационного обнаружения используются радиоволны более длинных диапазонов длин волн.

По месту расположения передающей и приемной частей РЛС все РЛС делятся на однопозиционные и многопозиционные. В *первом* случае передающий канал (передатчик) и приемный канал (приемник) находятся в одной точке пространства. Во *втором* случае данные элементы разнесены в пространстве. Многопозиционные РЛС могут состоять из совокупности как приемных, так и передающих позиций, либо только из совокупности приемных позиций, либо из разнесенных в пространстве позиций, в которых одновременно располагаются как приемные, так и передающие позиции. Частным случаем многопозиционных РЛС являются полуактивные РЛС.

По типу построения все РЛС делятся на две большие группы – *некогерентные* и *когерентные*. Некогерентными называют РЛС, которые в процессе обработки радиолокационных сигналов не используют информацию, заключенную в фазе принимаемого сигнала. Данный тип РЛС используется в тех случаях, когда от радиолокатора не требуется обладание большими информационными возможностями. В когерентных системах изменение фазы принимаемого сигнала анализируется и учитывается в процессе обработки. В результате РЛС данного класса обладают большими информационными возможностями по сравнению с некогерентными. РЛС когерентного типа являются основными при использовании в военной сфере, при проведении научных исследований, связанных с наблюдением за состоянием атмосферы, а также при решении задач, связанных с получением детальных изображений земной поверхности и распознаванием наблюдаемых целей.

По месту установки и решаемым задачам все РЛС можно разделить на следующие большие 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, либо авиационные РЛС дальнего радиолокационного обнаружения воздушных целей.

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, 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 поверхности земли. В эту группу входят также и РЛС, обеспечивающие радиолокационную разведку наземных объектов и наблюдение малоразмерных наземных целей, – РЛС бокового обзора и РЛС с синтезированием апертуры антенны (РЛС СА).

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 примером таких систем являются РЛС обнаружения, входящие в системы управления воздушным движением (УВД) или противовоздушной обороны страны.

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. примером представителем таких систем являются, например, РЛС обзора летного поля, которые входят в системы управления движением самолетов в пределах аэропортов при рулении летательных аппаратов по летному полю, взлетно-посадочным полосам (ВПП) и рулежным дорожкам.

Кроме того, существует еще одна группа РЛС, которые строятся по многофункциональному принципу и объединяют в себе решение задач как систем «воздух — воздух», так и «воздух — поверхность» (для бортовых РЛС самолетов) либо «поверхность — воздух», а также «поверхность — поверхность» (для корабельных РЛС).

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, либо РЛС и оптическая система, либо РЛС и квантово-оптическая система и т.п.

Необходимо заметить, что приведенная выше классификация радиолокационных систем проведена с целью, с одной стороны, показать многообразие существующих систем, а с другой — выделить отличительные признаки радиолокационных систем, которые влияют на принципы их построения и особенности работы. С более подробной классификацией можно познакомиться, например, в [1–2].

1.2. Основные задачи, решаемые радиолокационными системами

Как отмечалось ранее, наблюдение целей ведется на фоне помеховых сигналов. В этой связи на вход приемника (ПРМ) РЛС наряду с полезным сигналом (сигналом, отраженным от цели) попадает и помеховый сигнал, который, по сути, является случайным сигналом. Природа происхождения помехового сигнала, как уже отмечалось, может быть самой разнообразной — внутренний шум ПРМ РЛС,

отражения от облака пассивных отражателей или местных предметов, организованные помехи и т.п. В этой связи говорят, что на входе ПРМ РЛС действует смесь в виде полезного сигнала и помехи или, иначе, колебание $y(t)$. В дальнейшем будем полагать, что полезный сигнал $s(t)$ и помеховый сигнал $n(t)$ входят в колебание $y(t)$ аддитивно: $y(t) = s(t) + n(t)$.

Вне зависимости от типа РЛС в ходе радиолокационного приема колебания $y(t)$, поступившего на вход ПРМ РЛС, необходимо решить следующие основные задачи:

1) обнаружить цель, т.е. наличие полезного сигнала $s(t)$, отраженного от цели, в принимаемом колебании $y(t)$. Поскольку, как отмечалось выше, прием данного сигнала $s(t)$ сопровождается различного рода помехами, которые являются случайными по своей сути, то поступление на вход ПРМ РЛС колебания $y(t)$ не означает, что на входе приемника появился полезный сигнал. Колебание $y(t)$ может как представлять из себя один помеховый сигнал (помеху): $y(t) = n(t)$, так и быть совокупностью полезного сигнала $s(t)$ и помехи $n(t)$: $y(t) = s(t) + n(t)$;

2) разрешить радиолокационные цели, т.е. отдельно обнаружить несколько одновременно действующих отраженных от целей сигналов с различающимися, но близкими по значению параметрами или измерить их параметры. При этом одновременно действующими отраженными сигналами могут выступать как полезные сигналы (сигналы, отраженные от целей, представляющих интерес), так и помеховые сигналы, например, отраженные мешающими отражателями. Если предположить, что в зоне действия РЛС имеются две близко расположенные цели, сигналы от которых наблюдаются на фоне внутренних шумов ПРМ РЛС $n(t)$, то принимаемое колебание можно представить в виде

$$y(t) = s_1(t, \xi_1) + s_2(t, \xi_2) + n(t),$$

где $s_1(t, \xi_1)$ и $s_2(t, \xi_2)$ — полезные сигналы, а ξ_1 и ξ_2 — параметры сигналов s_1 и s_2 , которыми они различаются. В результате решения задачи разрешения должно быть сформировано решение о количестве наблюдаемых целей.

В этой связи разрешение имеет смысл при наличии в зоне наблюдения РЛС нескольких целей;

3) измерить параметры ξ полезного сигнала $s(t, \xi)$ 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.

Обычно на практике перечисленные выше задачи решаются одновременно с выполнением процедуры обзора зоны ответственности РЛС (см. главу 6).

Дополнительными задачами радиолокационного наблюдения являются *различение и распознавание* целей. Если первая позволяет определить один из *классов* целей (воздушные, морские или наземные цели), то вторая 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. Более эффективное решение указанных задач возможно при использовании поляризационных характеристик принимаемого радиолокационного сигнала и всей структуры спектра отраженного сигнала.

1.3. Типовая структура радиолокационной системы

Состав элементов радиолокационной системы зависит от ее назначения и задач, решение которых возлагается на нее. Тем не менее можно рассмотреть некоторую обобщенную структурную схему РЛС и на ее примере рассказать о предназначении типовых элементов радиолокатора. Структурная схема такой гипотетической РЛС представлена на рис. 1.1 и относится к радиолокатору, в основу работы которого положен активный метод радиолокации при импульсном режиме излучения. На данной структурной схеме представлены шесть основных типовых элементов 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).

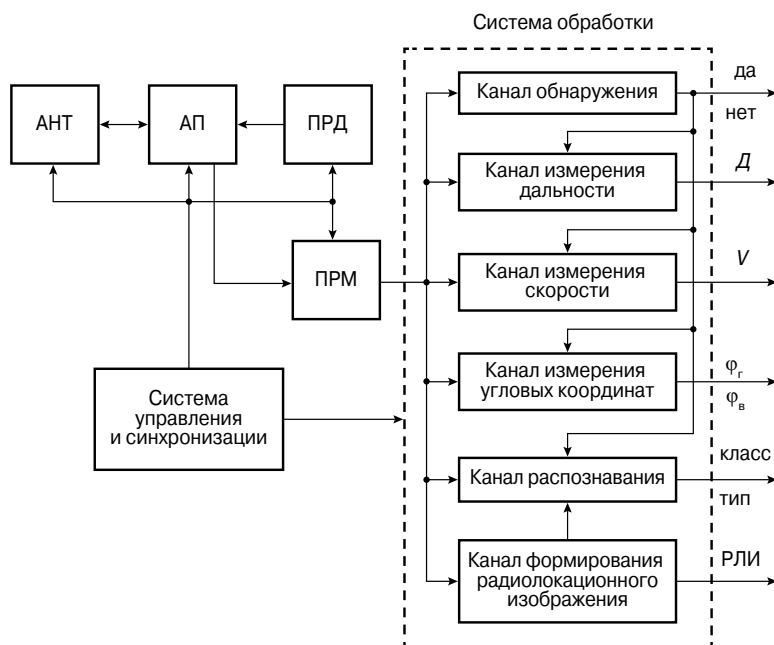


Рис. 1.1

В режиме передачи антенна обеспечивает преобразование зондирующего радиосигнала, поступившего от ПРД, в радиоволну и излучение ее (зондирующего колебания) в окружающее пространство.

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 передачи обеспечивается с помощью антенного переключателя, который управляется сигналами системы управления и синхронизации.

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. 1.1 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. 1.1, в составе системы обработки имеются шесть каналов — обнаружения, измерения дальности, измерения скорости, измерения угловых координат, распознавания и формирования радиолокационного изображения.

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 функциональным программным обеспечением.

Каждый из представленных на схеме рис. 1.1 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, радиальной 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 поверхности в пределах участка местности, облучаемого РЛС.

Каждая из рассмотренных групп алгоритмов (каналов) функционирует в тесной взаимосвязи друг с другом. В частности, установление факта наличия в зоне ответственности РЛС 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. 1.1. 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, что обычно процесс обработки в радиолокационных системах условно делят на *первичную*, *вторичную*, а в ряде случаев и на *третичную*. При этом под *первичной* обработкой, как правило, понимают процесс обработки радиолокационного сигнала в целях решения задачи обнаружения целей, находящихся в зоне ответственности РЛС, и измерения их координат. Обычно при этом считают, что координаты наблюдаемых целей за время их обнаружения остаются неизменными. Оценки координат целей, полученные на этапе решения задачи обнаружения, обычно называют первичными измерениями.

Под *вторичной* обработкой обычно понимают процесс обработки радиолокационных данных (координат и параметров движения целей), полученных в процессе решения задачи обнаружения целей в течение времени, существенно большего, чем это необходимо для решения задачи обнаружения цели (времени получения первичных измерений). В течение данного временного интервала координаты и параметры движения целей изменяются во времени, поэтому их рассматривают как функции времени. В этой связи задачей вторичной обработки является получение оценок координат и параметров движения наблюдаемых целей, изменяющихся во времени.

Под *третичной* обработкой обычно понимают процесс обработки радиолокационной информации, содержащейся в принимаемых сигналах от целей, в результате которой решаются задачи формирования изображений наблюдаемых целей (радиолокационные портреты целей) и обеспечиваются их классификация и распознавание.

Необходимо заметить, что совокупность алгоритмов, закладываемых в систему обработки, определяет возможности РЛС и качество решения задач, возлагаемых на радиолокатор. 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, роботов, обладающих 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 целях просмотра зоны ответственности РЛС и обеспечения приема отраженных сигналов от обнаруженных объектов;

- 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, современный радиолокатор (радиолокационная система) является сложным техническим устройством, при реализации которого используются все современные технологии, которые касаются как конструктивного исполнения элементов радиолокатора, так и его программного обеспечения. Программное же обеспечение, закладываемое в систему обработки радиолокатора, определяет возможности РЛС по решению возлагаемых на нее задач и качество их решения.

1.4. Основные тактические и технические характеристики радиолокационных систем

1.4.1. Тактические характеристики РЛС

К тактическим характеристикам систем радиолокации относят характеристики, которые определяют их функциональные возможности при практическом применении. Основными тактическими характеристиками являются: назначение, зона (область) или рабочая зона действия, дальность действия, разрешающая способность, точность, пропускная способность, помехозащищенность и надежность. Дополнительно к данным характеристикам относят также время обзора заданного сектора или скорость обзора, количество измеряемых координат объектов (целей).

Характеристика «**назначение**» отражает функциональное назначение систем радиолокации. Например, РЛС обзора земной поверхности, радиолокационный комплекс перехвата воздушных целей. Таким образом, в самом названии отражается предназначение систем. Однако в ряде случаев название не всегда отражает назначение системы. Примером может служить РЛС с синтезированной апертурой, которая предназначена для получения детальной радиолокационной «картины» поверхности земли или обнаружения малоразмерных целей.

Зоной действия называют область пространства, в которой система надежно (с заданным качеством) выполняет свои функции в соответствии с назначением. Для бортовых РЛС под этой областью понимают область пространства, в которой

различные объекты (цели) наблюдаются с заданными показателями обнаружения — вероятностями правильного обнаружения $P_{по}$, и ложной тревоги $P_{лт}$ либо измерение координат и параметров движения целей осуществляется с заданными погрешностями. Чаще эту область для РЛС называют зоной обзора.

Время обзора (поиска) — время, необходимое для однократного обзора заданной зоны действия системы. Выбор времени обзора зависит от маневренных возможностей наблюдаемых или управляемых объектов, размеров зоны обзора, уровня сигнала и помех, а также ряда технических и тактических характеристик, например скорости и закона перемещения антенны, ширины сканирующего луча. В случае когда речь идет об объектах наблюдения, которыми являются летательные аппараты (ЛА), время обзора должно быть в несколько раз меньше, чем время, требуемое ЛА для пересечения зоны обзора в любом направлении.

Количество измеряемых координат и параметров движения объектов зависит от назначения системы. Так, в бортовых РЛС, предназначенных для обзора поверхности земли, достаточно измерения двух координат: дальности и азимута. В РЛС перехвата и прицеливания кроме угловых координат цели и дальности до нее измеряются еще и их производные.

Дальность действия является одной из основных характеристик для систем радиолокации. При этом под дальностью действия бортовой РЛС обычно понимают дальность обнаружения, т. е. максимальное расстояние в пределах зоны действия РЛС, на котором происходит обнаружение различных целей с заданными показателями обнаружения.

Разрешающая способность — способность раздельного обнаружения и измерения координат или параметров движения близко расположенных целей. Количественно разрешающая способность оценивается минимальной разностью значений измеряемых параметров близко расположенных объектов, при которой они воспринимаются системой раздельно. Различают разрешающие способности по дальности, угловым координатам и скорости. Обычно количественные характеристики разрешающей способности по соответствующей координате обозначают как δD , $\delta \varphi_r$, $\delta \varphi_v$ и δV . Совокупность разрешающих способностей по дальности δD и угловым координатам ($\delta \varphi_r$, $\delta \varphi_v$) характеризует разрешаемый объем РЛС.

Непосредственно с разрешающей способностью радиолокационной системы связана другая ее характеристика — **точность**, которая характеризует качественные возможности систем радиолокации по измерению координат и параметров движения различных объектов. Количественно данная характеристика оценивается среднеквадратической ошибкой σ_α измерения координат объекта или их производных, где α — измеряемая величина (параметр), например дальность, угловая координата или скорость сближения.

Пропускная способность характеризуется количеством объектов, обслуживаемых системой одновременно или в единицу времени.

Помехозащищенность — способность РЛС сохранять свою работоспособность (т. е. сохранять на установленном уровне тактические характеристики) в условиях действия непреднамеренных и организованных помех. Помехозащищенность определяется скрытностью работы РЛС (РЛК) и ее (его) помехоустойчивостью.

Под **скрытностью** систем радиолокации понимают их способность противостоять радиотехнической разведке противоборствующей стороны по вскрытию факта ее работы и измерению основных параметров излучаемого радиосигнала, т.е. способность системы затруднить противоборствующей стороне обнаружение факта ее работы и измерение основных параметров излучаемых (зондирующих) радиосигналов.

Скрытность РЛС обеспечивается применением антенных систем, имеющих узкие диаграммы направленности, изменением во времени основных параметров зондирующего сигнала, созданием и излучением дополнительных радиосигналов, близких по своим параметрам к рабочим, а также использованием специальных радиосигналов с низким уровнем мощности, называемых шумоподобными из-за того, что их спектральные свойства в диапазоне рабочих частот близки к спектральным свойствам шума.

Под **помехоустойчивостью** понимают способность систем радиолокации сохранять свои тактические характеристики на заданном уровне в условиях действия определенной совокупности непреднамеренных и организованных помех. Количественной оценкой помехоустойчивости обычно является отношение мощностей сигнала и помехи (либо энергии сигнала к спектральной плотности помехи) на входе приемника системы, при котором еще сохраняются на требуемом уровне тактические характеристики системы.

Надежность – свойство РЛС сохранять свою работоспособность при заданных условиях эксплуатации. Количественно надежность оценивается вероятностью безотказной работы в течение заданного интервала времени, или средним временем исправной работы, или частотой отказов в работе.

1.4.2. Технические характеристики РЛС

К основным техническим характеристикам систем радиолокации относятся: рабочие частоты (длины волн излучаемых колебаний), мощность, вид модуляции излучаемых колебаний, ширина спектра данных колебаний, чувствительность и полоса пропускания приемного устройства, габариты и масса устройств, входящих в систему, энергия, потребляемая ими от источников питания.

Дополнительно для измерительных систем к данным параметрам можно отнести такие, как метод обзора (поиска), форма, ширина диаграммы направленности, коэффициент направленного действия антенны. Рабочие частоты (длины волн) систем радиолокации выбираются обычно исходя из предназначения системы.

Мощность, излучаемая РЛС, выбирается из условия обеспечения необходимой дальности действия. Она существенно зависит от режима работы систем радиолокации. Например, для РЛС, работающих в непрерывном режиме, излучаемая мощность лежит в интервале от единиц ватт до десятка киловатт, а при импульсном режиме – от десятка киловатт до десятка мегаватт.

Вид модуляции излучаемых колебаний определяет помехоустойчивость систем, поэтому используемый метод модуляции выбирается, во-первых, исходя из получения необходимых количественных характеристик помехоустойчивости. Во-вторых, вид модуляции определяет возможности системы по обеспечению необходимой ее разрешающей способности.

В РЛС получили распространение амплитудная манипуляция (импульсная модуляция), фазовая манипуляция и линейная частотная модуляция.

Непосредственно с видом модуляции связана другая характеристика систем — **ширина спектра** излучаемых колебаний. Чем шире ширина спектра колебаний, тем выше помехоустойчивость системы и лучше разрешающая способность РЛС по дальности.

Ширина спектра излучаемых колебаний определяет полосу пропускания приемного устройства системы, так как для того, чтобы не вносить дополнительно искажений в принимаемый сигнал, необходимо с помощью приемника анализировать весь спектр сигнала. Поэтому полоса пропускания приемника выбирается примерно равной ширине спектра излучаемых колебаний.

Чувствительность определяется как количественная мера способности радиолокационного приемника обеспечить прием слабых радиосигналов. При отсутствии внешних помех чувствительность приемника ограничивается только его внутренними шумами и оценивается минимальной требуемой (пороговой) средней мощностью сигнала на его входе, при которой еще обеспечивается заданное качество приема радиолокационного сигнала.

Способ обзора обычно выбирается с учетом размеров рабочей зоны радиолокационной системы, исходя из требуемой точности измерения координат, разрешающей способности, времени обзора рабочей зоны и ряда других факторов. В бортовых авиационных системах наибольшее распространение получили последовательные способы обзора. Например, в бортовых РЛС находит применение построчный секторный обзор пространства, когда с помощью луча диаграммы направленности антенны просматривается определенный сектор пространства путем перемещения его по строкам. Количество строк определяется заранее.

Для бортовых авиационных РЛС большое значение имеют такие технические характеристики, как **масса**, **габариты** и **энергия**, потребляемая системой от источников питания, ибо они определяют полезную нагрузку, которую может нести ЛА, а также необходимую мощность источников питания, устанавливаемых на его борту. Для наземных и корабельных РЛС данные параметры также имеют значение, но степень их критичности не столь велика, как для бортовых систем ЛА.

1.5. Контрольные вопросы и упражнения

1. Что понимается под радиолокационной системой?
2. На какие типы радиолокационные системы подразделяются по способу получения информации об окружающей обстановке?
3. На какие типы радиолокационные системы подразделяются по месту установки передающей и приемной частей радиолокатора?
4. В чем состоит различие в принципах работы когерентных и некогерентных импульсных радиолокационных систем?
5. Какие классы радиолокационных систем Вам известны?
6. Что понимают под радиолокационным комплексом?
7. Перечислите основные задачи, которые решаются РЛС в ходе радиолокационного приема.
8. Перечислите основные составные части РЛС.

9. Какую роль в РЛС играет антенная система?
10. Какие функции выполняет передатчик РЛС?
11. Какие функции выполняет приемник РЛС?
12. Какую роль играет в РЛС система управления и синхронизации?
13. Какие функции в РЛС выполняет система обработки?
14. Что понимается под первичной обработкой сигналов?
15. Что понимается под вторичной обработкой сигналов?
16. Что понимается под третичной обработкой сигналов?
17. Что понимают под программным обеспечением системы обработки сигналов РЛС?
18. Что понимается под тактическими характеристиками радиолокатора?
19. Что понимается под техническими характеристиками РЛС?
20. Перечислите основные тактические характеристики РЛС.
21. Перечислите основные технические характеристики РЛС.

ГЛАВА 2

ОБНАРУЖЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ И ЦЕЛЕЙ

2.1. Обнаружение радиолокационных сигналов в виде когерентной пачки радиоимпульсов

2.1.1. Образование импульсных радиолокационных сигналов в виде пачек радиоимпульсов

Наибольшее распространение в современных и перспективных РЛС различного назначения находит импульсный режим работы. При работе в импульсном режиме РЛС излучает в пространство последовательность радиоимпульсов одинаковой длительности $t_{\text{и}}$ с периодом повторения или следования, равным $T_{\text{и}}$. При этом, как правило, при обзоре наблюдаемого пространства РЛС последовательно просматривает заданную область путем перемещения (сканирования) главного луча диаграммы направленности (ДН) антенны по определенному закону. В результате перемещения антенного луча со скоростью $\Omega_{\text{ск}}$ он находится на цели в течение некоторого ограниченного времени $t_{\text{обл}}$ (времени облучения):

$$t_{\text{обл}} = \frac{\theta_{\text{а}}}{\Omega_{\text{ск}}}, \quad (2.1)$$

где $\theta_{\text{а}}$ — ширина главного луча ДН антенны РЛС.

За данное время $t_{\text{обл}}$ в направлении на РЛС от цели отразятся N импульсов:

$$N = \frac{\theta_{\text{а}}}{\Omega_{\text{ск}} T_{\text{и}}}. \quad (2.2)$$

Из (2.2) видно, что величина N зависит от угловой скорости $\Omega_{\text{ск}}$ перемещения луча ДН антенны, его ширины $\theta_{\text{а}}$ и периода следования $T_{\text{и}}$ зондирующих радиоимпульсов. Следовательно, при импульсном зондирующем сигнале отраженный сигнал от цели представляет собой последовательность импульсов ограниченной длительности, которую можно записать в виде

$$s(t) = \sum_{i=1}^N s_i[t - (i-1)T_{\text{и}}] \cos[\omega t - \varphi(i)], \quad (2.3)$$

где $s_i[\bullet]$ — огибающая отдельного импульса последовательности; $\omega = 2\pi f_0$, f_0 — несущая частота импульсного сигнала; $\varphi(i)$ — фаза i -го импульса последовательности. В радиолокации данную ограниченную последовательность называют пачкой радиоимпульсов.

В зависимости от характера изменения $\varphi(i)$ различают когерентные и некогерентные пачки радиоимпульсов. Если закон изменения фазы $\varphi(i)$ от импульса к импульсу известен, то пачка называется **когерентной**. В данном случае фазу i -го импульса пачки радиоимпульсов можно записать в виде $\varphi(i) = 2\pi(i-1)f_d T_n$. Здесь f_d — доплеровское смещение частоты принимаемого сигнала.

Если закон изменения фазы $\varphi(i)$ от импульса к импульсу неизвестен, то пачка называется **некогерентной**. Обычно в этом случае фаза $\varphi(i)$ отдельно взятого импульса может принимать любое значение. При этом изменение фазы от одного значения к другому не связано с тем, какое значение фазы принимает соседний импульс пачки. Поэтому говорят, что фаза отдельно взятого импульса некогерентной пачки изменяется по случайному закону.

В реальных условиях радиолокационный сигнал имеет случайные параметры — фазу и амплитуду. Поэтому в выражении (2.3) при рассмотрении пачки радиоимпульсов, отраженных от цели, помимо фазовой компоненты $\varphi(i)$ необходимо ввести еще и случайную фазу φ_0 . Амплитуду же импульсов будем пока считать неизменной. Если пачка рассматривается как когерентная, то данная случайная фаза φ_0 будет являться общей для всех импульсов пачки.

Для некогерентной же пачки импульсов добавление данной фазовой компоненты не изменит характер изменения ее фазы, поэтому модель сигнала некогерентной пачки можно представить в виде (2.3), в котором фазу $\varphi(i)$ необходимо рассматривать как случайную фазу отдельно взятого радиоимпульса.

С учетом введенных понятий о пачках отраженных радиоимпульсов рассмотрим теперь особенности обнаружения сигналов в виде когерентной и некогерентной пачек импульсов.

2.1.2. Обнаружение радиолокационного сигнала в виде когерентной пачки радиоимпульсов со случайной начальной фазой

Будем считать, что принимаемое колебание $y(t)$, действующее на входе приемника РЛС, имеет вид

$$y(t) = s(t) + n(t), \quad t \in [0, T_n], \quad (2.4)$$

где T_n — время наблюдения, соответствующее длительности пачки; $n(t)$ — внутренний шум приемника РЛС, который будем полагать белым гауссовским с известными характеристиками — нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией вида $k(\tau) = (N_0/2) \delta(\tau)$. Здесь N_0 — спектральная плотность мощности внутренних шумов приемника, а $\delta(\tau)$ — дельта-функция.

Полезный же сигнал $s(t)$ будем рассматривать в виде когерентной пачки со случайной начальной фазой и представлять в виде

$$s(t) = \sum_{i=1}^N s[t - (i-1)T_n] \cos[\omega t - \varphi(i) - \varphi_0], \quad (2.5)$$

где φ_0 — общая для всех импульсов пачки случайная начальная фаза, обусловленная дальностью D_0 до цели в момент излучения первого импульса, равная $4\pi D_0/\lambda$. На-

начальная фаза φ_0 может принимать любое значение из интервала $[0, 2\pi]$, поэтому будем считать ее равномерно распределенной в данных пределах с плотностью вероятности $p(\varphi_0) = 1/2\pi$.

Разложим полезный сигнал $s(t)$ на ортогональные (квадратурные) составляющие, опираясь на известное тригонометрическое соотношение $\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta$. Тогда (2.5) можно записать как

$$s(t) = \sum_{i=1}^N [s_{1i}(t) \cos \varphi_0 + s_{2i}(t) \sin \varphi_0], \quad (2.6)$$

где $s_{1i}(t) = s[t - (i - 1)T_n] \cos [\omega t - \varphi(i)]$ – косинусная составляющая, а $s_{2i}(t) = s[t - (i - 1)T_n] \sin [\omega t - \varphi(i)]$ – синусная составляющая разложения сигнала (2.5).

Необходимо, опираясь на выражения (2.4)–(2.6) и критерий Неймана – Пирсона, как основной критерий принятия решения в радиолокации об обнаружении, найти оптимальный алгоритм обнаружения когерентной пачки радиоимпульсов со случайной начальной фазой.

Из курса статистической радиотехники известно, что для нахождения алгоритма обнаружения сигнала на фоне помех необходимо составить отношение правдоподобия $\Lambda(y)$, которое для полностью известного сигнала имеет вид

$$\Lambda(y) = \exp\left(-\frac{E_c}{N_0}\right) \exp\left\{\frac{2}{N_0} \int_0^{T_n} y(t) s(t) dt\right\}, \quad (2.7)$$

где E_c – энергия полезного сигнала.

Используя (2.7) и выражение (2.6), запишем отношение правдоподобия $\Lambda(y)$ для случая обнаружения радиолокационного сигнала в виде когерентной пачки со случайной начальной фазой в виде

$$\Lambda(y, \varphi_0) = \exp\left(-\frac{E_c}{N_0}\right) \exp\left\{\frac{2}{N_0} \int_0^{T_n} y(t) \sum_{i=1}^N [s_{1i}(t) \cos \varphi_0 + s_{2i}(t) \sin \varphi_0] dt\right\}. \quad (2.8)$$

Из (2.8) видно, что полученное отношение правдоподобия является функцией случайной фазы φ_0 . Следовательно, величина Λ является случайной, поэтому использовать ее для принятия решения об обнаружении цели пока нельзя. Для устранения неопределенности, вызванной случайной фазой φ_0 , необходимо провести усреднение Λ по φ_0 , т.е. выполнить процедуру

$$\bar{\Lambda} = M\{\Lambda\}_{\varphi_0} = \int_0^{2\pi} \Lambda(y, \varphi_0) p(\varphi_0) d\varphi_0.$$

Здесь $M\{\dots\}$ – операция взятия математического ожидания.

Усредняя (2.8) по случайной начальной фазе φ_0 и используя табличный интеграл вида

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(a \cos x + b \sin x) dx = I_0(\sqrt{a^2 + b^2}),$$

получим

$$\bar{\Lambda} = \exp\left(-\frac{E_c}{N_0}\right) I_0\left(\frac{2}{N_0} \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2}\right), \quad (2.9)$$

где $Z_1 = \sum_{i=1}^N \int_0^{t_n} y(t) s_{1i}(t) dt$, $Z_2 = \sum_{i=1}^N \int_0^{t_n} y(t) s_{2i}(t) dt$; t_n — длительность отдельного импульса пачки, $I_0(\dots)$ — функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка. Учитывая, что функция (2.9) является монотонной, перейдем к логарифму отношения правдоподобия. Тогда, логарифмируя (2.9), получим

$$\ln \bar{\Lambda} = -\frac{E_c}{N_0} + \ln I_0\left(\frac{2}{N_0} \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2}\right). \quad (2.10)$$

Из выражения (2.10) видно, что единственной существенной операцией при обработке наблюдения (2.4) является вычисление величины $\sqrt{Z_1^2 + Z_2^2}$. Для нахождения окончательного выражения для алгоритма обнаружения когерентной пачки со случайной начальной фазой воспользуемся аппроксимацией функции $\ln I_0(x)$ вида

$$\ln I_0(x) = \begin{cases} 0,25x^2, & x \leq 1, \\ x, & x > 1. \end{cases} \quad (2.11)$$

В результате получим

$$\ln \bar{\Lambda} \cong -\frac{E_c}{N_0} + \left(\frac{2}{N_0} \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2}\right). \quad (2.12)$$

Выражение (2.12) справедливо при большом числе накапливаемых импульсов, что обычно выполняется на практике.

Из соотношения (2.12) следует, что алгоритм обнаружения когерентной пачки радиоимпульсов со случайной начальной фазой можно записать следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = \left\{ \left[\sum_{i=1}^N \int_0^{t_n} y(t) s_{1i}(t) dt \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^N \int_0^{t_n} y(t) s_{2i}(t) dt \right]^2 \right\}^{0,5} \geq U_{\text{пор}}. \quad (2.13)$$

В соответствии с алгоритмом (2.13) оптимальная процедура обнаружения состоит в следующем. Первоначально необходимо выполнить корреляционную обработку ортогональных составляющих входного сигнала в течение времени, равного длительности отдельного радиоимпульса. Затем провести суммирование

(накопление) получаемых результатов за временной интервал, равный длительности пачки. После чего необходимо выделить огибающую выходного сигнала (огибающую корреляционного интеграла, входящего в показатель второй экспоненты выражения (2.8)) путем образования квадратов сумм, их сложения и извлечения квадратного корня. Затем результат данных преобразований $U_{\text{вых}}$ необходимо сравнить с порогом $U_{\text{пор}}$, выбор которого должен быть согласован с критерием принятия решения. В нашем случае это критерий Неймана – Пирсона.

Вычисление корреляционного интеграла, как это следует из статистической радиотехники, возможно двумя способами: либо с помощью корреляционного приемника, либо с помощью согласованного фильтра (см. приложение 1). Поэтому оптимальное устройство обнаружения когерентной пачки импульсов со случайной начальной фазой может быть также реализовано двумя способами (рис. 2.1а и б): либо на базе корреляционного приемника, либо на базе согласованного фильтра.

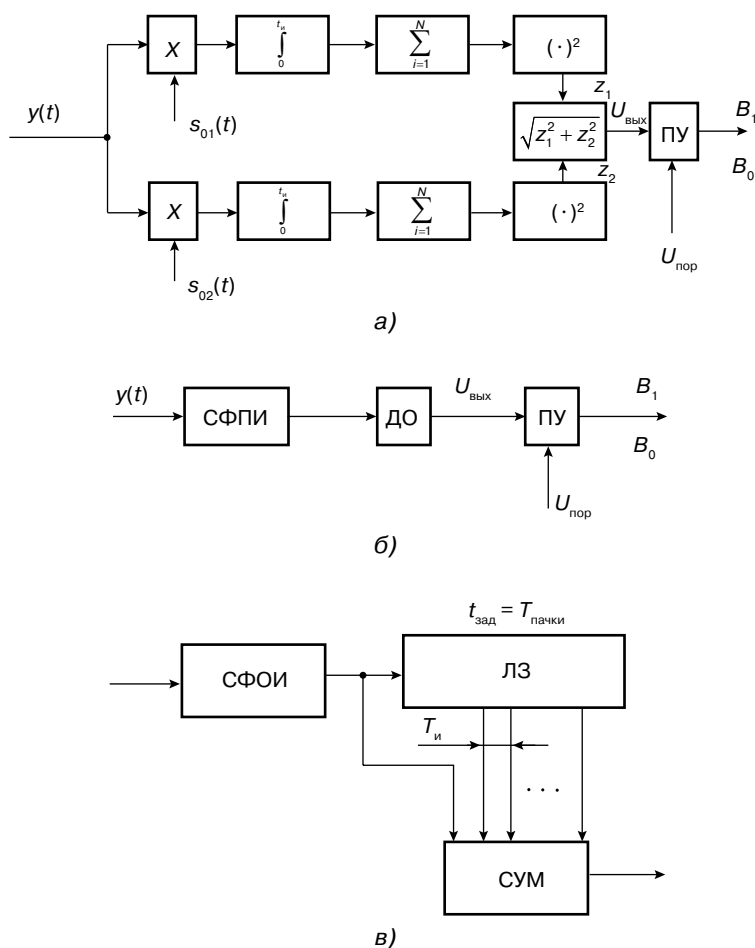


Рис. 2.1

При реализации обнаружителя на базе корреляционного приемника, как это видно из рис. 2.1а, приемник состоит из двух параллельно включенных каналов, выполненных по аналогичной схеме и включающих корреляторы и накопители. Выходные сигналы каждого из каналов объединяются в квадратуре, поэтому данный приемник еще называют квадратурным приемником. Каждый канал корреляционного приемника непосредственно выполняет операции, заключенные в квадратные скобки левой части алгоритма (2.13). После накопления результатов обработки отдельных импульсов пачки в каждом канале реализуется операция выделения огибающей результирующего выходного сигнала — возведение в квадрат, суммирование и извлечение квадратного корня в фигурных скобках выражения (2.13). Каждый коррелятор состоит из умножителя и интегратора, время интегрирования которого равно длительности $t_{\text{и}}$ отдельного импульса пачки. На умножители подаются сдвинутые по фазе на $0,5\pi$ опорные сигналы $s_{01}(t)$ и $s_{02}(t)$, которые с точностью до начальной фазы совпадают с ортогональными составляющими $s_1(t)$ и $s_2(t)$ полезного сигнала $s(t)$ соответственно.

Сумматоры в каждом из каналов обеспечивают накопление результатов обработки за время, равное длительности пачки $(N - 1)T_{\text{и}} + t_{\text{и}}$. После объединения результатов обработки каналов и выделения огибающей результирующего сигнала (операции: возведение в квадрат, суммирование квадратов величин и извлечение квадратного корня на рис. 2.1а) его пиковое значение (величина $U_{\text{вых}}$) в момент окончания $T_{\text{и}}$ сравнивается с пороговым уровнем $U_{\text{пор}}$, для чего напряжение $U_{\text{вых}}$ подается на пороговое устройство (ПУ). При превышении порога принимается решение B_1 о наличии полезного сигнала в $y(t)$ (о наличии цели в зоне ответственности РЛС). В противном случае принимается решение B_0 (об отсутствии цели).

При реализации оптимального обнаружителя когерентной пачки на согласованном фильтре его структура имеет вид, приведенный на рис. 2.1б. Согласованный фильтр с пачкой радиоимпульсов (СФПИ) должен обладать частотной характеристикой, комплексно сопряженной со спектром когерентной пачки. Такой фильтр может быть реализован с помощью СФ с одиночным импульсом (СФОИ), линии задержки (ЛЗ) с отводами и сумматора СУМ (рис. 2.1в). После СФПИ, как и в предыдущем случае, следует устройство выделения огибающей — детектор огибающей (ДО). Данный детектор выделяет огибающую напряжения на входе СФПИ. В момент $t = T_{\text{и}}$ также происходит сравнение пикового значения $U_{\text{вых}}$ с пороговым уровнем $U_{\text{пор}}$.

Полученный алгоритм (2.13) и схемы на рис. 2.1 позволяют реализовать обнаружитель когерентной пачки радиоимпульсов со случайной начальной фазой, который может быть выполнен как аппаратными, так и программными средствами.

2.2. Обнаружение радиолокационного сигнала в виде некогерентной пачки радиоимпульсов

Будем считать, что полезный сигнал, входящий в принимаемое колебание $y(t)$ (2.4), имеет вид

$$s(t) = \sum_{i=1}^N s_i[t - (i-1)T_{\text{и}}] \cos[\omega_0 t - \varphi_i], \quad (2.14)$$