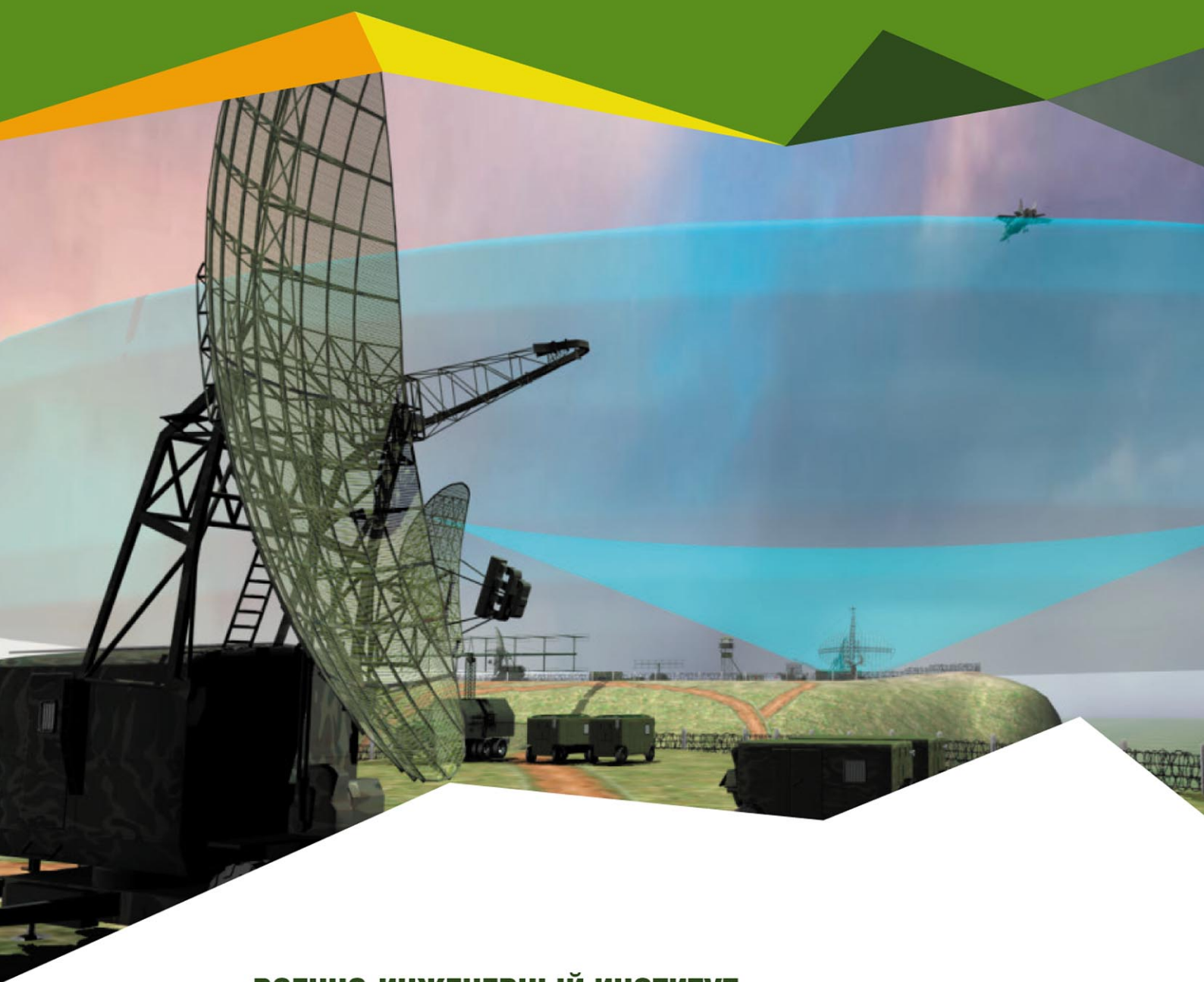




СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УЧЕБНИК



ВОЕННО-ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ

УДК 621.396.96(075.8)

ББК 32.95я73

P154

Авторы:

В. П. Бердышев, Е. Н. Гарин, А. Н. Фомин, В. Н. Тяпкин,
Ю. Л. Фатеев, И. В. Лютиков, А. В. Богданов, Р. Ю. Кордюков

P154 Радиолокационные системы : учебник / В. П. Бердышев, Е. Н. Гарин, А. Н. Фомин [и др.] ; под общ. ред. В. П. Бердышева. – 2-е изд. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2021. – 400 с.
ISBN 978-5-7638-4487-0

Рассмотрены общие понятия, принципы и физические основы радиолокации, сигналы и помехи в радиолокации, характеристики радиолокационных целей. Изложена статистическая теория обнаружения радиолокационных сигналов. Приведены методы реализации радиолокационных устройств и систем, основы статистической теории разрешения радиолокационных сигналов, основы статистической теории оценивания параметров радиолокационных сигналов. Рассмотрены особенности получения радиолокационной информации в многопозиционных системах и особенности эксплуатации радиолокационных систем.

Изложение теоретического материала учебника иллюстрировано большим количеством графиков и рисунков, сопровождается контрольными вопросами и задачами для проверки усвоения учебного материала и самопроверки.

Предназначен для студентов военных кафедр и курсантов учебных военных центров Военно-воздушных сил, обучающихся по военно-учетной специальности «Эксплуатация и ремонт радиолокационных комплексов противовоздушной обороны Военно-воздушных сил». Может быть полезен студентам укрупненной группы направления специальностей 210000 «Электронная техника, радиотехника и связь» (спец. 210304.65 «Радиоэлектронные системы»), а также всем интересующимся вопросами становления, развития и современного состояния радиолокационных систем.

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 621.396.96(075.8)
ББК 32.95я73

ISBN 978-5-7638-4487-0

© Сибирский федеральный
университет, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ.....	3
КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ИСТОРИИ РАДИОЛОКАЦИИ	5
ГЛАВА 1	
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИИ.....	16
1.1. ПРИНЦИПЫ, ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ВИДЫ РАДИОЛОКАЦИИ.....	16
1.2. ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ.....	18
1.3. СПОСОБЫ ОБЗОРА ПРОСТРАНСТВА	20
1.4. ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ	22
1.5. ДИАПАЗОНЫ РАДИОВОЛН, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАДИОЛОКАЦИИ.....	23
ГЛАВА 2	
СИГНАЛЫ И ПОМЕХИ В РАДИОЛОКАЦИИ	25
2.1. ВИДЫ РАДИОСИГНАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В РЛС.....	25
2.1.1. ВИДЫ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ.....	25
2.1.2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ	28
2.1.3. СЛОЖНЫЕ СИГНАЛЫ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ	34
2.2. ЯВЛЕНИЕ ВТОРИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОВОЛН	37
2.2.1. ОТРАЖЕНИЕ, РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕИЗЛУЧЕНИЕ РАДИОВОЛН ОБЪЕКТАМИ (ЦЕЛЯМИ).....	37
2.2.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ	37
2.2.3. ЭФФЕКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ РАССЕЯНИЯ ЦЕЛЕЙ.....	38
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	49
2.3. МОДЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ, ШУМОВ И ПОМЕХ.....	49
2.3.1. МОДЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ	50
2.3.2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШУМОВ И ПОМЕХ	56
2.3.3. СТРУКТУРА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ.....	61
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	64
ГЛАВА 3	
ОСНОВЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ.....	66
3.1. ПОСТАНОВКА И МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ.....	66
3.1.1. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ	66
3.1.2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ	70
3.1.3. ОПТИМАЛЬНОЕ РЕШАЮЩЕЕ ПРАВИЛО	72
3.2. ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ С ПОЛНОСТЬЮ ИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ	74
3.2.1. ОТНОШЕНИЕ ПРАВДОПОДОБИЯ И АЛГОРИТМ ОДНОКАНАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА С ИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ФОНЕ КВАЗИБЕЛОГО ШУМА.....	74
3.2.2. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ	78
3.3. ОБНАРУЖЕНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ СО СЛУЧАЙНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	81

3.3.1. МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ ПРАВДОПОДОБИЯ. ОБЩИЕ СООТНОШЕНИЯ.....	81
3.3.2. ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛА СО СЛУЧАЙНОЙ НАЧАЛЬНОЙ ФАЗОЙ.....	83
3.3.3. ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ СО СЛУЧАЙНЫМИ АМПЛИТУДОЙ И НАЧАЛЬНОЙ ФАЗОЙ.....	85
3.4. ОБНАРУЖЕНИЕ НЕКОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ.....	89
3.4.1. МОДЕЛЬ НЕКОГЕРЕНТНОГО СИГНАЛА. ОТНОШЕНИЕ ПРАВДОПОДОБИЯ.....	90
3.4.2. НЕКОГЕРЕНТНОЕ НАКОПЛЕНИЕ СИГНАЛОВ. АНАЛИЗ КАЧЕСТВА НЕКОГЕРЕНТНОГО НАКОПЛЕНИЯ.....	92
3.4.3. ЦИФРОВЫЕ ОБНАРУЖИТЕЛИ.....	97
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	99
3.5. ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЗОНЫ ВИДИМОСТИ РЛС.....	100
3.5.1. ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ РЛС.....	100
3.5.2. ВЛИЯНИЕ ЗЕМЛИ И АТМОСФЕРЫ НА ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ РЛС.....	104
3.5.3. ЗОНЫ ВИДИМОСТИ РЛС.....	109
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	111
ГЛАВА 4	
МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ.....	113
4.1. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ.....	113
4.1.1. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ СИГНАЛОВ С ПОЛНОСТЬЮ ИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	113
4.1.2. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ СИГНАЛОВ СО СЛУЧАЙНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	116
4.1.3. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ СИГНАЛОВ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	119
4.2. ФИЛЬТРОВЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ.....	122
4.2.1. ВРЕМЕННЫЕ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЛЬТРОВ, СОГЛАСОВАННЫХ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СИГНАЛОВ.....	122
4.2.2. ИМПУЛЬСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФИЛЬТРА.....	123
4.2.3. ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФИЛЬТРА.....	125
4.2.4. ПРОХОЖДЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА И ШУМОВ ЧЕРЕЗ СОГЛАСОВАННЫЙ ФИЛЬТР.....	128
4.2.5. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ФИЛЬТРОВЫХ ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ.....	130
4.3. СОГЛАСОВАННЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ.....	131
4.3.1. СОГЛАСОВАННЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ГАУССОВЫХ И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ РАДИОИМПУЛЬСОВ.....	132
4.3.2. СОГЛАСОВАННЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ КОГЕРЕНТНЫХ ПАЧЕК РАДИОИМПУЛЬСОВ..	137
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	143
4.3.3. ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫЕ СИГНАЛЫ И СОГЛАСОВАННЫЕ С НИМИ ФИЛЬТРЫ.....	144
4.3.4. ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫЕ СИГНАЛЫ И СОГЛАСОВАННЫЕ С НИМИ ФИЛЬТРЫ.....	150
4.4. КОРРЕЛЯЦИОННО-ФИЛЬТРОВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ.....	157
4.4.1. КОРРЕЛЯЦИОННО-ФИЛЬТРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НА ФОНЕ БЕЛОГО ШУМА.....	157
4.4.2. ПРИМЕРЫ КОРРЕЛЯЦИОННО-ФИЛЬТРОВОЙ ОБРАБОТКИ.....	159
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	164

4.5. ЗАЩИТА РЛС ОТ ПАССИВНЫХ И АКТИВНЫХ ПОМЕХ.	
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ	165
4.5.1. ОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ	165
4.5.2. ПРИМЕРЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ.	
БОРЬБА С ПАССИВНЫМИ ПОМЕХАМИ	178
4.5.3. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ СДЦ.....	192
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	205
4.5.4. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ.....	206
4.6. ЦИФРОВАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ.....	217
4.6.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЦИФРОВАННЫХ СИГНАЛОВ И ШУМОВ	218
4.6.2. ЦИФРОВОЙ КОРРЕЛЯТОР	220
4.6.3. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ	
СИГНАЛОВ	222
4.6.4. ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ.	
ДИСКРЕТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ И ЕГО СВОЙСТВА	226
4.6.5. БЫСТРОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ	232

ГЛАВА 5

ОСНОВЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ РАЗРЕШЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ..... 235

5.1. АВТОКОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ	235
5.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЗРЕШЕНИИ СИГНАЛОВ.	
УСТРОЙСТВА РАЗРЕШЕНИЯ СИГНАЛОВ	235
5.1.2. ВРЕМЯЧАСТОТНАЯ ФУНКЦИЯ РАССОГЛАСОВАНИЯ КОГЕРЕНТНЫХ	
СИГНАЛОВ И ЕЁ СВОЙСТВА. ФУНКЦИИ И ДИАГРАММЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.....	239
5.1.3. РАЗРЕШАЮЩИЕ СПОСОБНОСТИ ПО ДАЛЬНОСТИ, СКОРОСТИ	
И УГЛОВЫМ КООРДИНАТАМ	244
5.2. АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ	
БЕЗ ВНУТРИИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ	246
5.2.1. ВРЕМЯЧАСТОТНАЯ ФУНКЦИЯ РАССОГЛАСОВАНИЯ ОДИНОЧНОГО	
РАДИОИМПУЛЬСА	246
5.2.2. ВРЕМЯЧАСТОТНАЯ ФУНКЦИЯ РАССОГЛАСОВАНИЯ КОГЕРЕНТНОЙ ПАЧКИ	
РАДИОИМПУЛЬСОВ.....	249
5.3. АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ	
С ВНУТРИИМПУЛЬСНОЙ ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ	
И ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ	254
5.3.1. ВРЕМЯЧАСТОТНАЯ ФУНКЦИЯ РАССОГЛАСОВАНИЯ СИГНАЛОВ С ЛЧМ.	
ПРЕИМУЩЕСТВА ЛЧМ-СИГНАЛОВ	255
5.3.2. ЖЕЛАЕМАЯ ФУНКЦИЯ РАССОГЛАСОВАНИЯ. ВРЕМЯЧАСТОТНАЯ ФУНКЦИЯ	
РАССОГЛАСОВАНИЯ СИГНАЛОВ С ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ	259
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	266
5.4. РАЗРЕШЕНИЕ ПО УГЛОВЫМ КООРДИНАТАМ	267
5.4.1. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ АКФ	267
5.4.2. РАДИОЛОКАТОРЫ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ	271

ГЛАВА 6

ОСНОВЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ..... 276

6.1. ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ	
СИГНАЛОВ	276
6.1.1. ПОКАЗАТЕЛИ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ.....	276

6.1.2. УРАВНЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ	281
6.1.3. УСТРОЙСТВА ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ	284
6.2. ИЗМЕРИТЕЛИ ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ (ДАЛЬНОСТИ).....	290
6.2.1. НЕСЛЕДЯЩИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ ДАЛЬНОСТИ ОБЗОРНОГО ТИПА	290
6.2.2. ДИСКРИМИНАТОРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ (ДАЛЬНОСТИ).....	293
6.2.3. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ	299
6.3. ИЗМЕРИТЕЛИ СКОРОСТИ ЦЕЛЕЙ.....	303
6.3.1. НЕСЛЕДЯЩИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ ЧАСТОТЫ (СКОРОСТИ)	303
6.3.2. ДИСКРИМИНАТОРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ ЧАСТОТЫ	306
6.3.3. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ	310
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	314
6.4. РАДИОПЕЛЕНГАТОРЫ.....	315
6.4.1. ОДНОКАНАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ	316
6.4.2. МОНОИМПУЛЬСНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ.....	319
6.4.3. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ.....	329
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	331
6.5. РАСПОЗНАВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ	332
6.6. СЕЛЕКЦИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ	343
6.6.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СЕЛЕКЦИИ	343
6.6.2. ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ. КРИТЕРИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ СИНТЕЗЕ РЕШАЮЩИХ ПРАВИЛ	344
6.6.3. СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ СЕЛЕКЦИИ ЕДИНСТВЕННОЙ ЦЕЛИ В ГРУППЕ.....	346
ГЛАВА 7	
ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМАХ	350
7.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РЛС. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ.....	350
7.2. ПРИНЦИП ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ.....	356
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	362
ГЛАВА 8	
ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ	364
8.1. ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ.....	364
8.2. СИСТЕМА КАЧЕСТВА	365
8.3. ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	367
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	390
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	391
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	393
ОГЛАВЛЕНИЕ	396

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИИ

1.1. ПРИНЦИПЫ, ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ВИДЫ РАДИОЛОКАЦИИ

Основные принципы получения радиолокационной информации могут быть сформулированы в виде следующих положений:

1. При обнаружении наличие цели устанавливается по факту приёма станцией сигнала от цели. Способ получения такого сигнала определяет вид локации.

2. При измерении координат и параметров движения целей используются закономерности распространения радиоволн в пространстве, основными из которых являются:

постоянство скорости распространения радиоволн ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с);
прямолинейность распространения радиоволн;
направленность излучения и приёма радиоволн, в основе которой лежит явление интерференции радиоволн;
эффект Доплера.

3. Выделение слабых сигналов, приходящих от цели, и разрешение целей обеспечиваются за счет различий сигналов и помех, а также сигналов от разных целей между собой.

4. Информация о целях получается параллельно или последовательно во времени и выдается в виде информационных потоков.

Рассмотрим перечисленные положения более подробно.

К видам излучения относятся: вторичное излучение, переизлучение и собственное излучение радиоволн. В первом и втором случаях радиолокатор излучает в направлении на цель мощный зондирующий сигнал; в последнем случае облучение цели не требуется.

Радиолокация с использованием вторичного излучения и переизлучения (ретрансляции) называется активной, а радиолокация с использованием собственного излучения – пассивной.

Активную радиолокацию с переизлучением называют радиолокацией с активным ответом (рис. 1.1, б). При использовании вторичного излучения можно по аналогии говорить о радиолокации с пассивным ответом (рис. 1.1, а).

Явление вторичного излучения позволяет обнаружить цели, не являющиеся источниками собственных радиоизлучений или переизлучений. Принимаемый сигнал при этом называют *отраженным*.

Активный ответ находит широкое применение при радиолокации и опознавании своих объектов: самолетов, ракет, противоракет и искус-

ственных спутников Земли. На объекте в данном случае устанавливается приёмопередатчик (ответчик), обеспечивающий достаточно большую интенсивность переизлученного сигнала.

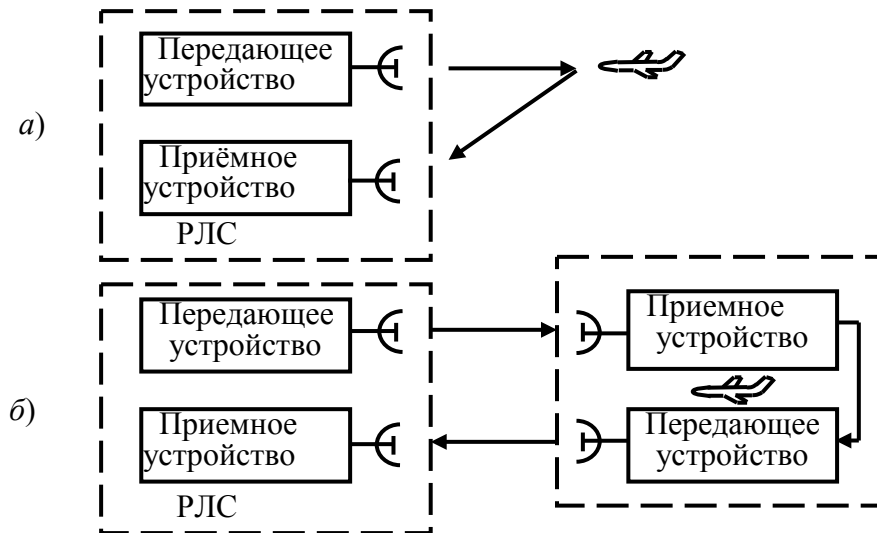


Рис. 1.1. Виды радиолокации: *а* – активная с пассивным ответом; *б* – активная с активным ответом

Системы активной радиолокации могут быть *совмещенными* и *разнесенными*. В совмещенном радиолокаторе передающее и приемное устройства располагаются совместно (рис. 1.1), возможно поочередное использование одной и той же антенны для передачи и приема.

В *разнесенной системе* передающее и приемное устройства располагают на удалении d друг от друга (рис. 1.2). Для наземной разнесенной системы (рис. 1.2, *а*) характерно постоянство расстояния d между приемными и передающими пунктами. При расположении передающего пункта на Земле, а приемного на самонаводящейся ракете (рис. 1.2, *б*) расстояние d является переменным.

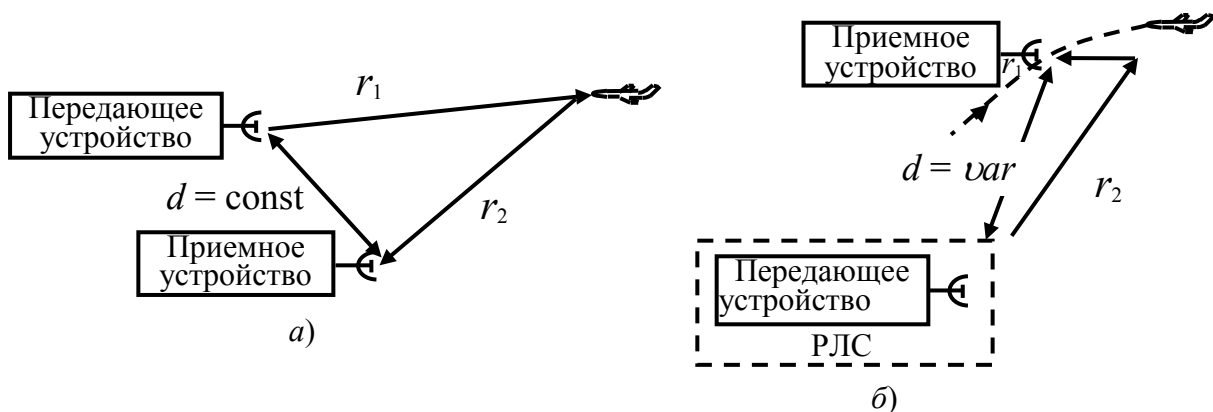


Рис. 1.2. Разнесенные системы активной радиолокации: *а* – наземная; *б* – при расположении передающего пункта на Земле, а приемного на самонаводящейся ракете

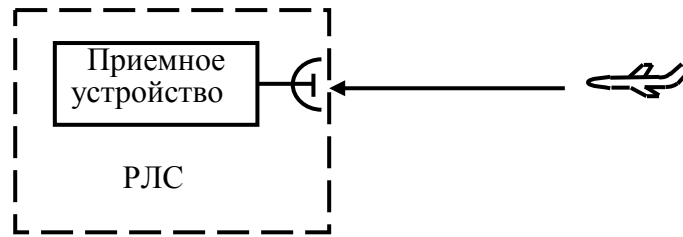


Рис. 1.3. Пассивная радиолокация

В случае *пассивной радиолокации* (рис. 1.3) цель электромагнитными колебаниями не облучается. Электромагнитные колебания создаются элементами цели: её нагретыми частями (тепловое излучение в диапазоне инфракрасных или миллиметровых волн), радиотехническими устройствами связи, навигации, локации, радиопротиводействия (обычное радиоизлучение), а также колеблющимися частицами ионизированных участков атмосферы в окрестности цели (радиоизлучение при запуске ракеты или ядерном взрыве, распространяющееся в сверхдлинноволновом диапазоне на очень большие расстояния вокруг Земли). Прием может осуществляться одним или несколькими разнесенными приемными устройствами.

1.2. ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ

При определении координат цели в любой радиолокационной системе используются определенные закономерности распространения радиоволн. В случае распространения радиоволн в свободном пространстве, которое является однородным, изотропным и недиспергирующим, для всех точек этого пространства скорость распространения радиоволн одинакова, не зависит от поляризации волны и частоты колебания ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с). При этом зондирующий и отраженный сигналы распространяются по прямой траектории и без искажения своей формы. *Время запаздывания* отраженного сигнала относительно зондирующего (рис. 1.4) для разнесенной системы определяется соотношением

$$t_3 = \frac{r_1 + r_2}{c}$$

(r_1 и r_2 – расстояния от цели до передающего и приемного пунктов соответственно, рис. 1.2, а) и для совмещенной системы радиолокации (рис. 1.1, а) соотношением

$$t_3 = \frac{2r}{c}.$$

В последнем случае дальность до цели

$$r = \frac{ct_3}{2}.$$

Концентрация излучаемой энергии в каком-то одном направлении и направленный приём обеспечивают существенное увеличение дальности радиолокации. Появляется возможность измерять угловые координаты цели – азимут и угол места, например, по максимуму отраженного сигнала (рис. 1.5а), а также разрешать цели по угловым координатам (рис. 1.5б). Ширина ДНА (характеристики) радиолокатора определяется соотношением её геометрических размеров к длине волны. Поэтому высокие направленные свойства обеспечиваются за счет увеличения размеров антенны и использования дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазона волн.

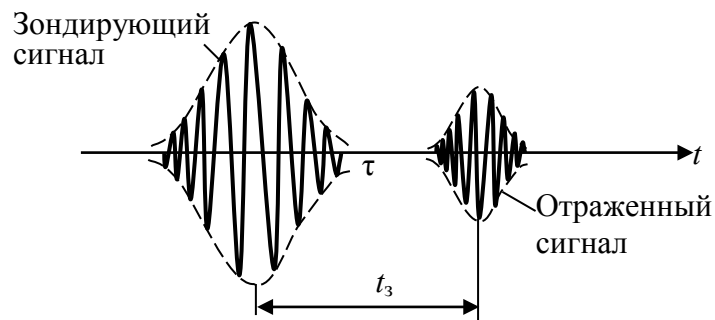


Рис. 1.4. Вид зондирующего и отраженного сигналов

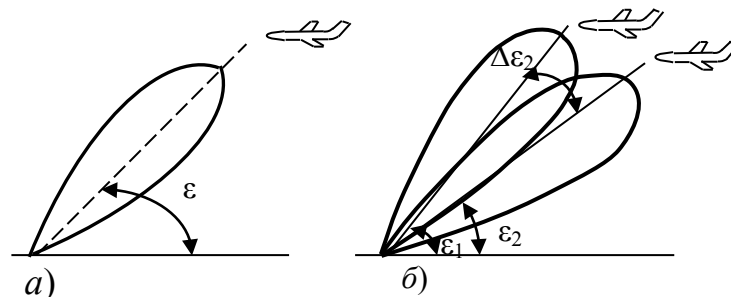


Рис. 1.5. Измерение угловой координаты цели (а), разрешение целей по угловым координатам (б)

В радиолокации используется также такое физическое свойство радиоволн, как изменение частоты принимаемых электромагнитных колебаний, обусловленное движением цели (эффект Доплера). Эффект Доплера проявляется в изменении частоты отраженного от движущейся цели сигнала f_c относительно частоты f_0 излучаемого сигнала РЛС на величину добавки F_d : $f_c = f_0 \pm F_d$. Измеряя величину F_d , можно определить радиальную скорость:

$$V_r = \frac{\lambda}{2} F_d.$$

Таким образом, рассмотренные закономерности распространения радиоволн позволяют определить координаты цели ($r_{ц}$, $\beta_{ц}$, $\varepsilon_{ц}$) и её радиальную скорость.

Даже при остронаправленном облучении цели от её поверхности отражается незначительная часть излучаемой энергии. Ещё в большей степени рассеяние энергии проявляется на пути от цели до приемной антенны в силу слабой направленности вторичного излучения. Приходящие сигналы, особенно на больших дальностях, оказываются слабыми, и нужно принять ряд мер, чтобы выделить их на фоне помех (собственных шумов приемника, шумов космического происхождения, помех от других радиоустройств и т. п.). К числу таких мер относятся: увеличение средней мощности зондирующих колебаний, габаритов антенн, применение высокочувствительных малошумящих элементов приемника. Наряду с этим должна предусматриваться такая обработка смеси сигналов и помех, при которой обеспечивается наилучшее использование взаимных различий сигнала и помех для решения задач радиолокации. Взаимные различия должны наилучшим образом использоваться и при разрешении сигналов от нескольких целей.

1.3. СПОСОБЫ ОБЗОРА ПРОСТРАНСТВА

Большинство современных радиолокаторов вырабатывает поток информации о целях в участке пространства, содержащем весьма большое число разрешаемых объемов. При этом могут использоваться *принципы последовательного, параллельного и параллельно-последовательного обзора пространства и составления потоков информации*. Эти принципы закладываются в основу построения отдельного радиолокатора и системы радиолокаторов.

Принцип последовательного обзора пространства радиолокатором с лучом игольчатого вида приведен на (рис. 1.6). Закон перемещения луча может быть различным, например, по спирали.

Принцип параллельного обзора и получения нескольких потоков информации показан на (рис. 1.7). Создается пучок игольчатых лучей, каждому из которых соответствует свой приемник.

Если по одной из угловых координат (углу места) поток информации получается параллельно, а по другой (азимуту) – последовательно, например, за счет вращения многоканальной антенной системы, имеет место параллельно-последовательное составление потока информации (рис. 1.7).

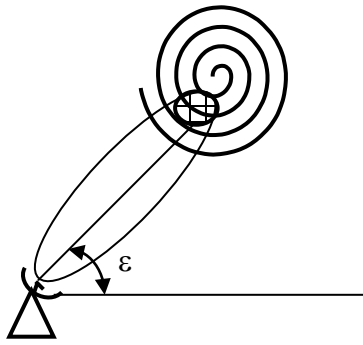


Рис. 1.6. Последовательный спиральный обзор с ДН игольчатого типа

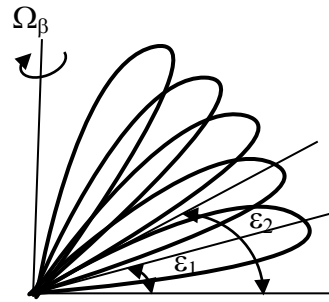


Рис. 1.7. Последовательно-параллельный обзор многоканальной антенной

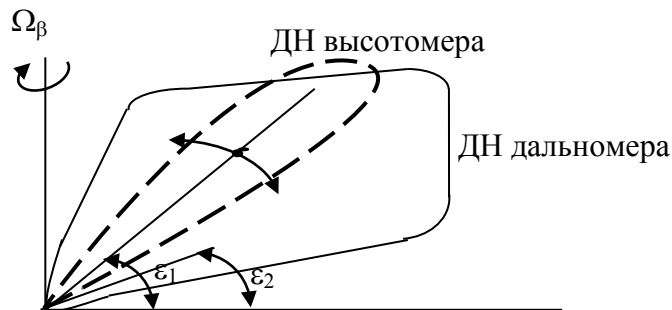


Рис. 1.8. Последовательный обзор по угловым координатам с помощью дальномера и высотомера

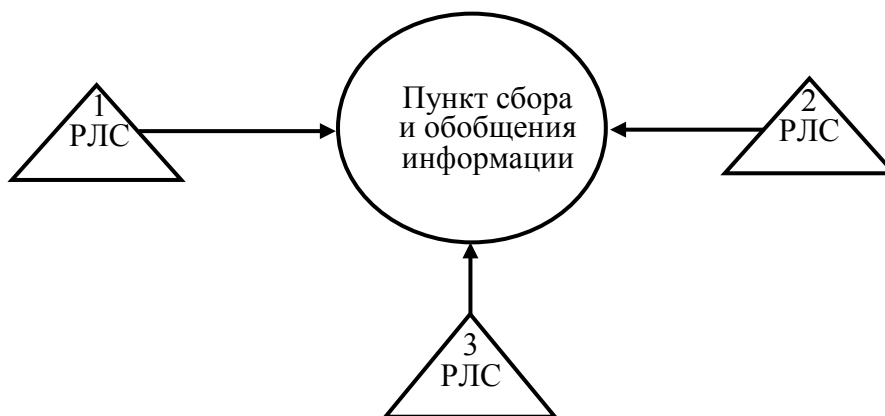


Рис. 1.9. Радиолокационная система

Последовательные, параллельные и параллельно-последовательные потоки информации могут быть образованы также с помощью двух и более отдельных радиолокаторов. Например, радиолокаторы (дальномеры) с ДН, изображенной на рис. 1.8 сплошной линией, образуют последовательный поток информации об азимуте целей. Специальные радиолокаторы (высотомеры) с узкой ДН в вертикальной плоскости (пунктир на рис.

1.8) производят последовательный обзор по углу места и определяют высоту целей на тех азимутах, где они обнаружены дальномером. Для повышения качества радиолокационной информации РЛС организуются в соответствующую радиолокационную систему (рис. 1.9).

1.4. ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Для характеристики обработки радиолокационной информации (РЛИ) вводят понятие трех этапов обработки.

Этап первичной обработки включает операции обнаружения и измерения (оценки) параметров сигналов. Первичная обработка проводится непосредственно на РЛС или на одной из позиций многопозиционной РЛС. Совокупность оценок параметров сигналов образует радиолокационную отметку от цели.

Вторичная обработка производится по совокупности радиолокационных отметок и обеспечивает формирование траекторной информации.

Третичная обработка состоит в объединении и отождествлении информации отдельных РЛС, входящих в радиолокационную систему, или информации отдельных радиолокационных систем.

В соответствии с выполняемыми функциями различают радиолокаторы обнаружения целей, точного измерения координат и параметров движения целей, распознавания и т. д. Если радиолокаторы обнаружения обычно являются многоцелевыми, то радиолокаторы точного измерения координат и параметров могут быть *одноцелевыми* или *рассчитанными на малое число целей*. Радиолокаторы, обеспечивающие выполнение ряда функций (обнаружения, распознавания, точного измерения координат и параметров движения целей), называют *многофункциональными радиолокаторами*.

По мере развития радиолокационной техники расширяется многообразие известных типов радиолокационных устройств. Современные радиолокаторы дальнего обнаружения космических объектов могут представлять собой гигантское сооружение с размерами антенн порядка десятков и сотен метров, со значениями средней мощности излучаемых колебаний порядка сотен и даже тысяч киловатт. Наряду с этим широко используются значительно меньшие по размеру подвижные наземные радиолокаторы обнаружения аэродинамических объектов, радиолокаторы наведения и т. д. Широкое применение находят бортовые радиолокационные устройства обнаружения и наведения, обзора и картографирования земной поверхности, определения путевой скорости и измерения угла сноса.

Таким образом, для решения задач радиолокации, основными из которых являются задачи обнаружения, измерения координат, разрешения

и распознавания, создаются как отдельные РЛС, так и их системы, реализующие методы активной и пассивной радиолокации. Этапы обработки РЛИ в них традиционно делят на этапы первичной, вторичной и третичной обработки.

1.5. ДИАПАЗОНЫ РАДИОВОЛН, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАДИОЛОКАЦИИ

Важным фактором при выборе диапазона длин волн является характер отражения радиоволн от целей. Если размеры цели и радиусы кривизны отдельных ее участков много меньше длины волны, то сильнее сказывается явление дифракции волн, интенсивность отражения мала. При этом цель можно уподобить антенне с очень малой действующей высотой.

Другой крайний случай, когда размеры цели и радиусы кривизны отдельных участков много больше длины волны, диапазон близок к оптическому, интенсивность отражения достигает заметной величины, мало зависит от длины волны и определяется в основном отражающими свойствами и размерами цели. В промежуточном случае соизмеримости размеров цели или ее отдельных участков с длиной волны возможно резонансное возбуждение участков поверхности цели, при котором интенсивность отражения заметно возрастает в некоторых направлениях.

Учитывая размеры реальных целей, приходим к выводу, что для того, чтобы длина волны была много меньше этих размеров или соизмерима с ними, в радиолокации необходимо использовать диапазон ультракоротких волн (УКВ). Другая причина использования этого диапазона, особенно волн более коротких, чем метровые, связана с размерами антенн. Дело в том, что угловая ширина ДНА независимо от ее типа прямо пропорциональна длине волны и обратно пропорциональна соответствующему размеру.

Для зеркальной антенны в виде усеченного параболоида ширина луча по точкам половинного значения мощности

$$\Theta_{0,5} = 65\lambda/d_A, \quad (1.1)$$

где λ – длина волны, а d_A – максимальный линейный размер зеркала в плоскости луча. Например, при $\lambda = 3$ см для получения ширины луча $\Theta_{0,5} = 3^\circ$ требуется $d_A = 65$ см, а чтобы луч имел такую ширину при длине волны $\lambda = 3$ м, размер зеркала d_A должен составлять 65 м.

Острый луч, обеспечивающий возможность разделения нескольких целей по угловой координате и также высокую точность определения координат при заданных размерах антенны, можно получить только при достаточно короткой волне λ .

С точки зрения повышения разрешающей способности и точности (т. е. информативности радиолокационного сигнала) необходимо расширять полосу частот зондирующего сигнала, что, например, достигается уменьшением длительности зондирующих импульсов либо применением специальных сложных сигналов. Естественно, что расширение полосы передаваемых частот требует повышения несущей частоты сигнала.

При выборе диапазона волн важное значение имеют особенности распространения радиоволн в атмосфере, в частности, резонансное поглощение (например, для кислорода на частоте 60 ГГц поглощение составляет около 14 дБ/км), что вынуждает избегать применения соответствующих частот.

В современной радиолокации широко используются метровые, дециметровые и сантиметровые радиоволны, а в лазерном локации – волны оптического диапазона. Технические особенности той или иной РЛС обусловлены диапазоном волн, методами получения зондирующего сигнала, методами обработки отраженного сигнала и особенностями работы оконечного устройства.

ГЛАВА 2 СИГНАЛЫ И ПОМЕХИ В РАДИОЛОКАЦИИ

2.1. ВИДЫ РАДИОСИГНАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В РЛС

2.1.1. ВИДЫ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ

Под радиолокационным зондирующим сигналом (ЗС) понимают радиоволну, излученную передающей антенной РЛС в пространство. В активной радиолокации с пассивным ответом ЗС обеспечивают появление отраженных от целей сигналов. В качестве ЗС в основном используются сверхвысокочастотные (СВЧ) колебания ($3 \cdot 10^8 \div 3 \cdot 10^{12}$ Гц). В общем случае ЗС может быть представлен в виде

$$x(t) = X(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t) + \varphi_0), \quad (2.1)$$

где $X(t)$, $\varphi(t)$ – законы амплитудной и фазовой модуляции;

f_0 – несущая частота;

φ_0 – начальная фаза.

В комплексной форме зондирующий сигнал записывается таким образом:

$$\dot{x}(t) = X(t)e^{j(2\pi f_0 t + \varphi(t) + \varphi_0)} = \dot{x}(t)e^{j2\pi f_0 t}, \quad (2.2)$$

где $\dot{x}(t) = x(t)e^{j(2\pi f_0 t + \varphi(t) + \varphi_0)}$ – комплексная амплитуда сигнала.

Физически существующий сигнал (2.1) является реальной частью комплексного сигнала (2.2), т. е.

$$x(t) = \operatorname{Re}\{\dot{x}(t)\}.$$

Геометрической интерпретацией ЗС в форме (2.2) является вектор (рис. 2.1) длиной $X(t)$, вращающийся против часовой стрелки с угловой скоростью

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega(t),$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$; $\Delta\omega(t)$ – закон частотной модуляции, определяемый выражением

$$\Delta\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}.$$

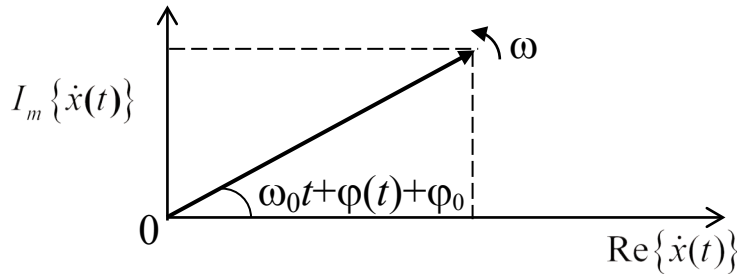


Рис. 2.1. Геометрическая интерпретация зондирующего сигнала

Проекции этого вектора на оси координат являются действительной и мнимой частями сигнала в форме (2.2), т. е.

$$\dot{x}(t) = \text{Re}\{\dot{x}(t)\} + jI_m\{\dot{x}(t)\}.$$

Данные составляющие ЗС называются также *квадратурными*.

Комплексная амплитуда $\dot{X}(t)$ может быть выражена вектором с соответствующими квадратурными составляющими:

$$\dot{X}(t) = \text{Re}\{\dot{X}(t)\} + jI_m\{\dot{X}(t)\}.$$

Все радиолокационные ЗС можно разделить на *импульсные и непрерывные*. Импульсные ЗС могут быть *одиночными* или в виде *последовательности (пачки)* радиоимпульсов.

Импульсные ЗС делятся на радиоимпульсы без внутриимпульсной модуляции и радиоимпульсы с внутриимпульсной модуляцией (частотной или фазовой). Первые из указанных ЗС относят к простым сигналам, а вторые – к сложным, или энергоемким широкополосным сигналам (ШПС).

Простые сигналы имеют произведение ширины спектра Δf_c на длительность τ_n , называемое базой, порядка 1, т. е. $n = \Delta f_c \cdot \tau_n \approx 1$, а сложные сигналы за счет внутриимпульсной модуляции и независимого выбора длительности сигнала могут иметь базу $n = \Delta f_c \cdot \tau_n \gg 1$. Ввиду важности широкополосных сигналов рассмотрим их отдельно, а здесь приведем модели простых ЗС, наибольшее распространение среди которых в радиолокации нашли простые радиоимпульсы и пачки радиоимпульсов.

Простые радиоимпульсы представляют СВЧ-колебания, промодулированные только по амплитуде. Наиболее широко используются прямо-

угольные и гауссовы радиоимпульсы. Математически они записываются таким образом:

$$x(t) = X(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где

$$X(t) = \begin{cases} X_0, & |t| \leq \tau_n/2 \\ 0, & |t| > \tau_n/2 \end{cases} \quad - \text{ для прямоугольного}$$

$$\text{и } X(t) = X_0 e^{-\pi \left(\frac{t}{\tau_n} \right)^2} \quad - \text{ для гауссовых радиоимпульсов.}$$

Графически законы модуляции и сами радиоимпульсы представлены на рис. 2.2.

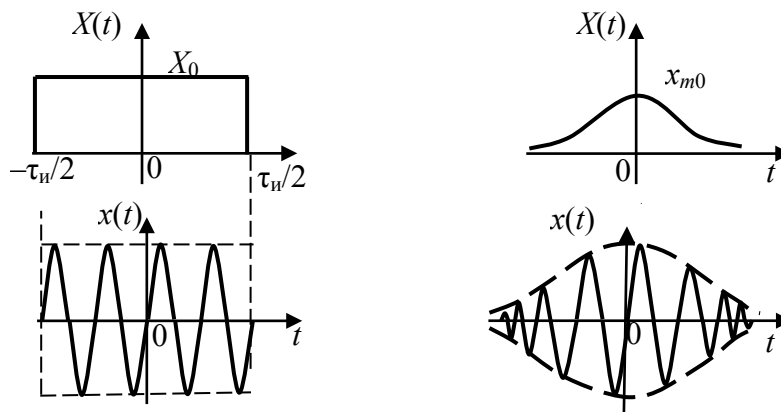


Рис. 2.2. Законы модуляции и вид прямоугольного и гауссова радиоимпульсов

В РЛС широкое применяются ЗС в виде *пачки радиоимпульсов*:

$$x(t) = \sum_{k=1}^M X_k \left[t - (k-1)T \right] \cos \left\{ 2\pi f_0 t + \varphi_k \left[\cdot \right] \varphi_{0k} \right\},$$

где $X[\cdot]$, $\varphi_k[\cdot]$ – функции, определяющие соответственно законы амплитудной и фазовой модуляции отдельного импульса последовательности;

T – период повторения импульсов;

M – число импульсов в последовательности;

φ_{0k} – начальная фаза k -го импульса.

Последовательность прямоугольных радиоимпульсов, имеющих период повторения T , имеет вид (рис. 2.3).

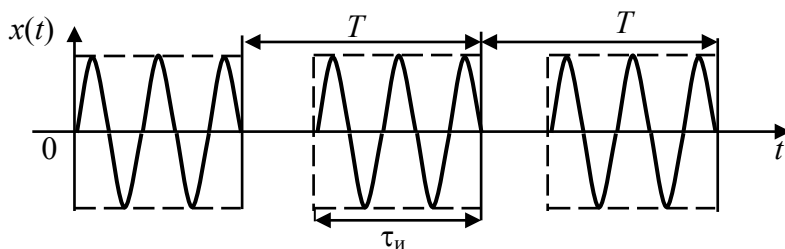


Рис. 2.3. Последовательность прямоугольных радиоимпульсов

Если начальная фаза радиоимпульсов φ_k в последовательности постоянная или изменяется по известному закону, то такая *последовательность когерентная*.

Непрерывные ЗС делятся на следующие виды:

1) *монохроматические*, т. е. сигналы без модуляции СВЧ-колебаний:

$$x(t) = X_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0);$$

2) *сигналы с частотной модуляцией* (манипуляцией);

3) *сигналы с ФКМ* (фазокодированные).

Данные сигналы можно рассматривать либо как соответствующие одиночные сигналы бесконечной длительности (рис. 2.2), либо как бесконечную периодическую последовательность примыкающих друг к другу таких сигналов (рис. 2.3).

Таким образом, для решения задач радиолокации применяются различные виды ЗС: импульсные, непрерывные, с внутриимпульсной модуляцией и без таковой, одиночные и пачечные.

Конкретный вид используемого сигнала определяется требованиями к качеству решения задач радиолокации и соответственно требованиями к характеристикам РЛС.

2.1.2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ

Характеристики служат для описания и сравнения сигналов. Различают энергетические, временные, частотные и времячастотные характеристики. Рассмотрим подробнее основные из них.

Важнейшими параметрами зондирующего импульсного сигнала являются $P_{и}$ – импульсная мощность, $\tau_{и}$ – длительность импульса и f_0 – несущая частота колебаний, закон модуляции.

Импульсная мощность определяется по формуле

$$P_{\text{и}} = \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^{\tau_{\text{и}}} P(t) dt,$$

т. е. это мощность, усредненная за длительность импульса. Здесь $P(t)$ – мгновенная активная мощность излучаемых колебаний, усредненная лишь за период высокой частоты f_0 .

Произведение $\mathcal{E}_{\text{и}} = P_{\text{и}} \cdot \tau_{\text{и}}$ характеризует энергию импульса. Чем больше эта величина, тем больше дальность действия РЛС. Создание зондирующего сигнала с большой энергией возможно двумя путями: увеличением импульсной мощности передатчика $P_{\text{и}}$ и увеличением длительности зондирующего сигнала $\tau_{\text{и}}$. В первом случае сталкиваются с ограничениями генераторных и усилительных приборов по их допустимой мощности, а во втором случае увеличение $\tau_{\text{и}}$ приводит к ухудшению разрешения целей по дальности. В настоящее время эти ограничения снимаются за счет применения сигналов с внутриимпульсной модуляцией (ЛЧМ-, ФКМ-сигналов).

Последовательности радиоимпульсов и непрерывные сигналы характеризуют *средней мощностью*:

для последовательности радиоимпульсов

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{и}} \cdot \tau_{\text{и}}}{T} = \frac{P_{\text{и}}}{Q},$$

где $Q = T / \tau_{\text{и}}$ – скважность;

для непрерывного во времени сигнала

$$P_{\text{ср}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt.$$

Несущая частота f_0 может быть различной в зависимости от рабочего диапазона волн РЛС. Вся радиолокационная техника основана на использовании радиоволн УКВ-диапазона (ультракоротковолнового), имеющих длину меньше 10 м.

Важной частотной характеристикой сигналов является их *спектр*. Зондирующий сигнал и его спектр связаны между собой парой преобразований Фурье: прямым, в соответствии с которым осуществляется переход от временного представления к частотному:

$$\dot{q}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{x}(t) e^{-j2\pi ft} dt, \quad (2.3)$$

и обратным, позволяющим перейти от частотного представления сигнала к временному:

$$\dot{x}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{q}(f) e^{-j2\pi ft} df. \quad (2.4)$$

Аналогичная связь существует между законом модуляции и его спектром:

$$\begin{aligned} \dot{G}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}(t) t^{-j\pi 2ft} dt, \\ \dot{X}(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft} df. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Спектр сигнала $\dot{q}(f)$ представляют в виде амплитудно-частотного спектра (АЧС) и фазочастотного спектра (ФЧС):

$$\dot{q}(f) = |\dot{q}(f)| e^{j \arg \dot{q}(f)},$$

где $|\dot{q}(f)|$ – АЧС сигнала; $\arg \dot{q}(f)$ – ФЧС сигнала.

АЧС типовых простых сигналов показана на рис. 2.4.

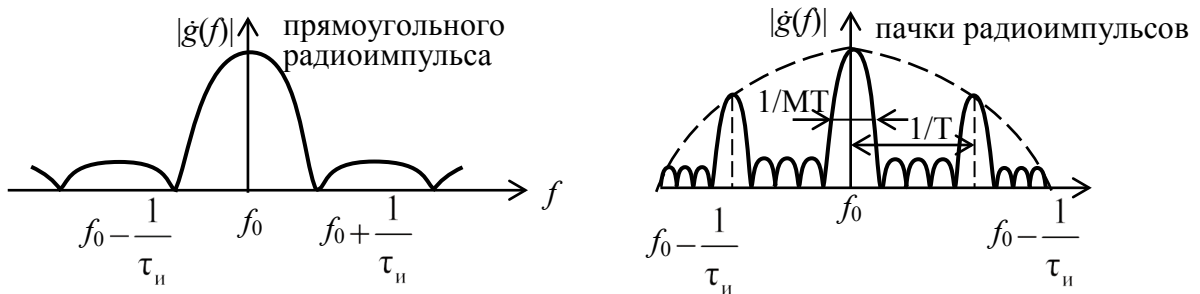


Рис. 2.4. АЧС типовых простых сигналов

Область частот, в пределах которой сосредоточена основная часть всей энергии сигнала, называется *шириной спектра* Δf_c . Обычно ширина спектра определяется полосой частот, где сосредоточено $\sim 90\%$ энергии

сигнала. Например, ширина спектра прямоугольного радиоимпульса и пачки прямоугольных радиоимпульсов равна $\Delta f_c = 1/\tau_n$.

Автокорреляционная функция (АКФ).

АКФ характеризует взаимосвязь между двумя значениями ЗС, разнесенными по времени на интервал τ . Она определяется выражением

$$r_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{x}(t)\dot{x}^*(t-\tau)dt. \quad (2.6)$$

АКФ закона модуляции ЗС

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}(t)\dot{X}^*(t-\tau)dt. \quad (2.7)$$

АКФ сигнала имеет важное значение для определения возможности и качества разрешения (разделения) отраженных сигналов от целей, например, находящихся на близком расстоянии друг от друга по дальности, т. е. для разрешения сигналов по времени.

Экспериментально АКФ можно снять с помощью устройства, схема которого приведена на рис. 2.5, где ЛЗ – линия задержки; ГПН – генератор пилообразного напряжения.

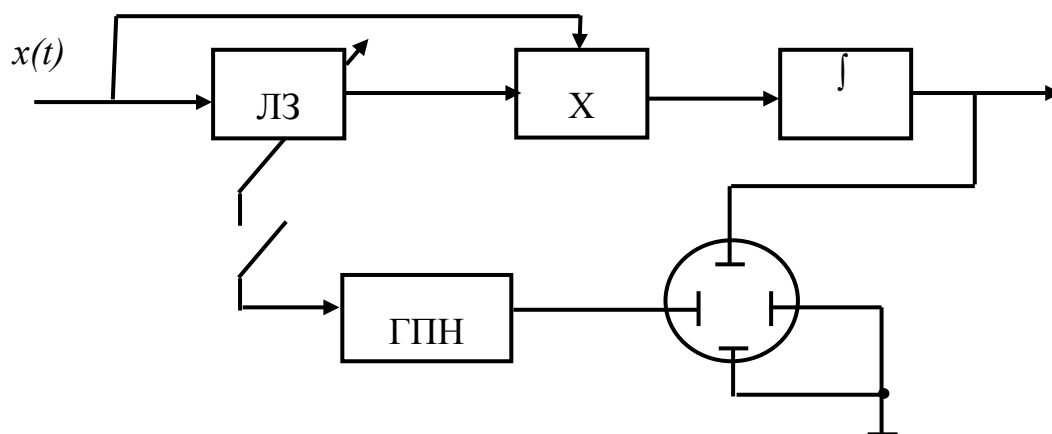


Рис. 2.5. Устройство для экспериментального получения АКФ

Схема позволяет получать как значения АКФ сигнала для фиксированных значений τ , так и снимать зависимость $r_x(\tau)$.

В качестве примера определим АКФ прямоугольного радиоимпульса при $\varphi_0 = 0$:

$$\begin{aligned}
r_x(\tau) &= \int_{|\tau|}^{\tau_n} X_0^2 \cdot \cos 2\pi f_0 t \cdot \cos 2\pi f_0 (t - \tau) dt = \\
&= \frac{X_0^2}{2} \cdot \int_{|\tau|}^{\tau_n} \cos 2\pi f_0 \tau dt + \frac{X_0^2}{2} \int_{|\tau|}^{\tau_n} \cos(4\pi f_0 - 2\pi f_0 \tau) dt \approx \\
&\approx \frac{\tau_n X_0^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_n}\right) \cdot \cos 2\pi f_0 \tau.
\end{aligned}$$

АКФ закона модуляции

$$R_x(\tau) = \frac{\tau_n X_0^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{|\tau|}{\tau_n}\right). \quad (2.8)$$

Изобразим полученные АКФ – их вид показан на рис. 2.6.

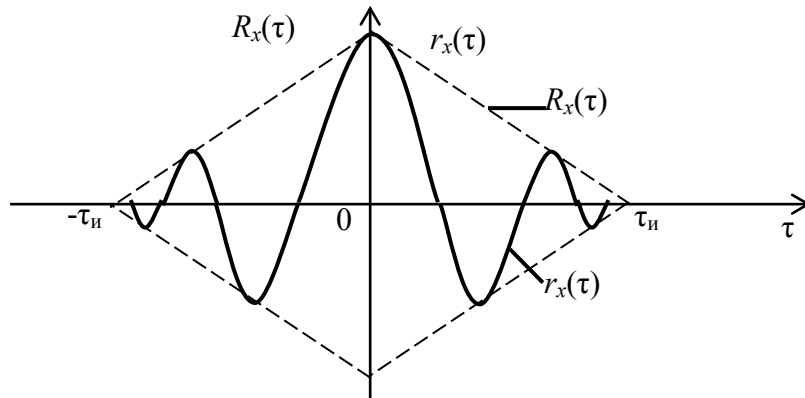


Рис. 2.6. АКФ прямоугольного радиоимпульса

По мере увеличения τ происходит уменьшение значений, принимаемых АКФ. Значение $\tau = \tau_k$, при котором выполняются условия

$$\begin{aligned}
|r_x(\tau)| &\leq E, \\
|R_x(\tau)| &\leq E,
\end{aligned}$$

где E – достаточно малое число, называется *временем корреляции* (рис. 2.7).

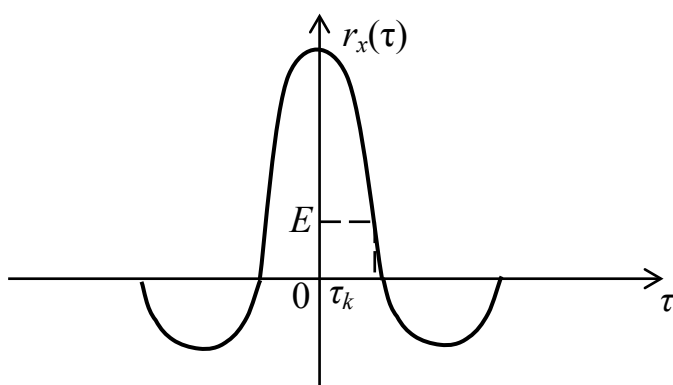


Рис. 2.7. Определение времени корреляции τ_k

Обычно E берут равным 0,1 от максимального значения АКФ.

Энергетический спектр.

Энергетический спектр зондирующего сигнала можно определить как распределение вдоль оси частот его энергии.

Энергетический спектр ограниченного во времени зондирующего сигнала выражается через его спектр:

$$S(f) = |\dot{q}(f)|^2.$$

Аналогичное соотношение может быть получено и для энергетического спектра закона модуляции:

$$S_m(f) = |\dot{G}(f)|^2.$$

Энергетический спектр и корреляционная функция связаны друг с другом прямым и обратным преобразованиями Фурье, имеющими следующий вид:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} r_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau,$$

$$r_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{j2\pi f\tau} df.$$

Таковыми же соотношениями связаны энергетический спектр и АКФ закона модуляции:

$$S_M(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau,$$

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_0(f) e^{j2\pi f\tau} df.$$

Из взаимосвязи энергетического спектра с АКФ сигнала следует важный вывод: чем шире энергетический спектр, тем уже пик АКФ, т. е. тем меньше время корреляции зондирующего сигнала.

Таким образом, к основным характеристикам зондирующих сигналов относятся: закон модуляции, длительность, мощность и энергия, АКФ, время корреляции, энергетический спектр, ширина спектра, которые и определяют тактико-технические характеристики (ТТХ) РЛС.

Эти характеристики различны для конкретных видов ЗС и во многом будут определять структуру устройств обработки радиолокационных сигналов.

2.1.3. СЛОЖНЫЕ СИГНАЛЫ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Особенностью сложных сигналов является возможность их «сжатия» по времени в специальных устройствах – фильтрах, согласованных с этими сигналами. В результате этого можно достичь и большой энергии излучения, свойственной длинному зондирующему импульсу, и высокого разрешения целей по дальности, свойственного короткому сжатому сигналу. Значительный вклад в разработку теории сложных сигналов внес советский ученый Я.Д. Ширман.

В настоящее время в радиолокации широко используются два вида сложных сигналов: линейно-частотно-модулированные (ЛЧМ-сигналы) и фазокодоманипулированные (ФКМ-сигналы).

Радиоимпульсы с внутриимпульсной частотной модуляцией (манипуляцией).

В таких сигналах частота в пределах длительности импульса (рис. 2.8) изменяется по определенному закону: линейному (ЛЧМ), параболическому и т. д. Для ЛЧМ-радиоимпульсов закон частотной модуляции описывается выражением

$$f(t) = f_0 + \frac{\Delta f}{\tau_{\text{и}}} \cdot t; \quad \begin{matrix} t \geq 0, \\ t \leq \tau_{\text{и}}, \end{matrix} \quad (2.9)$$

где Δf – девиация частоты.