

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Сибирский федеральный университет

# **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИИ И СПЕЦИАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА**

Под общей редакцией доктора технических наук  
И. Н. Ищука

Рекомендуется федеральным государственным казенным военным образовательным учреждением высшего профессионального образования ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации» в качестве учебника для курсантов учебного военного центра Военно-инженерного института Сибирского федерального университета, обучающихся по специальности 11.05.01 – «Радиоэлектронные системы и комплексы», 11.05.01 – «Применение и эксплуатация средств и систем специального мониторинга», рег. № 446 от 02.09.2015.

Красноярск  
СФУ  
2016

УДК 621.396.967(07)

ББК 32.95я73

Т338

**Авторы:**

А. Н. Фомин, В. Н. Тяпкин, Д. Д. Дмитриев, С. Н. Андреев,  
И. Н. Ищук, И. Ф. Купряшкин, А. К. Гречкосеев

Т338

**Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга** : учебник / А. Н. Фомин, В. Н. Тяпкин, Д. Д. Дмитриев [и др.] ; под общ. ред. И. Н. Ищука. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. – 292 с.

ISBN 978-5-7638-3389-8

Учебник состоит из двух разделов.

В первом разделе рассмотрены общие понятия, принципы и физические основы радиолокации, сигналы и помехи в радиолокации, характеристики радиолокационных целей; изложена статистическая теория обнаружения радиолокационных сигналов; представлены методы реализации радиолокационных устройств и систем, основы статистической теории разрешения радиолокационных сигналов, оценивания параметров радиолокационных сигналов.

Во втором разделе изложены принципы синтеза апертуры антенны и основные свойства синтезированной апертуры; рассмотрены принципы построения радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны и их основные модели. Особое внимание уделено характеристикам обнаружения и разрешения РСА землеобзора и алгоритмам согласованной обработки траекторного сигнала. Приведены перспективные методы обнаружения подвижных объектов методом обратного синтеза апертуры и его потенциальные возможности.

Предназначен для курсантов учебного военного центра Военно-инженерного института Сибирского федерального университета, обучающихся по специальности 11.05.01 – «Радиоэлектронные системы и комплексы», 11.05.01 – «Применение и эксплуатация средств и систем специального мониторинга».

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

УДК 621.396.967(07)  
ББК 32.95я73

ISBN 978-5-7638-3389-8

© Сибирский федеральный университет, 2016

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Список применяемых сокращений .....	7
Введение .....	9
<b>Раздел 1. Теоретические основы и принципы работы радиолокационных устройств .....</b>	<b>11</b>
<b>Глава 1. Физические основы методов обнаружения и измерения координат целей .....</b>	<b>12</b>
1.1. Структура радиолокационного канала.....	12
1.1.1. Структура систем радиолокационного наблюдения .....	12
1.1.2. Элементы радиолокационного канала .....	13
1.2. Методы обнаружения и измерения координат цели .....	15
1.2.1. Основные задачи радиолокационного наблюдения .....	15
1.2.2. Методы обнаружения и измерения .....	16
<b>Глава 2. Характеристики радиолокационных целей .....</b>	<b>22</b>
2.1. Общие закономерности рассеяния электромагнитных волн наземными объектами.....	22
2.1.1. Дифракция электромагнитных волн .....	22
2.1.2. Распределение отраженного поля по поверхности объектов....	25
2.2. Функция отражения от гладких неоднородностей .....	28
2.2.1. Случайная функция отражения шероховатых неоднородностей .....	28
2.2.2. Функция отражения гладких неоднородностей.....	31
2.3. Характеристики отражения целей в различных диапазонах волн.....	34
2.3.1. Статистические характеристики функции отражения .....	34
2.3.2. Распределение плотности вероятности ЭПР .....	38
<b>Глава 3. Обработка радиолокационных наблюдений и обнаружение целей .....</b>	<b>42</b>
3.1. Пространственно-временная модель радиолокационного наблюдения. Модель пространственно-временного сигнала .....	42
3.1.1. Случайный характер и помехи в отраженном сигнале .....	44
3.1.2. Оценка апостериорной плотности вероятности сигнала .....	46
3.2. Алгоритмы оптимальной обработки радиолокационных наблюдений.....	49
3.2.1. Оптимальная оценка параметра сигнала по максимуму апостериорной плотности вероятности .....	49
3.2.2. Оценка параметра сигнала по функции правдоподобия.....	52
3.3. Обнаружение радиолокационных целей.....	56
3.3.1. Оптимальный обнаружитель сигнала цели .....	56
3.3.2. Характеристики обнаружения сигнала .....	59

<b>Глава 4.</b> Дальность радиолокационного обнаружения целей .....	63
4.1. Максимальная дальность обнаружения .....	63
4.1.1. Зависимость энергии принимаемого сигнала от параметров РЛС, цели и условий наблюдения.....	63
4.1.2. Способы повышения мощности принимаемого сигнала .....	66
4.2. Методика расчета максимальной дальности обнаружения наземной цели.....	68
4.2.1. Определение требуемого отношения «сигнал/помеха».....	68
4.2.2. Определение дальности обнаружения .....	69
<b>Глава 5.</b> Разрешение радиолокационных целей .....	73
5.1. Теория разрешения сигналов в радиолокации .....	73
5.1.1. Разрешающая способность РЛС землеобзора.....	73
5.1.2. Различные критерии разрешения .....	74
5.2. Функция неопределенности сигнала.....	77
5.2.1. Свойства функции неопределенности .....	77
5.2.2. Влияние помех на функцию неопределенности .....	79
5.3. Разрешение целей по дальности, скорости и угловым координатам ...	81
5.3.1. Разрешающая способность сигнала по задержке .....	81
5.3.2. Разрешающая способность когерентного сигнала по частоте.....	83
5.3.3. Разрешающая способность пространственного когерентного сигнала по углу.....	84
<b>Глава 6.</b> Измерение координат и параметров движения целей.....	85
6.1. Измерение координат целей.....	85
6.1.1. Определение местоположения цели относительно РЛС .....	85
6.1.2. Оптимальная оценка параметров сигнала .....	85
6.1.3. Потенциальная точность измерения параметров сигнала .....	87
6.2. Измерение параметров движения целей .....	89
6.2.1. Параметры движения цели.....	89
6.2.2. Следящая система .....	91
<b>Раздел 2. Принципы построения систем радиовидения.....</b>	<b>97</b>
<b>Глава 7.</b> Методы радиовидения.....	98
7.1. Принцип синтеза апертуры антенны. Основные свойства синтезированной апертуры .....	98
7.2. Алгоритм обработки траекторного сигнала .....	101
<b>Глава 8.</b> Пространственная селекция целей.....	103
8.1. Общие закономерности пространственной селекции .....	103
8.1.1. Координатная пространственная селекция .....	103
8.1.2. Геометрические характеристики СА .....	109
8.2. Пространственная селекция прямолинейной синтезированной апертуры.....	110
8.2.1. Разрешающая способность прямолинейно движущейся РЛС.....	110
8.2.2. Предельные характеристики движущейся РЛС.....	112

<b>Глава 9.</b> Модель радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны.....	122
9.1. Структура модели радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны землеобзора. Траекторный сигнал .....	122
9.1.1. Траекторный сигнал в модели РСА .....	125
9.1.2. Амплитуда и фаза переходной характеристики .....	130
9.2. Классификатор целей. Детальность радиолокационного изображения при несогласованной обработке траекторного сигнала .....	132
9.2.1. Статистические характеристики траекторного сигнала .....	132
9.2.2. Точечная цель .....	134
<b>Глава 10.</b> Принципы построения радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны землеобзора.....	138
10.1. Структурная схема радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны землеобзора. Приемо-передающий тракт.....	138
10.1.1. Основные элементы РСА землеобзора .....	138
10.1.2. Обеспечение когерентности тракта РСА .....	141
10.2. Антенная система .....	150
10.2.1. Поляризационные, энергетические характеристики РСА .....	150
10.2.2. Положение и форма ДН антенны .....	154
10.3. Характеристики разрешения радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны землеобзора.....	158
10.3.1. Пространственное разрешение .....	158
10.3.2. Радиометрическое разрешение и динамический диапазон....	160
10.4. Характеристики обнаружения радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны землеобзора.....	162
10.4.1. Дальность обнаружения .....	162
10.4.2. Характеристики зоны обзора .....	172
10.4.3. Точность измерения координат целей .....	174
<b>Глава 11.</b> Обработка траекторного сигнала в радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны.....	179
11.1. Алгоритм согласованной обработки траекторного сигнала .....	179
11.1.1. Сигнальный процессор .....	179
11.1.2. Сглаживания спекл-шумов РЛИ.....	189
11.2. Требования к системе обработки. Оптическая система обработки .....	201
11.2.1. Формирование светового сигнала .....	201
11.2.2. Фокусировка траекторного сигнала .....	205
11.3. Цифровая система обработки. Влияние искажений траекторного сигнала на характеристики радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны .....	214
11.3.1. Структура цифровой системы обработки.....	214
11.3.2. Алгоритм гармонического анализа .....	215
11.4. Компенсация траекторных нестабильностей с помощью инерциальной навигационной системы. Автофокусировка изображения в радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны.....	228

11.4.1. Влияние изменения фазы на изображение .....	228
11.4.2. Устранение влияния случайных изменений фазы .....	235
<b>Глава 12.</b> Селекция движущихся целей в радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны землеобзора .....	238
12.1. Алгоритмы селекции движущихся целей .....	238
12.2. Определение СДЦ по радиальной скорости объекта .....	245
<b>Глава 13.</b> Методы обратного (инверсного) синтезирования апертуры .....	251
13.1. Разрешающая способность радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны при обратном синтезировании .....	251
13.1.1. Методы обратного синтезирования апертуры .....	251
13.1.2. Характерные особенности методов обратного синтезирования апертуры .....	253
13.2. Наблюдение морских целей .....	256
13.2.1. Виды колебаний морских объектов при волнении моря .....	256
13.2.2. Характеристики колебаний кораблей различного типа .....	257
<b>Глава 14.</b> Обзор морской поверхности .....	262
14.1. Наблюдение морской поверхности .....	262
14.2. Требования к разрешающей способности и точности измерения скорости .....	264
<b>Глава 15.</b> Перспективы развития радиолокационных систем .....	270
15.1. Интерферометрический режим измерения высоты объектов .....	270
15.1.1. Доплеровская частота сигнала разрешаемого элемента цели .....	270
15.1.2. Фаза отраженного сигнала радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны при вращении цели ....	272
15.2. Многопозиционный режим радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны .....	274
15.2.1. Многопозиционные радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны .....	274
15.2.2. Полуактивные РСА .....	276
15.3. Поляризационный режим радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны .....	283
15.3.1. Основные направления развития РСА. Поляризационные характеристики объекта .....	283
15.3.2. Поляризационная матрица рассеивания в круговом базисе ..	285
<b>Заключение .....</b>	<b>288</b>
<b>Библиографический список .....</b>	<b>290</b>

## СПИСОК ПРИМЕНЯЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

GPS	– спутниковая навигационная система (Global Position System)
АП	– антенный переключатель
АПВ	– апостериорные плотности вероятности
АЦП	– аналогово-цифровой преобразователь
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика
БД	– база данных
БЗУ	– буферное запоминающее устройство
БО	– боковой обзор
БПФ	– быстрое преобразование Фурье
БС	– быстрая свертка
БЦВМ	– бортовая цифровая вычислительная машина
БЦО	– блок цифровой обработки
ВГ	– вертикально-горизонтальная поляризация
ВПП	– взлетно-посадочная полоса
ГА	– гармонический анализ
ГВ	– горизонтально-вертикальная поляризация
ДД	– динамический диапазон
ДИСС	– доплеровский измеритель скорости и угла сноса
ДН	– диаграмма направленности
ДНА	– диаграмма направленности антенны
ДОЛ	– доплеровское обужение луча
ДПФ	– дискретное преобразование Фурье
ЗГ	– задающий генератор
ЗРК	– зенитно-ракетный комплекс
ЗУ	– запоминающее устройство
ИНС	– инерциальная навигационная система
КА	– космический аппарат
КНД	– коэффициент направленного действия
ЛА	– летательный аппарат
ЛБВ	– лампа бегущей волны
ЛЦ	– ложные цели
ЛЧМ	– линейная частотная модуляция
МИЧ	– мгновенное измерение частоты
НЗСК	– нормальная земная система координат
НРТР	– непосредственная радиотехническая разведка
НС	– навигационная система
ОБПФ	– обратное быстрое преобразование Фурье
ПБО	– переднебоковой обзор
ПЗУ	– постоянное запоминающее устройство
ПМР	– поляризационная матрица рассеяния
ПО	– программное обеспечение

ППЗ	– полное поляризационное зондирование
ППП	– полный поляризационный прием
ПРД	– передатчик
ПРМ	– приемник
ПС	– прямая свертка
ПФ	– предварительный фильтр
РЛИ	– радиолокационное изображение
РЛС	– радиолокационная станция
РСА	– радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны
РСН	– равносигнальное направление
РТР	– радиотехническая разведка
РЭБ	– радиоэлектронная борьба
РЭП	– радиоэлектронное подавление
РЭС	– радиоэлектронное средство
СА	– синтезированная апертура
САП	– станция активных помех
СДЦ	– селекция движущихся целей
СДЧ	– средняя доплеровская частота
СКО	– среднеквадратичное отклонение
СМН	– система микронавигации
См	– смеситель
СО	– система обработки
СФ	– согласованный фильтр
ТВД	– театр военных действий
ТН	– траекторные нестабильности
ТО	– телескопический обзор
ТТХ	– тактико-технические характеристики
УМ	– усилитель мощности
УПЧ	– усилитель промежуточной частоты
ФАР	– фазированная антенная решетка
ФД	– фазовый детектор
ФН	– функция неопределенности
ФС	– формирователь сигналов
ФЦА	– фазовый центр антенны
ЦП	– цифровой процессор
ЦСО	– цифровая система обработки
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина
ЭЛТ	– электронно-лучевая трубка
ЭМВ	– электромагнитная волна
ЭПР	– эффективная площадь рассеяния

## ВВЕДЕНИЕ

Предметом дисциплины «Теоретические основы построения радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли» являются современные методы радиолокационных измерений, принципы построения и особенности функционирования радиолокационных систем воздушной разведки.

Главная задача дисциплины – изучение фундаментальных закономерностей построения радиолокационных систем воздушной разведки.

В последнее время обладание адекватной информацией становится решающим фактором успеха практически в любой области человеческой деятельности, а тем более в военной. Сложность и объемность выполняемых Вооруженными силами задач, их комплексный характер привели к необходимости сбора информации (разведки) в глобальном масштабе. Процесс непрерывного сбора информации, независимо от времени суток, погодных и других условий, в масштабе всего земного и околоземного пространства получил название «глобальный мониторинг».

*Разведка (мониторинг)* – одно из главных направлений развития Вооруженных сил в XXI в. Под разведкой понимается сбор детальной информации обо всех воинских подразделениях и объектах в реальном масштабе времени. При этом благодаря созданию новых информационных технологий возможно получение оперативной, детальной и полной информации об определенном участке местности и объектах с генерированием трехмерного изображения с любым нужным разрешением. Интегрированный компьютерный центр обеспечивает сбор данных от всех источников для получения детальной информации о заданном районе разведки.

Среди технических средств разведки выделяются системы радиовидения, под которыми обычно понимают активные радиолокационные станции (РЛС) воздушного, наземного и космического базирования со сверхвысокой разрешающей способностью, позволяющие получать изображения наблюдаемых объектов, сравнимые по детальности с фотоизображениями.

*Радиовидение* – наблюдение объектов в радиодиапазоне волн с детальностью оптических систем. В отличие от оптических систем, системы радиовидения дают возможность получать изображение объектов независимо от метеоусловий и естественной освещенности, на значительном удалении и одновременно в широкой зоне обзора, а также объектов, невидимых в оптическом диапазоне волн.

Как средство обнаружения и определения координат самолетов РЛС впервые появились в системах противовоздушной обороны перед Второй мировой войной. С тех пор радиолокация развивается гигантскими темпа-

ми и в настоящее время используется практически во всех комплексах вооружения и при решении многих хозяйственных задач. Главный качественный скачок в радиолокации произошел, когда от обнаружения и измерения координат перешли к распознаванию объектов.

Для этого теперь в РЛС ведется оценка и детальный анализ многих параметров электромагнитной волны (ЭМВ), отраженной от объекта. Зная (изучая заранее) взаимосвязь параметров ЭМВ с характеристиками объектов, решаются все задачи радиолокационного наблюдения: обнаружения, измерения координат, распознавания объектов и определения их функционального состояния (характер движения в целом и отдельных частей, работа двигателя, стрельба, пуск ракет и др.). На рис. 1 представлена *структура систем радиолокационного наблюдения*.



Рис. 1. Структура радиолокационного наблюдения

В современной трактовке *радиолокация* – это обнаружение заданных объектов, определение их координат и других характеристик путем обнаружения и измерения параметров радиоволн, приходящих от объектов.

Радиолокация как наука основана на использовании ряда физических законов, связанных с распространением и рассеянием электромагнитных волн.

## **Раздел 1**

# **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ**

# Глава 1

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ

### 1.1. Структура радиолокационного канала

#### 1.1.1. Структура систем радиолокационного наблюдения

ЭМВ, используемые в процессе радиолокационного наблюдения, характеризуются следующими параметрами:

- напряженность поля ЭМВ (в/м);
- вектор Пойнтинга  $|\bar{E}|^2 = \bar{P}$  (Вт/м<sup>2</sup>);
- скорость распространения  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с;
- несущая частота колебаний  $f_0$  (Гц);
- начальная фаза колебаний  $\varphi_0$ ;
- длина волны  $\lambda_0 = c/f_0$  (м);
- поляризация;
- параметры модуляции напряженности и фазы волны.

Радиодиапазон ЭМВ, используемых в радиолокации, обычно исчисляется от десятков метров до миллиметров. Еще более короткие волны применяются в оптических (лазерных) локаторах, при этом основные принципы локации в радио- и оптическом диапазонах одинаковые. В табл. 1 показаны диапазоны волн авиационных РЛС и несущие частоты, соответствующие центру диапазона.

Таблица 1

Диапазоны волн авиационных РЛС

Обозначения США	<i>K</i>	<i>X</i>	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>L</i>	<i>P</i>	<i>VHF</i>
$\Delta f_0$ , ГГц	12–40	8–12	4–8	2–4	1–2	300–900	30–30
$f_0$ , ГГц	38	10	6	3,4	1,3	430	120
$\lambda_0$	8 мм	3 см	5 см	9 см	23 см	70 см	2,5 м

Так, например, с учетом того, что  $\lambda_0 = c/f_0$ , диапазон *X* имеет длину волны от 3,75 до 2,5 см. Наиболее часто в авиационных РЛС используется длина волны  $\lambda_0 = 3,2$  см.

Часто к радиолокации относят также два других направления науки и техники, связанных с излучением и приемом радиоволн, приходящих от объектов.

Первое направление – *радиометрия*, или *теплорадиолокация*, – использует для изучения объектов их собственное излучение как нагретого тела в радиодиапазоне частот, которое принимается и анализируется широкополосным приемником. Иногда этот метод называют *пассивной радиолокацией*.

Второе направление – *радиолокация с активным ответом*. Характерным примером этого направления является система государственного опознавания, в которой объект оснащен активным ответчиком, излучающим электромагнитную волну в ответ на запросную (облучающую) волну радиолокатора.

В ходе изучения данной дисциплины эти два направления рассматриваться не будут.

Радиолокационный канал включает собственно РЛС, носитель РЛС, среду распространения радиоволн, группу объектов, систему навигации и систему индикации и управления каналом (рис. 1.1). Все эти элементы участвуют в процессе обнаружения и определения характеристик заданных объектов.

### **1.1.2. Элементы радиолокационного канала**

Рассмотрим характеристики элементов радиолокационного канала (рис. 1.1).

**1. Группа объектов** состоит из заданных объектов (целей), вспомогательных объектов (ориентиров), сопутствующих объектов (фона), объектов, излучающих или переизлучающих помеховые сигналы (источников помех).

**Цели** – заданные объекты, т. е. объекты нашего интереса, могут иметь различную физическую природу: воздушные цели (самолеты, ракеты, облака, дождь, турбулентность атмосферы и т. п.), наземные цели (скопление войск и отдельные виды техники, взлетные полосы аэродромов и сельскохозяйственные угодья, инженерные сооружения и дороги и т. п.), морские цели (корабли, ледовые поля, морская поверхность).

**Ориентиры** – вспомогательные объекты, помогающие решать основную задачу обнаружения и определения характеристик целей. Так, например, ориентир – объект с известными координатами – используется для высокоточного определения координат целей, расположенных вблизи этого объекта.

**Фон** – сопутствующие объекты, которые обычно препятствуют обнаружению целей. Так, если малоразмерная цель наблюдается на фоне подстилающей (земной) поверхности, то фон маскирует цель. Сигнал от фона намного превышает сигнал от цели, что требует особой системы обработки сигналов для подавления сигнала фона и выделения сигнала цели.



Рис. 1.1. Структура радиолокационного канала

*Активные и пассивные источники помех* являются объектами, которые излучают или переизлучают сигналы, мешающие обнаружению сигналов цели. Помехи обычно используются в процессе радиоэлектронной борьбы, однако они могут быть и непреднамеренными (естественными), например, в виде излучения других радиопередающих устройств. Пассивные помехи создаются специальными отражателями (облака диполей, аэрозолей и других образований), отражения от которых маскируют сигналы целей.

**2. Среда распространения радиоволн** – пространство между РЛС и объектом. Обычно считается, что электромагнитная волна от объекта до РЛС распространяется прямолинейно и с постоянной скоростью. Наличие неоднородности среды (коэффициента преломления) вносит ошибки в процесс измерения характеристик цели, а потери энергии вследствие поглощения в среде приводят к уменьшению дальности обнаружения целей. Поэтому при решении радиолокационных задач требуется учитывать характеристики среды распространения.

В зависимости от решаемой радиолокатором задачи различные объекты и даже среда распространения могут изменять свое назначение. Так, турбулентность атмосферы, являясь обычно характеристикой среды распространения, в другой задаче может быть объектом нашего интереса, т. е. целью, например, в метеорологической РЛС. Земная поверхность в случае обнаружения малоразмерной цели, например танка, является фоном, при картографировании – целью. Также часто, особенно в многофункциональной РЛС, меняют свое назначение ориентиры и цели.

**3. Радиолокационная система** содержит собственно аппаратуру РЛС («железо») и программное обеспечение (ПО). Интеллект РЛС материализован в виде алгоритмов и программ процессоров и вычислительных машин, т. е. в программном обеспечении. Конечно, этот интеллект может быть реализован только при наличии соответствующей аппаратурной части РЛС, которая, в свою очередь, также требует больших интеллектуальных вложений (технология создания и эксплуатации).

*Аппаратура РЛС* включает следующие основные блоки:

- *антенные и приемо-передающие модули.* Антенно-фидерные устройства модулей обеспечивают направленное излучение и прием радиоволн с учетом их поляризации передающие модули – усиление, амплитудную и фазовую модуляцию радиочастотных колебаний; приемные модули – малошумящее усиление и преобразование частоты принимаемых радиочастотных колебаний;
- *синтезатор сигналов* генерирует колебания заданной радиочастоты и частот модуляции и преобразования для приемо-передающих модулей;
- *процессор обработки сигналов* с помощью аналоговых и цифровых устройств выполняет заданный алгоритм обработки принимаемых радиочастотных колебаний после преобразования в приемнике;
- *БЦВМ управления и обработки данных* обеспечивает согласование работы и режимов всех устройств РЛС и носителя РЛС в соответствии с решаемой задачей, а также обработку данных с выхода сигнального процессора.

**4. Система навигации** снабжает необходимой информацией системы обработки сигналов и управления.

**5. Система индикации и управления** обеспечивает связь между оператором и РЛС с использованием устройств отображения информации и интеллектуальных систем управления, реализуемых с помощью БЦВМ.

**6. Носитель РЛС** выполняет не только транспортные функции, но и обеспечивает заданное пространственное положение РЛС исходя из задачи формирования требуемого пространственно-временного сигнала.

## 1.2. Методы обнаружения и измерения координат цели

### 1.2.1. Основные задачи радиолокационного наблюдения

Задачами радиолокационного наблюдения на первом этапе являются обнаружение и измерение координат цели.

Энергия сигнала равна произведению средней мощности  $P_c$  на время наблюдения  $T_c$ :  $E_c = P_c T_c$  (Вт · с).

Энергия помехи, учитывая что  $1/T_c$  есть полоса частот сигнала  $\Delta f_c$ , в которой действует помеха,  $E_{\text{п}} = P_{\text{п}}T_c = P_{\text{п}}/\Delta f_c$  (Вт · с) определяется спектральной плотностью мощности помехи.

Задача измерения дальности цели в радиолокации сводится к задаче измерения задержки ЭМВ  $\tau_{\text{ц}}$  при ее распространении от РЛС до цели и обратно. При этом дальность цели есть расстояние  $R_{\text{ц}}$  от РЛС до цели в момент облучения цели ЭМВ.

Считается, что скорость распространения радиоволны  $c$  – величина постоянная. Тогда в случае однопозиционной РЛС ЭМВ за время  $\tau_{\text{ц}}$  проходит двойной путь  $2R_{\text{ц}} = c\tau_{\text{ц}}$ , а  $R_{\text{ц}} = c\tau_{\text{ц}}/2$ .

Измерение задержки  $\tau_{\text{ц}}$  в РЛС возможно различными методами, так как все параметры ЭМВ зависят от времени задержки. Обычно используются три метода: импульсный, частотный и фазовый.

### 1.2.2. Методы обнаружения и измерения

**Импульсный метод измерения дальности** (рис. 1.2) предполагает, что в РЛС используется сигнал в виде высокочастотного импульса, периодически повторяющегося с частотой  $F_{\text{п}}$ . Длительность импульса  $\tau_{\text{ц}}$  гораздо меньше периода повторения импульсов  $T_{\text{п}} = 1/F_{\text{п}}$ .

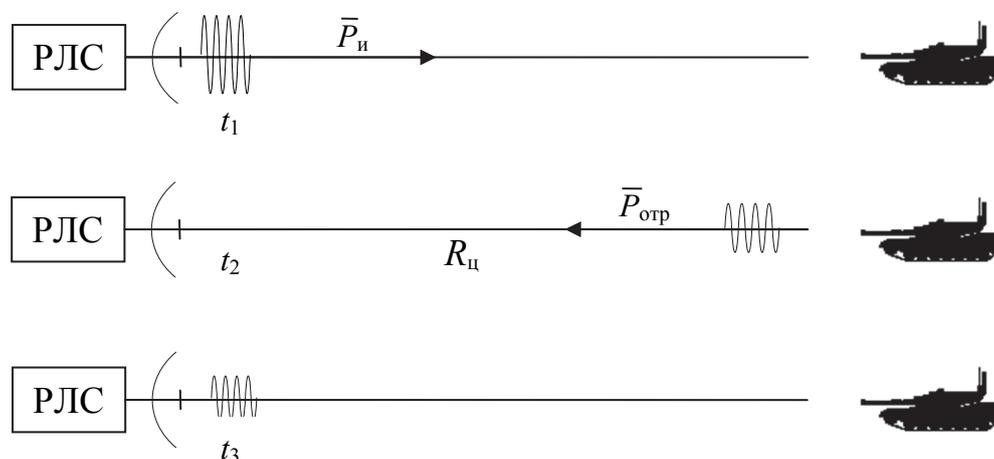


Рис. 1.2. Импульсный метод измерения дальности

Процесс измерения задержки повторяется с периодом  $T_{\text{п}}$ . Если задержка  $\tau_{\text{ц}}$  превышает период повторения  $T_{\text{п}}$ , то возникает ошибка измерения (неоднозначность). На рис. 1.3 показан процесс формирования ошибки измерения.

Если  $\tau_{\text{ц}} < T_{\text{п}}$ , то отраженный импульс приходит в своем первом периоде повторения, и неоднозначность измерения отсутствует.

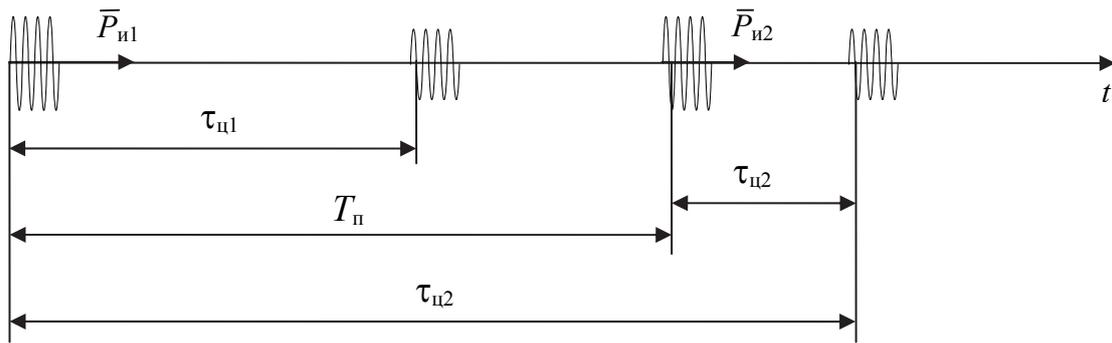


Рис. 1.3. Ошибка измерения дальности при импульсном методе измерения

Зона однозначного (правильного) измерения дальности при периодическом сигнале  $\Delta R = cT_p/2$ .

**Частотный метод измерения задержки** предполагает использование в РЛС сигналов с частотной (обычно линейной) модуляцией:

$$f(t) = f_0 + \nu \cdot t,$$

где  $\nu = \frac{df}{dt}$  – индекс частотной модуляции (рис. 1.4, а).

Период модуляции частоты  $T_m$  выбирается гораздо бóльшим периода задержки сигнала.

Изменение частоты отраженного сигнала на рис. 1.4, б представлено пунктиром. Разница частот излучаемого и принимаемого сигналов  $\Delta f_\tau$  определяется временем задержки сигнала цели  $\tau_{ц}$ :

$$f_{ц}(t) = f_0 + \nu (t - \tau_{ц});$$

$$\Delta f_\tau = f(t) - f_{ц}(t) = \nu \cdot \tau_{ц};$$

$$\tau_{ц} = \frac{\Delta f_\tau}{\nu}.$$

Разницу частот измеряют с помощью спектроанализатора. Процессор обработки сигналов выполняет эту операцию с помощью БПФ (быстрого преобразования Фурье). Измеренное значение  $\Delta f_\tau$  позволяет вычислить дальность цели:

$$R_{ц} = \frac{c\tau_{ц}}{2} = \frac{c\Delta f_\tau}{2\nu}.$$

**Фазовый метод измерения дальности** использует зависимость изменения фазы отраженной ЭМВ относительно излучаемой от величины задержки.

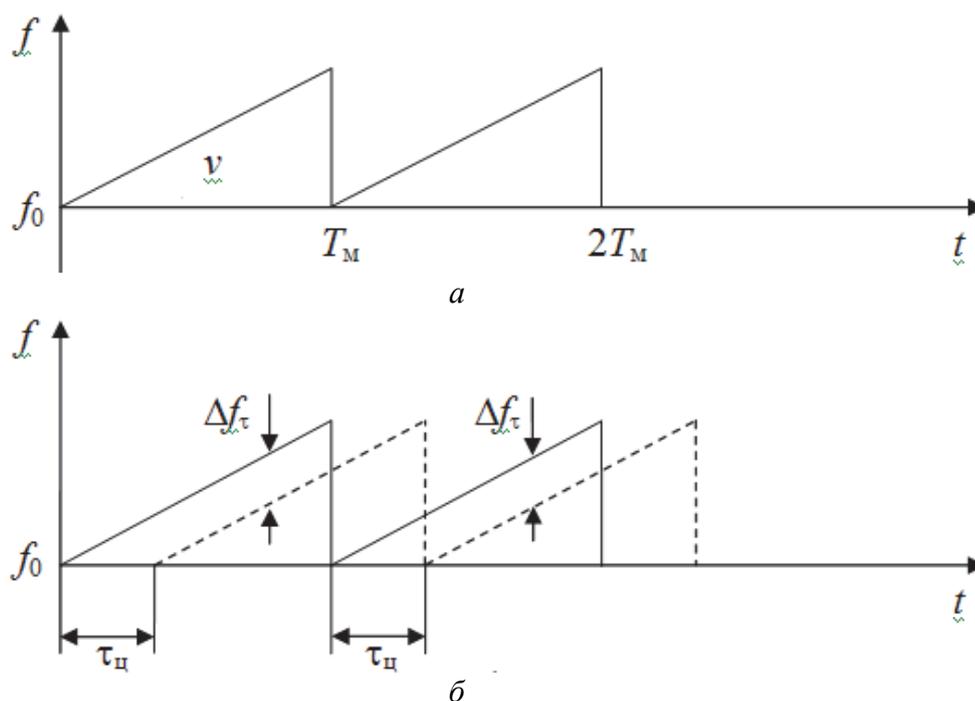


Рис. 1.4. Частотный метод измерения задержки сигнала

Сигналы можно представить в следующем виде: сигнал излучаемый  $U_{изл} = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$  и сигнал принимаемый  $U_{прм} = U_{ц} \cos[\omega_0(t - \tau_{ц}) + \varphi_{ц}]$ , где  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – несущая частота,  $\varphi_0$  – начальная фаза излучения;  $\varphi_{ц}$  – начальная фаза отражения,  $U_0$  и  $U_{ц}$  – соответственно амплитуды излученного и принимаемого сигналов.

Если начальные фазы сигналов равны ( $\varphi_0 = \varphi_{ц}$ ), то разность фаз определяется задержкой  $\tau_{ц}$ :

$$\Delta\varphi = \omega_0 \tau_{ц} = 2\pi f_0 \tau_{ц} = 2\pi \frac{c}{\lambda} \tau_{ц}$$

и

$$\tau_{ц} = \frac{\lambda}{2\pi c} \Delta\varphi.$$

Измеренное значение  $\tau_{ц}$  определяет дальность цели:

$$R_{ц} = \frac{c\tau_{ц}}{2} = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi.$$

Для измерения разности фаз  $\Delta\varphi$  используется фазовый детектор (ФД), в котором перемножаются излученный и принимаемый сигналы. Сигнал на выходе фазового детектора пропорционален  $\cos\Delta\varphi$ , т. е. сигнал фазового детектора изменяется при изменении дальности периодически

с периодом  $\Delta\varphi = 2\pi$ . Это приводит к неоднозначности измерения дальности с периодом  $\Delta R_{ц} = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot 2\pi = \lambda/2$ .

Случайное изменение фазы  $\varphi_{ц}$  при отражении ЭМВ от цели и малый диапазон однозначности измерения дальности  $\lambda/2$  являются основными недостатками фазового метода.

Фазовый метод отличается высокой чувствительностью к изменению задержки и дальности. Так, при длине волны  $\lambda = 3$  см изменение дальности всего на 1 мм приводит к изменению разности фаз  $\Delta\varphi = (4\pi\Delta R_{ц})/\lambda = 24^\circ$ .

Высокая чувствительность фазового метода к изменению дальности (расстояния) используется при измерении угловых координат и скоростей цели.

*Измерение радиальной скорости движения цели* сводится к измерению изменения дальности цели.

Непрерывно измеряя дальность  $R_{ц}$  тем или иным методом (импульсным, частотным или фазовым) и дифференцируя функцию  $R_{ц}(t)$ , получаем скорость движения цели относительно РЛС – радиальную скорость

$$R_r = \frac{dR_{ц}}{dt}.$$

При движении цели с постоянной радиальной скоростью  $V_r$  дальность цели равна  $R_{ц}(t) = R_0 \pm V_r t$ , где  $R_0$  – дальность в момент начала облучения цели (начальная дальность). Знак « $\pm$ » зависит от направления движения цели: к РЛС или от РЛС. Задержка сигнала в этом случае

$$\tau_{ц}(t) = \frac{2R_{ц}(t)}{c} = \frac{2R_0}{c} \pm \frac{2V_r t}{c},$$

а фаза сигнала

$$\varphi_{ц} = \omega_0 [t - \tau(t)] = 2\pi f_0 \left( t - \frac{2R_0}{c} \mp \frac{2V_r t}{c} \right) = 2\pi \left( f_0 \mp \frac{2V_r}{\lambda} \right) t - \varphi_0,$$

где  $\varphi_0 = \frac{4\pi f_0}{c} R_0 = \frac{4\pi}{\lambda} R_0$  – начальная фаза.

Таким образом, в результате движения цели относительно РЛС (или РЛС относительно цели) несущая частота принимаемого сигнала вследствие доплеровского эффекта изменяется на величину  $f = \pm \frac{2V_r}{\lambda}$ .

При сближении с РЛС частота увеличивается (знак «+»), а при удалении от нее – уменьшается (знак «-»). Сравнив частоту принимаемого сигнала  $f_0 + f$  с частотой излученного  $f_0$ , можно определить доплеровское смещение частоты и радиальную скорость цели:

$$V_r = -\frac{\lambda}{2} f.$$

**Измерение угловых координат цели** путем пространственной обработки отраженной от цели ЭМВ сводится к нахождению направления вектора Пойнтинга  $\bar{P}$ , который расположен по нормали к фронту волны (поверхности равных фаз ЭМВ). В однородной среде ЭМВ распространяется прямолинейно, а в случае точечного источника волны (точечной цели) фазовый фронт является сферическим. На расстояниях цели, больших дальней зоны  $R_{ц} \geq R_{дз} = 2d^2 / \lambda$ , где  $d$  – размер анализируемого (принимаемого) участка фазового фронта ЭМВ, кривизной фронта можно пренебречь и считать, что фронт волны плоский.

На рис. 1.5 представлена схема измерения направления прихода ЭМВ при приеме в двух точках (интерферометр), разнесенных на расстояние базы  $d$ .

Фазовый фронт ЭМВ плоский, направление его прихода к интерферометру определяется вектором  $\bar{P}$ . Угол  $\theta_{ц}$  фазового фронта относительно базы интерферометра определяет направление на цель. При  $\theta_{ц} = 0$  направление на цель – по нормали к базе.

Антенные элементы 1 и 2 преобразуют ЭМВ в электрические сигналы. Информация об угле  $\theta_{ц}$  заключена в задержке фазового фронта  $\Delta r$  второго элемента относительно первого:  $\Delta r = d \sin \theta_{ц}$ . Тогда задержка второго сигнала относительно первого определяется как  $\tau = \frac{\Delta r}{c} = \frac{d \sin \theta_{ц}}{c}$ . Измеряя относительную задержку сигналов  $\tau$ , можно определить угол цели  $\theta_{ц}$ .

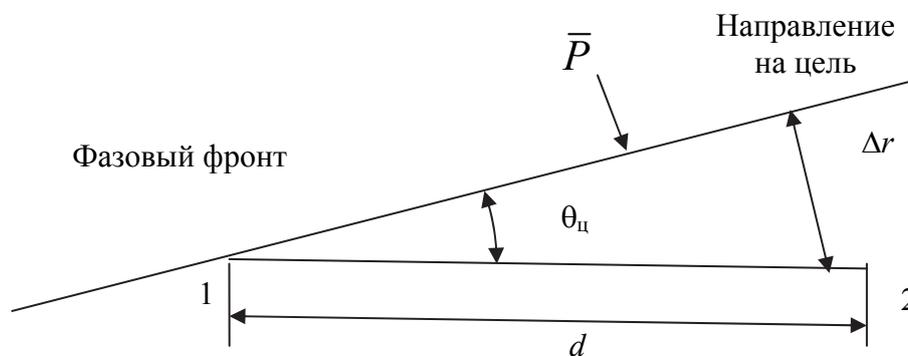


Рис. 1.5. Схема измерения направления на цель с помощью интерферометра

Возможны различные методы измерения задержки. Наиболее чувствительным методом является фазовый, при котором задержка определяется по величине запаздывания фазы второго сигнала относительно первого:

$$\Delta\varphi = 2\pi f_0 \tau = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_{\text{ц}}.$$

Тогда угол цели

$$\theta_{\text{ц}} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi d} \Delta\varphi\right).$$

Измерить разность фаз  $\Delta\varphi$  можно с помощью фазового детектора (фазовый метод) либо непосредственно суммируя сигналы первого и второго элементов (амплитудный метод):

$$U_{\Sigma} = U_1 + U_2 = 2U \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta_{\text{ц}}\right) \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\Delta\varphi}{2}\right),$$

где  $U$  – амплитуда сигнала,  $\varphi_0$  – начальная фаза сигнала.

Амплитуда суммарного сигнала  $U_{\Sigma}(\theta_{\text{ц}}) = 2U \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta_{\text{ц}}\right)$  имеет максимум при  $\theta_{\text{ц}} = 0$ . Функция  $U_{\Sigma}(\theta_{\text{ц}})$  является диаграммой направленности антенны (ДН), в данном случае – интерферометра.

Таким образом, *ширина ДН антенны определяется относительным размером антенны  $d/\lambda$ :*

Характерные величины относительного размера антенн авиационных РЛС истребителя  $d/\lambda = (20-30)$ , фронтового бомбардировщика  $d/\lambda = (50-150)$ , радиолокационного дозора и наведения  $d/\lambda = (80-100)$ , РЛС разведки с длинной вдольфюзеляжной антенной  $d/\lambda = (200-300)$ .

## Глава 2

---

### ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ

#### 2.1. Общие закономерности рассеяния электромагнитных волн наземными объектами

Источником информации об объектах является отраженная ЭМВ, приходящая к приемной антенне РЛС. Эффективность решения задач радиолокационного наблюдения во многом определяется знанием законов рассеяния объектами ЭМВ.

Термин «отражение» обычно используют как частный случай рассеяния ЭМВ в сторону источника облучения. Два главных свойства объекта определяют его характеристики отражения (параметры отраженной волны):

- комплексная диэлектрическая и магнитная проницаемость материала объекта;
- размеры неоднородностей поверхности и внутренней структуры объекта.

##### 2.1.1. Дифракция электромагнитных волн

Существуют общие закономерности формирования отраженного от объекта поля, знание которых позволяет решать задачи радиолокационного наблюдения с заданной степенью вероятности.

1. *Рассеянное поле* возникает вследствие отличия свойств среды распространения ЭМВ от свойств объекта. Отдельные элементы объекта также имеют различные отражающие свойства в случае отличия параметров их материала от соседних элементов объекта. Неоднородность свойств материалов внутри объекта также может влиять на функцию отражения вследствие частичного проникновения электромагнитной волны облучения вглубь материала. При этом комплексная диэлектрическая и магнитная проницаемость материала объекта определяет длину волны и ее поглощение в материале.

Так, например, при падении плоской волны на плоскую поверхность раздела двух сред с коэффициентами преломления  $n_1$  и  $n_2$ , где  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ ,  $\epsilon$  и  $\mu$  – соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемость, коэффициент отражения мощности

$$\xi = \left| \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}} \right|^2 = \frac{\left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right)^2}{\left( \frac{n_2}{n_1} + 1 \right)^2}$$

При одинаковых коэффициентах преломления сред  $n_1 = n_2$  слева и справа (рис. 2.1) коэффициент отражения  $\xi = 0$ , т. е. ЭМВ не отражается от границы двух сред. При  $n_1 \gg n_2$  происходит почти полное отражение волны ( $\xi \approx 1$ ).

2. *Рассеивающие свойства объекта определяются в основном соотношением длины волны облучения и размеров неоднородностей.* Так, если размер неоднородности меньше длины волны, рассеиваемое поле невелико и определяется в основном объемом неоднородности, как, например, при отражении волны от облаков, дождя и других неоднородностей атмосферы. При размере неоднородности порядка длины волны наблюдается резонансное взаимодействие и большое рассеивание волны. Например, головки заклепок на крыле и щель люка самолета вызывают большое отраженное поле в сантиметровом диапазоне волны. Если размер неоднородностей намного больше длины волны, отражение имеет сложный характер взаимодействия различного типа волн.

На рис. 2.2 в качестве примера показано изменение мощности отраженной волны  $P_{\text{отр}}$  в относительных единицах в зависимости от соотношения радиуса шара  $r$  и длины волны  $\lambda$ . При  $r/\lambda < 0,2$  мощность отражения невелика и растет пропорционально увеличению объема шара. При  $r/\lambda = 0,2-1,0$  наблюдается резонансное отражение, а при  $r \gg \lambda$  коэффициент отражения не изменяется.

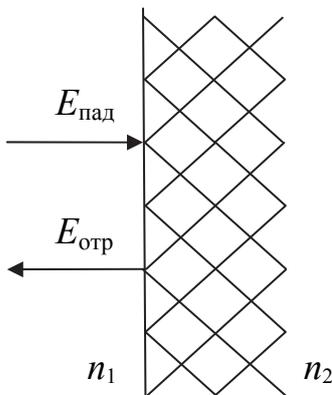


Рис. 2.1. Отражение от плоской поверхности

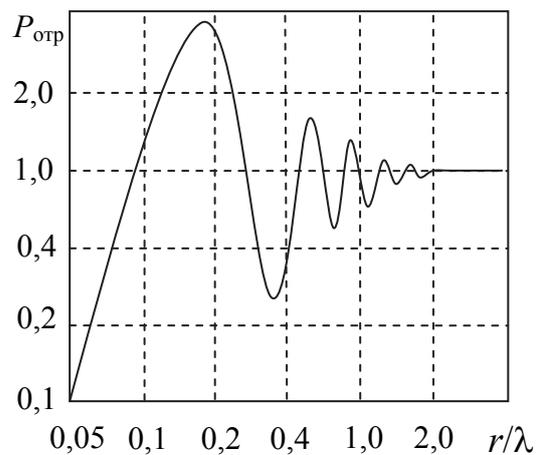


Рис. 2.2. Отражение от шара

3. *Неоднородности объектов.* По свойствам, влияющим на рассеяние волны, их можно разделить на два больших класса: шероховатые неоднородности (случайные поля) и гладкие неоднородности. Шероховатые поверхности формируют диффузное (во все стороны) отражение, а гладкие – зеркальное.

4. *Случайные поля* состоят из неоднородностей, дисперсия и радиус корреляции которых изменяются в широких пределах в зависимости от типа объекта. Поэтому такие поля имеют нестационарный характер, однако при достаточной детальности описания (наблюдения) их можно представить кусочно-стационарными полями. В этом случае отдельные наблюдаемые участки объекта с размерами, намного превышающими радиус корреляции неоднородностей (дороги, участки степи, водная поверхность и т. п.), представляются стационарными полями с постоянной дисперсией и нормальным законом распределения параметров неоднородности.

Напомним, что объектами радиовидения являются отдельные элементы техники, сооружений, аэродромов, дорог, воздушные цели, элементы земной и водной поверхности. Для участков ровной земной поверхности (степь, пашня, верхушки деревьев леса, взлетно-посадочная полоса (ВПП), ледовые поля и т. п.) среднее квадратическое отклонение (СКО) и радиус корреляции неоднородностей изменяются от единиц до десятков и сотен сантиметров. При этом радиус корреляции  $r_k$  шероховатостей обычно превышает в несколько раз СКО поверхности по высоте  $\sigma_h$ : для леса  $r_k/\sigma_h = (1,5-3,0)$ ; для луга, степи летом  $r_k/\sigma_h = (5-6)$ ; для серого льда  $r_k/\sigma_h = (10-20)$ ; для пустыни  $r_k/\sigma_h = (3-4)$ .

5. *Пересеченная местность*, наряду с неоднородностями поверхности, имеет также неоднородности рельефа, СКО и радиус корреляции которого исчисляются десятками метров. Рельеф изменяет угол падения волны на шероховатую поверхность. Вследствие этого изменяется средняя мощность обратного рассеяния.

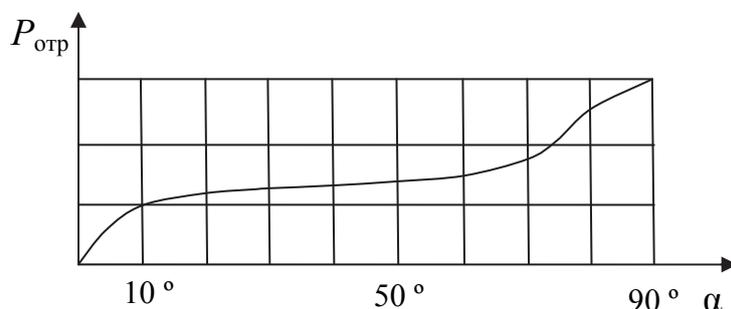


Рис. 2.3. Зависимость мощности отражения от угла падения ЭВМ на ровную земную поверхность

На рис. 2.3 показано изменение средней мощности отражения от ровной земной поверхности в зависимости от угла падения  $\alpha$  (угол между направлением облучения и земной поверхностью). При малых углах  $\alpha$  мощность отражения уменьшается пропорционально  $\sin \alpha$ .

Существует аналогичная зависимость мощности отраженного поля от угла падения на поверхность и других объектов (стены сооружений, ВПП, водная поверхность и т. п.). Границы стационарных участков поверхности могут быть и плавными (поле – кустарник – лес), и резкими (реки, дороги в лесу, пашня).

6. *Гладкие неоднородности* образуются поверхностями с малыми шероховатостями, когда СКО неоднородностей меньше длины волны облучения. Такие неоднородности имеют поверхности большинства объектов военной техники и сооружений, представляющие собой сочетание различных геометрических фигур с достаточно гладкой поверхностью (плоскости, сферы, цилиндры, уголки). Это, например, самолеты, танки, РЛС, корабли.

### **2.1.2. Распределение отраженного поля по поверхности объектов**

Неоднородности с *малыми шероховатостями* формируют в основном зеркальные отражения, так что суммарное рассеяние от группы гладких неоднородностей преобладает в одном или нескольких направлениях. В результате мощность отражения в этих направлениях значительно больше, чем при диффузном рассеянии. Наибольшая мощность обратного отражения (в сторону облучения) формируется неоднородностями в виде уголковых отражателей, а также плоскостями, ориентированными перпендикулярно направлению облучения. Неоднородности такого рода создают зеркальную область отражения, так называемую зеркальную точку, т. е. вся область отражения имеет один фазовый центр, из которого излучается отраженная всей областью волна. При этом расстояние между отдельными зеркальными точками на поверхности объекта превышает геометрические размеры неоднородностей, порождающих эти точки. Кроме того, положение зеркальных точек и мощность отраженной волны остаются стабильными при значительных изменениях углов облучения, наблюдения и длины волны.

На рис. 2.4 показано положение зеркальных точек для современного истребителя с переднего ракурса облучения в сантиметровом диапазоне волн. Точка 1 соответствует носу фюзеляжа, 2 – воздухозаборникам, 3 – излому кромки крыла. Расстояние между зеркальными точками значительно превышает размеры областей отражения, формирующих эти точки.

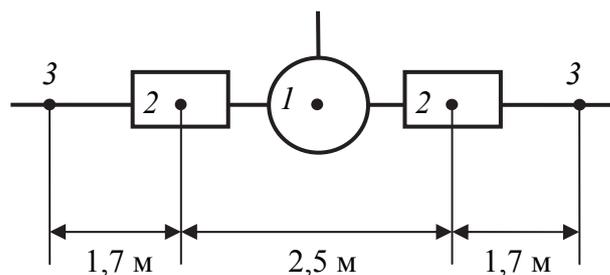


Рис. 2.4. Положение зеркальных точек отражения самолета-истребителя с переднего ракурса облучения

Мощность отражения от других областей фюзеляжа и крыла обычно на несколько порядков меньше мощности отражения от зеркальных точек. Эти малые отражения образуются отражающими точками на поверхностях различной кривизны, на краях и ребрах. Вносят вклад также краевые и поверхностные («ползущие») волны. Естественно, что такое радиолокационное изображение самолета мало похоже на фотографическое, даже при большой разрешающей способности.

Другим примером гладких неоднородностей может служить обшивка самолета *F-117A*, выполненного по технологии СТЭЛС. Такая обшивка состоит из отдельных плоских пластинок, расположенных так, что при облучении самолета с переднего ракурса пластинки отражают волну в боковом направлении в соответствии с законом оптики «угол падения равен углу отражения». В обратном направлении отражение минимально, что и обеспечивает снижение заметности. В этом случае такой объект может рассматриваться как случайное поле, формирующее диффузное отражение при облучении и наблюдении с переднего ракурса. Аналогично сформированы неоднородности обшивки самолета *B-2*. Объемные конструкции ограничены криволинейными поверхностями с непрерывно изменяющимся радиусом кривизны. Все поверхности сделаны наклонными для любого направления облучения. Линии сопряжения поверхностей направлены под острыми углами к главным направлениям облучения. Вся поверхность обшивки гладкая, отсутствуют выступающие головки винтов, заклепок и защелки люков. Все кромки (передние и задние крыла, воздухозаборников и выходных сопел двигателей, люков и панелей обшивок, органов управления, плоских антенн и т. п.) параллельны друг другу. Дополнительно используются поглощающие материалы, максимально снижающие отражения от возможных зеркальных точек и кромок. В такой конструкции для всех направлений облучения, кроме перпендикулярного к кромкам, достигается минимальное обратное отражение (диффузное отражение), характерное для случайных полей.

1. *Реальные поверхности объектов естественного и искусственного происхождения* имеют как шероховатые, так и гладкие неоднородно-

сти и создают одновременно и диффузное, и зеркальное отражения. Соотношение между ними определяется размерами неоднородностей, длиной волны и направлением облучения. Особое влияние оказывают поляризационные характеристики волны облучения и приемной антенны. Наибольшее рассеяние происходит в том случае, когда вектор электрической напряженности поля совпадает с преобладающим размером неоднородности. Так, отражение от проводов линий электропередачи максимально при горизонтальной поляризации волны и минимально при вертикальной.

2. Наряду с пространственными характеристиками отражения объектов существуют *временные характеристики*, обусловленные изменением параметров отражения во времени. Если объекты не изменяют своих отражающих свойств за время обработки отраженной волны либо их изменение априорно известно, они имеют когерентную во времени характеристику отражения (неподвижная либо движущаяся по известному закону техника, лес при отсутствии ветра, отдельный участок морской волны, вращающиеся лопасти вертолета и т. п.).

При случайном движении объекта и его отдельных частей, случайном изменении за время синтезирования его ракурса или длины волны РЛС происходит случайное изменение фазы и амплитуды отраженного поля, т. е. нарушается когерентность во времени. У реальных объектов всегда существуют когерентная и некогерентная составляющие отраженного поля. Соотношение мощностей когерентной и некогерентной составляющих зависит от типа объекта и условий наблюдения.

3. Изменение поля отражения по *пространству объекта* в большинстве случаев носит случайный (некогерентный) характер. Это обусловлено тем, что отражающие свойства объекта зависят случайным образом от большого числа факторов (размеров неоднородностей, материалов объекта, угла падения волны облучения и т. п.). В результате рассеянное по пространству объекта поле имеет случайные амплитуду и фазу. Радиолокационное изображение (РЛИ) объекта вследствие этого представляет собой шумовую «зернистую» картинку, так называемый «спекл-шум»\*. В отличие от фотографического, оно состоит из отдельных случайных по амплитуде и фазе точек.

Например, изображение взлетной полосы в сантиметровом диапазоне волн, несмотря на ровный характер поверхности ВПП, имеет случайное пространственное распределение интенсивности, т. е. зернистый, шумовой вид. Для получения «гладкого» полутонового изображения необходимо усреднение нескольких независимых реализаций шумовых изображений, по-

---

\* Спекл (англ. speckle – крапинка, пятнышко) – это случайная интерференционная картина, которая образуется при взаимной интерференции когерентных волн, имеющих случайные сдвиги фаз и/или случайный набор интенсивностей.

лученных при различных длинах волн, поляризации, углах облучения и т. п. В оптическом диапазоне такое усреднение происходит при фотографировании объекта в солнечном свете, который является некогерентным, состоящим из множества спектральных составляющих со случайными амплитудами, фазами и поляризацией.

## **2.2. Функция отражения от гладких неоднородностей**

Зная общие закономерности рассеяния (отражения) ЭМВ объектом (целью), для решения задач радиолокационного наблюдения необходимо определить характеристики отражения конкретных целей в РЛС землеобзора. Характеристики отражения цели определяют зависимость не только плотности потока мощности, но и фазы отраженной волны.

### **2.2.1. Случайная функция отражения шероховатых неоднородностей**

*Энергетическая характеристика* отражения цели определяет мощность сигнала цели на входе приемника. Формирование отраженного сигнала цели в процессе радиолокационного наблюдения показано на рис. 2.5.

Мощность сигнала цели  $P_{\text{ц}}$  определяется плотностью потока мощности отраженной от цели ЭМВ у приемной антенны РЛС (модулем вектора Пойтинга  $|\Pi_{\text{прм}}|$ , Вт/м<sup>2</sup>) и площадью антенны  $S_{\text{а}}$ , м:  $P_{\text{ц}} = |\Pi_{\text{прм}}| S_{\text{а}}$ .

В свою очередь отраженная ЭМВ с плотностью мощности  $|\Pi_{\text{прм}}|$  образуется в результате облучения цели. Передатчик и антенна (ПП – переключатель «прием-передача») формируют ЭМВ, которая распространяется на расстояние  $R$  до цели и обеспечивает плотность потока мощности облучения цели  $|\Pi_{\text{обл}}|$ . Отраженная ЭМВ распространяется от цели во все стороны и у приемной антенны имеет плотность потока мощности  $|\Pi_{\text{прм}}|$ .

Для определения плотности потока мощности отраженной ЭМВ в зависимости от характеристик цели вводят понятие *эффективной площади рассеяния (отражения) цели* (ЭПР)  $\sigma_{\text{ц}}$ , м<sup>2</sup>.

Считается, что цель как источник отраженной волны имеет мощность отражения

$$P_{\text{отр}} = |\Pi_{\text{обл}}| \sigma_{\text{ц}},$$

а плотность мощности отраженной волны у антенны

$$|\Pi_{\text{прм}}| = \frac{P_{\text{отр}}}{4\pi R^2} = \frac{|\Pi_{\text{обл}}| \sigma_{\text{ц}}}{4\pi R^2}. \quad (2.1)$$

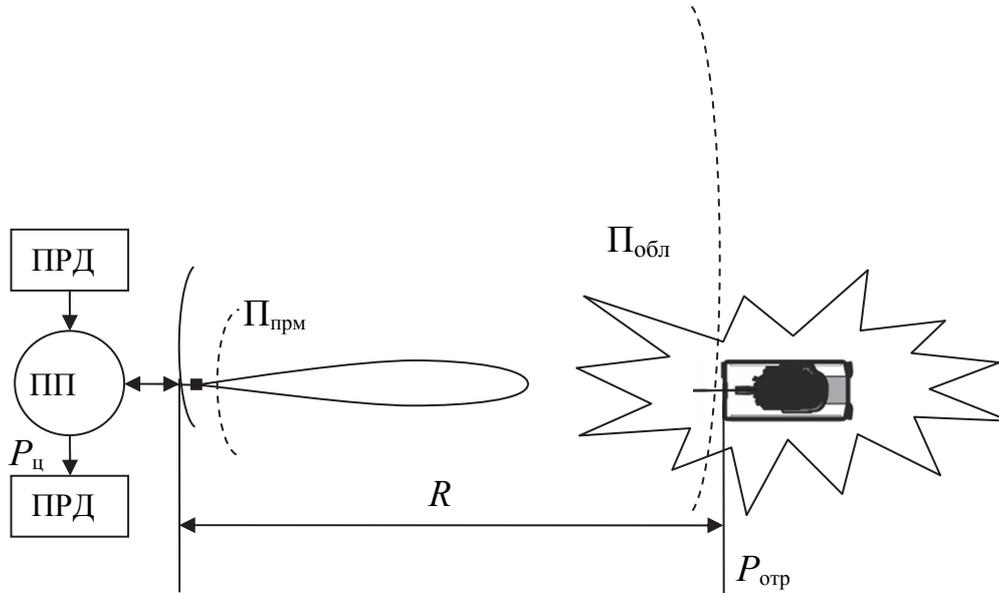


Рис. 2.5. Схема облучения цели и приема отраженной ЭМВ

При определении ЭПР цели полагают, что заданы длина волны, поляризация, направление облучения и приема. В этом случае ЭПР цели есть площадь плоской пластины, расположенной вместо цели по нормали к направлению облучения, которая при изотропном переизлучении создает в месте приема такую же плотность потока мощности отраженной ЭМВ, как и реальная цель.

Для каждой цели определяют (обычно экспериментальным путем) значение ее ЭПР, позволяющее рассчитывать мощность отраженного сигнала. Численно ЭПР цели может значительно отличаться от геометрической площади цели.

Таким образом, зная значение  $\sigma_{ц}$  конкретной цели, мы можем определить мощность принимаемого сигнала цели, пропорциональную  $\sigma_{ц}$ :

$$P_{ц} = \frac{|\Pi_{обл}| \sigma_{ц} S_a}{4\pi R^2}. \quad (2.2)$$

При этом  $\sigma_{ц}$  определяется выражением

$$\sigma_{ц} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\Pi_{прм}|}{|\Pi_{обл}|} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{E_{прм}}{E_{обл}} \right|^2, \quad (2.3)$$

где условие  $R \rightarrow \infty$  означает прием и облучение плоской волной.

Заметим, что здесь  $E_{обл}$  – напряженность ЭМВ облучения непосредственно у цели;  $E_{прм}$  – напряженность ЭМВ у приемной антенны, т. е. после прохождения ЭМВ расстояния  $R$  от цели до РЛС. Поэтому в формуле (2.3)