



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

# ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ВОЙСК

**УЧЕБНИК**



**ВОЕННО-ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ**

УДК 621.396.967(07)  
ББК 32.95я73  
О-753

**Авторы:**

В. Н. Тяпкин, А. Н. Фомин, Е. Н. Гарин, Ю. Л. Фатеев, В. П. Бердышев,  
А. А. Наговицын, А. В. Темеров, В. Г. Сомов, И. В. Лютиков

**О-753 Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск : учебник / В. Н. Тяпкин, А. Н. Фомин, Е. Н. Гарин [и др.] ; под общ. ред. В. Н. Тяпкина. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2021. – 536 с.**

ISBN 978-5-7638-4488-7

Приведены общие сведения о РЛС РТВ, их характеристиках и принципах построения; рассмотрены способы обзора пространства и измерения координат целей; даны основные технические характеристики и способы построения передающих устройств РЛС РТВ. Особое внимание уделено анализу влияния и вида зондирующего сигнала на защищенность РЛС от активных и пассивных помех, разрешающую способность и точность измерения координат. Приведены структурные схемы тракта приема и выделения сигналов, способы приема и обработки различных типов сигналов РЛС на фоне помех; описаны методы и устройства защиты РЛС РТВ от активных и пассивных помех, особенности их технической реализации; изложены принципы построения устройств отображения радиолокационной информации и работы устройств формирования разверток индикаторов и масштабных меток.

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 подготовки специальностей 210000 «Электронная техника, радиотехника и связь» (спец. 210304.65 «Радиоэлектронные системы»), а также всем интересующимся вопросами построения, развития и современного состояния РЛС РТВ.

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

**УДК 621.396.967(07)**  
**ББК 32.95я73**

ISBN 978-5-7638-4488-7

© Сибирский федеральный  
университет, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1. Радиолокационная система РТВ.....</b>	<b>8</b>
1.1. Принципы построения радиолокационной системы РТВ .....	8
1.2. Внешняя среда радиолокационной системы РТВ .....	15
1.2.1. Радиолокационные цели.....	15
1.2.2. Мешающие отражения .....	19
1.2.3. Внешние излучения .....	21
1.2.4. Среда распространения радиоволн .....	23
1.3. Классификация РЛС РТВ .....	26
1.4. Основные тактико-технические характеристики РЛС РТВ ....	33
1.5. Обобщенная структурная схема РЛС .....	39
1.6. Общие сведения о системе с активным запросом-ответом .....	44
1.7. Кодирование и декодирование сигналов в системах опозна- вания .....	48
1.7.1. Кодирование ответных сигналов в НРЗ .....	48
1.7.2. Декодирование ответных сигналов в НРЗ.....	53
1.8. Структурная схема РЛС с истинной внутренней когерентно- стью .....	55
1.9. Структурная схема РЛС с эквивалентной внутренней коге- рентностью.....	60
1.10. Структурная схема РЛС с эквивалентной внешней коге- рентностью.....	61
1.11. Общие сведения о системах пассивной локации.....	63
Контрольные вопросы .....	76
<b>Глава 2. Способы обзора пространства и измерения координат целей РЛС РТВ .....</b>	<b>78</b>
2.1. Зона обнаружения РЛС.....	78
2.2. Способы обзора пространства и их влияние на боевые воз- можности РЛС .....	85
2.3. Способы формирования зоны обнаружения .....	90
2.3.1. Зоны обнаружения целей дальномерами.....	93
2.3.2. Зоны обнаружения целей радиовысотомерами .....	96
2.3.3. Зоны обнаружения целей трехкоординатными РЛС.....	97
2.4. Особенности формирования зоны обнаружения целей в РЛС метрового диапазона волн.....	101
2.5. Способы измерения координат целей.....	111
2.5.1. Измерение наклонной дальности доцели .....	112
2.5.2. Измерение азимута цели .....	118
2.5.3. Измерение высоты полета цели.....	120

2.6. Антенно-волноводные системы РЛС .....	132
2.6.1. Основные характеристики антенно-волноводных систем .....	133
2.6.2. Антенно-волноводный тракт РЛС сантиметрового диапазона волн 19Ж6 .....	135
2.6.3. Антенно-волноводный тракт РЛС дециметрового диапазона волн 22Ж6 .....	140
2.6.4. Антенно-волноводный тракт РЛС метрового диапазона волн 55Ж .....	143
Контрольные вопросы .....	148
<b>Глава 3. Радиопередающие устройства РЛС РТВ .....</b>	<b>150</b>
3.1. Зондирующие сигналы и влияние их параметров на характеристики РЛС .....	151
3.1.1. Зависимость дальности обнаружения целей от параметров зондирующих сигналов .....	153
3.1.2. Зависимость разрешающей способности РЛС от параметров зондирующих сигналов .....	159
3.1.3. Зависимость точности измерения координат целей от параметров зондирующих сигналов .....	166
3.1.3.1. Классификация ошибок измерения .....	166
3.1.3.2. Ошибки измерения дальности .....	168
3.1.3.3. Ошибки измерения угловых координат .....	169
3.1.4. Влияние параметров зондирующих сигналов на защищенность РЛС от активных помех .....	170
3.1.5. Влияние параметров зондирующих сигналов на защищенность РЛС от пассивных помех .....	171
3.2. Основные типы передающих устройств РЛС .....	172
3.2.1. Однокаскадные радиопередающие устройства РЛС ....	172
3.2.2. Особенности построения однокаскадных радиопередающих устройств РЛС .....	174
3.2.3. Многокаскадные радиопередающие устройства РЛС ..	179
3.2.4. Особенности построения многокаскадного радиопередающего устройства с «простым» зондирующим сигналом .....	192
3.2.5. Особенности построения многокаскадного радиопередающего устройства с ФКМ зондирующим сигналом .....	196
3.2.6. Особенности построения многокаскадного радиопередающего устройства с лчм зондирующим сигналом .....	204
3.3. Импульсные модуляторы однокаскадных радиопередающих устройств .....	212

3.3.1. Принципы построения импульсных модуляторов и их классификация .....	212
3.3.2. Импульсный модулятор с полным разрядом накопителя .....	214
3.3.3. Импульсный модулятор с частичным разрядом накопителя .....	221
3.3.4. Генераторные приборы однокаскадных радиопередающих устройств .....	222
Контрольные вопросы .....	231
<b>Глава 4. Радиоприемные устройства РЛС РТВ .....</b>	<b>233</b>
4.1. Структурная схема тракта приема и выделения сигналов из помех .....	233
4.2. Технические характеристики радиоприемных устройств и их влияние на боевые возможности РЛС .....	240
4.3. Способы увеличения динамического диапазона радиоприемных устройств .....	245
4.4. Радиоприемные устройства для обработки узкополосных эхо-сигналов .....	257
4.5. Радиоприемные устройства для выделения широкополосных эхо-сигналов .....	263
4.5.1. Прием и обработка линейно-частотно-модулированных сигналов .....	264
4.5.2. Прием и обработка фазокодоманипулированных сигналов .....	268
4.6. Устройства накопления эхо-сигналов .....	272
4.6.1. Назначение и классификация устройств накопления радиолокационных эхо-сигналов .....	272
4.6.2. Некогерентные накопители эхо-сигналов .....	273
4.6.3. Когерентные накопители эхо-сигналов .....	276
4.6.4. Рециркуляторы. Принципы построения .....	281
4.6.5. Цифровые устройства накопления радиолокационных эхо-сигналов .....	286
Контрольные вопросы .....	290
<b>Глава 5. Способы и устройства защиты РЛС РТВ от активных помех .....</b>	<b>292</b>
5.1. Технические характеристики систем защиты РЛС РТВ от активных помех .....	293
5.2. Способы защиты РЛС РТВ от активных помех .....	294
5.2.1. Уравнение противорадиолокации .....	294
5.2.2. Частотная селекция эхо-сигналов и помех .....	300
5.2.3. Поляризационная селекция .....	303
5.2.4. Временная селекция .....	305

5.2.4.1. Селекция по длительности импульсов .....	305
5.2.4.2. Селекция импульсов по периоду повторения...	306
5.2.5. Пространственная селекция.....	308
5.3. Адаптивная пространственная селекция эхо-сигналов и активных шумовых помех .....	312
5.3.1. Принцип работы корреляционного автокомпенсатора.	312
5.3.2. Квадратурный автокомпенсатор активных помех .....	314
5.3.3. Гетеродинный автокомпенсатор активных помех .....	319
5.4. Алгоритмы и устройства адаптации к активным помехам в РЛС с фазированной антенной решеткой.....	324
5.4.1. Алгоритм адаптивного обнаружителя сигнала на фоне коррелированных помех .....	324
5.4.2. Дискретное оценивание измеряющейся во времени корреляционной матрицы помехи .....	330
5.4.3. Оценивание изменяющейся по мощности и во времени обратной корреляционной матрицы помехи .....	335
5.4.3.1. Алгоритмы и устройства текущего оценивания весового вектора .....	337
5.4.3.2. Диаграмма направленности фазированной антенной решетки при адаптации к помеховой обстановке.....	345
5.4.3.3. Способы сохранения формы главного лепестка диаграммы направленности фазированной антенной решетки.....	349
5.5. Пример технической реализации адаптивной системы защиты от непрерывных активных помех в РЛС РТВ .....	356
5.6. Система пеленгации постановщиков активных шумовых помех в РЛС РТВ .....	360
5.7. Пространственная селекция импульсных помех .....	365
5.7.1. Амплитудная пространственная селекция импульсных помех .....	365
5.7.2. Фазовый способ пространственной селекции импульсных помех .....	367
Контрольные вопросы .....	369
<b>Глава 6. Способы и устройства защиты РЛС РТВ от пассивных помех .....</b>	<b>371</b>
6.1. Способы защиты РЛС РТВ от пассивных помех.....	371
6.1.1. Основные отличия эхо-сигналов от целей и пассивных помех .....	372
6.1.2. Показатели защищенности РЛС РТВ от пассивных помех .....	382

6.1.3. Основные способы защиты РЛС РТВ от пассивных помех .....	386
6.1.3.1. Пространственная селекция .....	387
6.1.3.2. Поляризация селекция .....	388
6.1.3.3. Частотная (скоростная) селекция.....	391
6.2. Обобщенная структурная схема системы подавления пассивных помех.....	397
6.3. Системы СДЦ с непереустройваемыми устройствами черес- периодного вычитания .....	411
6.3.1. Системы СДЦ в РЛС с эквивалентной внутренней ко- герентностью .....	411
6.3.2. Системы СДЦ в РЛС с внешней когерентностью .....	414
6.3.3. Системы СДЦ в РЛС с истинной когерентностью на основе доплеровских частотных фильтров.....	417
6.3.3.1. Фильтровые системы СДЦ .....	418
6.3.3.2. Корреляционно-фильтровые системы СДЦ.....	422
6.4. Адаптивные системы СДЦ.....	425
6.4.1. Однократные системы череспериодной автокомпен- сации.....	427
6.4.2. Двухкратные системы череспериодной автокомпен- сации.....	431
6.5. Цифровые системы СДЦ.....	436
6.5.1. Принципы построения цифровых систем СДЦ.....	436
6.5.2. Обобщенная структурная схема цифровой системы обработки радиолокационных сигналов .....	437
6.5.3. Цифровая система СДЦ с обработкой сигналов во временной области.....	441
6.5.3.1. Цифровая СДЦ с нерекурсивным гребенчатым фильтром подавления.....	442
6.5.3.2. Цифровая СДЦ с рекурсивным гребенчатым фильтром подавления.....	446
6.5.4. Цифровая система СДЦ с обработкой сигналов в час- тотной области .....	453
6.6. Принципы построения устройств стабилизации уровня лож- ных тревог .....	463
6.6.1. Формирование адаптивного порогаобнаружения .....	463
6.6.2. Устройство стабилизации уровня ложных тревог по дальности .....	465
6.6.2.1. Формирование порогаобнаружения по методу «скользящего окна» .....	465
6.6.2.2. Устройство стабилизации уровня ложных тревог по дальности с усечением выборки .....	468

6.6.2.3. Адаптивный обнаружитель, использующий алгоритм порядковых статистик при формировании порога обнаружения .....	471
6.6.2.4. Быстродействующий параметрический ПС-обнаружитель .....	473
6.6.2.5. Непараметрические обнаружители.....	475
6.6.3. Устройство стабилизации уровня ложных тревог по азимуту.....	479
Контрольные вопросы .....	484
<b>Глава 7. Классификация и принципы построения устройств отображения радиолокационной информации.....</b>	<b>486</b>
7.1. Назначение и классификация индикаторных устройств .....	486
7.2. Особенности формирования разверток экранов индикаторов	492
7.2.1. Принципы построения индикаторов обзорных РЛС.....	492
7.2.1.1. Функциональный состав индикатора .....	493
7.2.1.2. Индикаторы кругового обзора с вращающимися отклоняющими системами .....	496
7.2.1.3. Индикатор кругового обзора с неподвижной-отклоняющей системой.....	499
7.2.2. Принципы построения системы отображения радиовысотомера .....	504
7.2.2.1. Способы построения индикаторов измерения высоты.....	504
7.2.2.2. Функциональная схема индикаторов измерения высоты.....	509
7.3. Формирование масштабных отметок.....	513
7.3.1. Системы передачи и формирования масштабных отметок азимута РЛС РТВ .....	513
7.3.1.1. Принципы построения систем передачи азимута РЛС РТВ .....	513
7.3.1.2. Принципы построения систем формирования масштабных отметок азимута РЛС РТВ .....	516
Контрольные вопросы .....	520
<b>Заключение.....</b>	<b>521</b>
<b>Библиографический список.....</b>	<b>523</b>
<b>Список сокращений.....</b>	<b>525</b>



# ГЛАВА 1 РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА РТВ

## 1.1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РТВ

Радиолокационная техника (РЭТ) РТВ представляет собой сложную совокупность (систему) образцов радиолокационных станций (РЛС). Эта система сложилась исторически и развивается на протяжении десятилетий, подчиняясь определенным закономерностям. Сложность системы РЭТ РТВ обусловлена:

разнообразием классов, типов, технических решений и элементной базы радиоэлектронных средств (РЭС), одновременно и совместно находящихся в эксплуатации;

территориальным распределением и разнообразными климатическими условиями эксплуатации;

необходимостью многоуровневого информационного обмена, т. е. сопряжения РЭТ РТВ с разнообразными потребителями информации;

большим суммарным расходом ресурсов (людских, энергии, топлива, материальных и денежных средств) на эксплуатацию и поддержание боевой готовности РЭТ;

постоянным обновлением типажа РЭТ, совершенствованием парка РЭТ по частям (элементам), необходимостью обеспечения совместимости (совместная эффективная работа) РЭТ разных типов и поколений.

Таким образом, под *радиолокационной системой* понимают развернутую на местности группировку РТВ, между элементами которой существуют функциональные связи для сбора, обработки и выдачи РЛИ, предназначенной для оценки воздушной обстановки и обеспечения боевых действий войск ВВС (зенитных ракетных войск – ЗРВ и истребительной авиации – ИА).

В целом, *система – это совокупность элементов, закономерно связанных друг с другом в единое целое, обладающее свойствами, отсутствующими у элементов, его образующих.*

Основные признаки системы: структура, иерархия в организации, наличие подсистем (элементов), закономерная связь между образующими её подсистемами, наличие входа и выхода, ориентированность в пространстве – охват определенной части физического пространства в соответствии с целевым назначением.

Разнообразие и сложность функционирования систем требует тщательного подхода к их изучению и проектированию. Особый интерес представляют большие системы. Точных количественных оценок это понятие

не имеет. Однако качественно система может быть отнесена к разряду больших систем, если обладает следующими признаками (свойствами):

имеет сложную структуру и состоит из ряда взаимосвязанных подсистем;

характеризуется сложными процессами взаимодействия, которые имеют не только детерминированный, но и вероятностный характер;

имеет ясно выраженное целевое назначение;

характеризуется многоэтапностью жизненного цикла (разработка, изготовление, испытание, эксплуатация, модернизация).

Итак, прежде всего, к большим системам можно отнести систему ПВО (рис. 1.1).

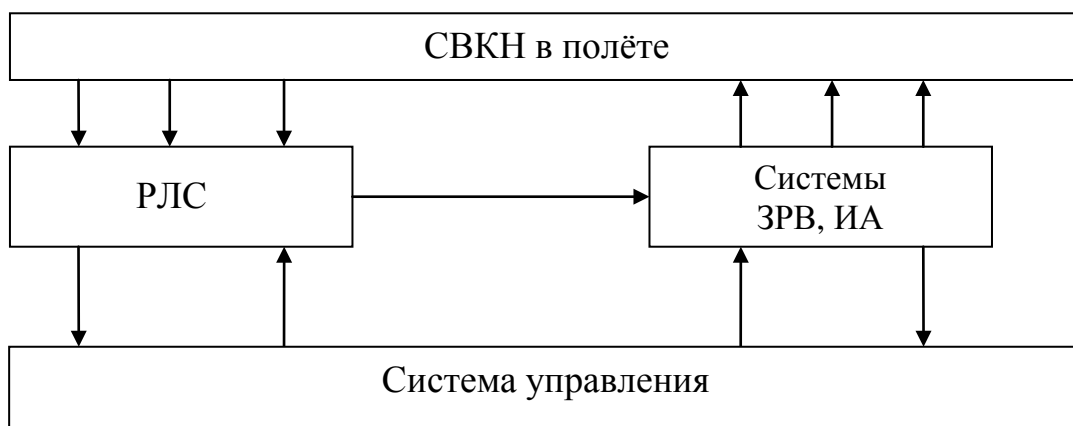


Рис. 1.1. Система ПВО

Из рис.1.1 видим, что большую систему по функциональному признаку можно разделить на следующие составные части: *исполнительную, информационную и управляющую.*

*Исполнительная часть* (системы ЗРВ и ИА) располагает некоторыми возможностями или ресурсами, расходуемыми в соответствии с целевым назначением системы.

*Информационная часть* (радиолокационная система) доставляет в систему управления и непосредственно в исполнительную подсистему всю информацию о состоянии внешней среды (СВКН) и результатах взаимодействия с ней.

*Управляющая часть* перерабатывает информацию, поступающую от информационной и исполнительной части, и распределяет возможности и ресурсы информационной и исполнительной части в соответствии с полученной информацией.

В свою очередь, информационная часть (радиолокационная система) также может рассматриваться как большая система:

имеет четкое целевое назначение – разведка и оценка воздушной обстановки и обеспечение боевых действий системы более высокого порядка – системы ПВО (ЗРВ и ИА);

имеет сложную структуру – в состав входит большое количество РЭТ различного назначения;

характеризуется сложными процессами функционирования (обнаружение цели на фоне помех, определение их текущих координат, обмен информацией между системами управления ЗРВ и ИА – рис. 1.1);

имеет иерархическую структуру, т. е. является подсистемой системы ПВО и сама состоит из подсистем:

радиоэлектронная техника – средства радиолокации (СРЛ), комплексы средств автоматизации (КСА);

радиоэлектронные устройства (передающие, приемные, защиты от помех, антенно-волноводные и т. д.);

функциональные узлы (звенья) – генераторы, усилители, фильтры и т. д.;  
схемные элементы (микросхемы, транзисторы, резисторы, конденсаторы, диоды и т. п.).

Кроме того, радиолокационная система обладает свойствами, которые отсутствуют у образующих её элементов: отдельных СРЛ, КСА.

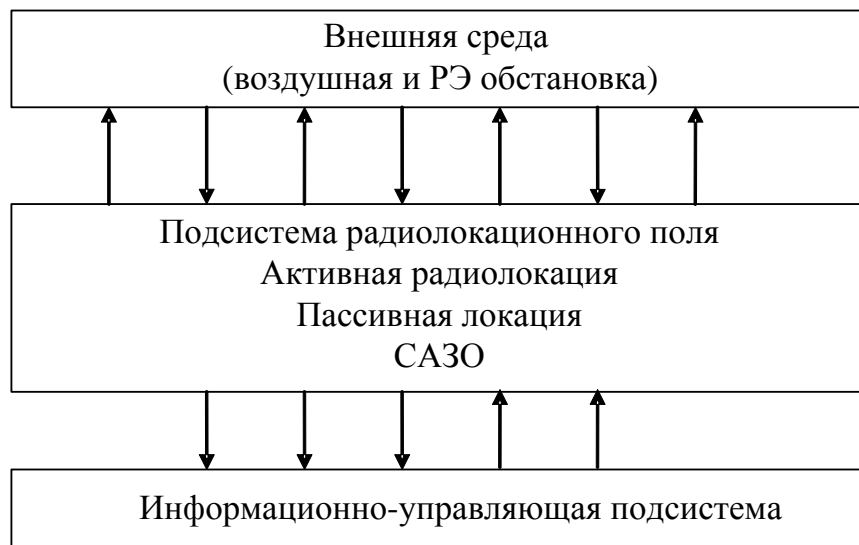


Рис. 1.2. Структурная схема радиолокационной системы

Радиолокационная система позволяет решать задачи, которые не в состоянии решить отдельные элементы РЭТ:

радиолокационная система практически не имеет ограничений по дальности, так как её элементы могут быть развернуты на большой территории;

радиолокационная система может адаптироваться к изменениям воздушной обстановки;

радиолокационная система обеспечивает получение значительно большего объема информации, чем отдельные элементы РЭТ;

возможности обмена информацией между элементами радиолокационной системы обеспечивают её более высокую надежность и помехоустойчивость.

Радиолокационная система, в свою очередь, также состоит из подсистемы радиолокационного поля и информационно-управляющей подсистемы (рис. 1.2).

Информационно-управляющая подсистема выполняет функции сбора, обработки и выдачи РЛИ потребителям. Она выполнена в виде сети взаимосвязанных командных пунктов (КП) и разведывательно-информационных центров (РИЦ) соединений ПВО, оснащаемых комплексами средств автоматизации.

Информационно-управляющая подсистема обеспечивает объединение отдельных отчетов координат целей в трассы (вторичная обработка), отождествление и объединение РЛИ от различных источников (третичная обработка), управление работой подсистемы радиолокационного поля (РЛП) и потоком РЛИ.

Подсистема РЛП взаимодействует с внешней средой (воздушной и радиоэлектронной (помеховой) обстановкой), используя известные типы радиолокаций: активную эхо-локацию, пассивную локацию источников радиоизлучений (помех) и активную локацию с активным ответом (системы с активным запросом-ответом (САЗО) – для увеличения дальности локации своих истребителей).

Элементы подсистемы РЛП работают, как правило, в режиме последовательного обзора пространства и добывают первичную РЛИ в виде дискретных отсчетов координат и признаков целей с привязкой их во времени в пределах своих зон обнаружения.

Зоной обнаружения целей РЛС, развернутой на конкретной позиции, является та часть воздушного пространства, в пределах которой обеспечивается получение РЛИ о целях определенного класса с показателями качества, не хуже заданных. Совокупность зон обнаружения  $\Omega_i$ , включенных РЛС группировки (группировок) РТВ, образует РЛП  $\Omega_{\text{рлп}}$  активной радиолокации:

$$\Omega_{\text{рлп}} \geq \{\Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3 \cup \dots\},$$

где  $\Omega_i$  –  $i$ -я зона обнаружения ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ).

Данная формула соответствует простому объединению зон обнаружения (ЗО) РЛС. При этом левая часть иногда может быть больше правой за счет информационного или сигнального взаимодействия РЛС группировки (системный эффект). Некоторые области пространства могут принадлежать одновременно нескольким ЗО РЛС. В этих областях создается многократное РЛП с кратностью  $S = 2; 3, \dots$ .

РЛП  $\Omega_{\text{рлп}}$  имеет, как правило, сложную конфигурацию, характеризуется набором сечений для заданных высот полета целей над уровнем моря, а на малых высотах – над огибающей рельефа местности. Упрощенное представление об РЛП дают его параметры: границы (рубежи) поля на заданной высоте, верхняя  $H_{\text{макс}}$  и нижняя  $H_{\text{мин}}$  высоты кромок сплошного РЛП.

Учитывая летно-тактические характеристики СВН, к границам сплошного РЛП предъявляются следующие требования: по высоте  $H_{\text{мин}} \leq 50$  м,  $H_{\text{макс}} \approx (30 \dots 40)$  км и более.

Выполнение второго условия можно обеспечить, используя мощные, высокопотенциальные РЛС, а для снижения  $H_{\text{мин}}$  требуется или увеличить плотность группировки РТВ, или осуществить подъем РЛС (антенн) на вышки, господствующие высоты, использовать летательные аппараты (ЛА), в т. ч. космического базирования.

Радиолокационная система РТВ складывалась исторически и остается в пределах обозримого будущего в основном как система наземного базирования.

РЛП, создаваемое средствами радиолокации различного назначения, работающими на различных принципах, многофункционально, сложно по своей структуре и обеспечивает достаточно устойчивое добывание РЛИ о воздушной обстановке для обеспечения войск в любых условиях.

Основная функция «идеальной» радиолокационной системы – максимально полное, безошибочное отображение и прогнозирование трасс воздушных объектов и определение их признаков (принадлежность, класс и др.) в реальном масштабе времени. Соответственно основными показателями качества радиолокационной системы могут служить:

полнота отображения воздушной обстановки ( $\mu$ );

достоверность отображения ( $\alpha$ );

точность отображения трасс ( $\sigma_{xy}$ ).

С помощью данных показателей качества оценивается эффективность радиолокационной системы. Моделируя на ЭВМ процесс функционирования радиолокационной системы при отражении удара СВН, можно рассчитать математические ожидания числа отображаемых трасс  $\bar{M}$ , числа ложных трасс  $\bar{M}_{\text{лт}}$  и среднеквадратические ошибки (СКО)  $\sigma_{xy}$  определения координат целей.

Показатели

$$\mu = \frac{\bar{M}}{M_0}; \quad \alpha = \frac{\bar{M}_{\text{лт}}}{M_0}; \quad \sigma_{xy} = \sqrt{\frac{1}{\bar{M}} \sum_{i=0}^{\bar{M}} \sigma_{xyi}^2},$$

где  $M_0$  – число моделируемых трасс, характеризуют ожидаемые полноту, достоверность и точность отображения трасс для заданной модели удара. Варьируя варианты группировки РТВ и модели ударов СВН, можно обосновать предпочтительный вариант построения, требования к ТТХ СРЛ и КСА, оценить ожидаемую эффективность радиолокационной системы.

Многомерный критерий качества  $\{\mu, \alpha, \sigma_{xy}\}$  нагляден. Требования к его составляющим достаточно просто обосновываются:  $\mu \geq 0,9$ ;  $\alpha \leq 0,1$ ;  $\sigma_{xy} \approx 10^2 \dots 10^3$  м. Он применим для анализа результатов испытаний или моделирования при известных вариантах обстановки. Однако с его помощью трудно выработать рекомендации по совершенствованию радиолокационной системы, если показатели неудовлетворительны, нет уверенности в представительности оценок эффективности для произвольных условий обстановки.

Приемы усреднения показателей качества по пространству и множеству целей не всегда обоснованы. Многомерный критерий неудобен также для восприятия при оценке состояния радиолокационной системы и организации управления ею. Поэтому при разработке, принятии на вооружение новых радиолокационных средств и организации эксплуатации возникает проблема оценки их эффективности. Эффективность любых технических систем, в т. ч. радиолокационных, определяется их назначением, а также результатами использования по назначению и затратами на создание и эксплуатацию. Чтобы судить об эффективности применения радиолокационной системы, необходим критерий или численный показатель ее оценки. При решении оптимизационных задач, когда показатель (критерий) эффективности зависит от нескольких аргументов, его называют целевой функцией.

На практике находят применение различные критерии оценки эффективности:

$$E = \frac{W - C}{W_0},$$

где  $W$  – результат использования средства по назначению;

$C$  – затраты на его создание и эксплуатацию;

$W_0$  – результат применения средства в случае, когда стоящие перед ним задачи выполняются полностью,

$$E = W - C \text{ и } E = \frac{W}{C}.$$

В принципе, возможны и другие формы критериев оценки эффективности применения технических средств<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Ботов М.И., Вяхирев В.А. Теоретические основы радиолокационных систем РТВ: учеб. пособие. – Красноярск, 2007. – 346 с.

При оценке эффективности применения образцов вооружения и военной техники в качестве показателя  $W$  обычно используется математическое ожидание нанесенного или предотвращенного ущерба. Очевидно, что для средств ПВО предпочтителен второй вариант. Основным методом определения численного значения показателя  $W$  является статистическое моделирование соответствующих боевых действий на ЭВМ. Показатель  $C$  оценивается экономическими расчетами.

Выбор критерия оценки эффективности большой системы представляет собой сложную и ответственную задачу. Используя положения системного анализа, выбор критерия эффективности применения радиолокационной системы следует производить на основании анализа боевых действий системы ПВО, в качестве подсистемы которой она является. При этом эффективность применения радиолокационной системы определяется тем вкладом, который она вносит в общую эффективность системы ПВО.

Особенность радиолокационной системы состоит в том, что она давно создана, функционирует и требует развития, поэтому применение к ней принципа системного подхода предполагает обоснование наиболее рациональных путей ее развития:

- обновление образцов РЭТ;
- совершенствование структуры (группировки) подразделений РТВ;
- совершенствование внутрисистемных и межсистемных (с другими средствами ПВО) связей.

Указанные три направления развития тесно взаимосвязаны. Возможны различные сочетания расширенного (экстенсивного) и качественно нового (интенсивного) развития. Особенно динамично в радиолокационной системе должна развиваться РЭТ: пополняться новыми образцами СРЛ и КСА каждые 3–4 года и, в результате, существенно менять свой облик за 10–15 лет, чтобы соответствовать динамике развития СВН. Отсюда следует, что постоянное целенаправленное совершенствование РЭТ – объективно необходимое условие и основное содержание процесса развития большой радиолокационной системы РТВ.

Важнейшей стороной этого процесса является совместимость новых образцов РЭТ с существующим парком. Если учесть, что на разработку, испытания и серийное производство новых образцов РЭТ уходит 5–10 лет, а приемлемый жизненный цикл образца РЭТ составляет до 20 лет, то в РТВ неизбежна эксплуатация РЭТ старого и нового парков совместно.

Следовательно, стратегия развития большой радиолокационной системы и подготовки военных инженеров для ее эксплуатации должна учитывать большой временной интервал (20 лет и более) и решать следующие задачи:

- обоснование классов РЭТ, назначения, облика, ТТХ каждого класса, количественного состава классов и взаимодействия РЭТ разных классов;

анализ вариантов и выбор основных технических решений для РЭТ разных классов;

военно-экономический анализ целесообразности разработки и внедрения конкретных образцов РЭТ по критерию «эффективность – стоимость».

выявление качественно новых путей построения РЭТ, обеспечивающих интенсивное развитие радиолокационной системы.

Заметим, что технические возможности совершенствования СРЛ и КСА могут быть практически неограниченными. Однако анализ военной и экономической целесообразности существенно ограничивает реальную свободу выбора, особенно с учетом «инерционности» действующей радиолокационной системы.

## **1.2. ВНЕШНЯЯ СРЕДА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РТВ**

Физической внешней средой радиолокационной системы является приземное (воздушное) пространство, в котором находятся объекты локализации (радиолокационные цели) и распространяются радиоволны, обеспечивающие локацию объектов. Наряду с «полезными» объектами (целями) внешняя среда содержит источники помех: пассивные переизлучающие отражатели (неоднородности среды распространения) и источники мешающих излучений, а также объекты, обладающие поражающим действием на элементы радиолокационной системы как естественного происхождения, так и создаваемые противником.

Описание внешней среды включает: индивидуальные характеристики объектов локализации и источников помех и общее (интегральное) описание ожидаемой воздушной и помеховой обстановки и среды распространения радиоволн для отдельной РЛС (подразделения) и для группировки РТВ.

### **1.2.1. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ЦЕЛИ**

Объектами (целями) локализации являются аэродинамические (самолеты, автоматические аэростаты, воздушные шары) и ракетные ЛА, движущиеся в атмосфере, а также подводные корабли для приморских подразделений РТВ.

В зависимости от геометрии ЛА, их радиолокационных и летно-технических характеристик различают:

самолеты стратегической авиации (СА);

самолеты тактической и палубной авиации (ТА);

стратегические крылатые ракеты (СКР) – ударные беспилотные невозвращаемые самолеты;



авиационные и зенитные ракеты различных классов;  
 беспилотные или дистанционно пилотируемые ЛА;  
 автоматические дрейфующие аэростаты (АДА) и воздушные шары  
 (в перспективе, возможно, и дирижабли);  
 боевые корабли в надводном положении.

Для решения задач РЛО и сопровождения целей размеры элементов разрешения РЛС РТВ должны выбираться так, чтобы цели можно было считать «точечными» объектами. Применяемый метод последовательного кругового обзора узкими по азимуту лучами с темпом  $T_{\text{обз}} = 10(5)$  с приводит к малым временам облучения цели  $t_{\text{обл}} = 30 \dots 120$  мс, значит, и временной контакт РЛС с целью можно считать «точечным».

Основной радиолокационной характеристикой цели является эффективная площадь рассеяния (ЭПР) радиоволн  $\sigma_{\text{ц}}$ , определяемая исключительно конкретной геометрией и материалами поверхности объекта локализации. *Под ЭПР объекта понимают такую поверхность идеализированного объекта, которая равномерно рассеивает всю падающую на него энергию, создавая в точке приема такую же плотность потока отраженной энергии, как и реальная цель.*

Величина ЭПР  $\sigma_{\text{ц}}$  каждой конкретной цели является меняющейся и случайной для наблюдателя величиной, зависящей от результата интерференции радиоволн, отраженных доминирующими отражателями цели – «блестящими» точками. Значение ЭПР  $\sigma_{\text{ц}}$  зависит от ракурса  $\theta_{\text{ц}}$  цели, длины волны  $\lambda$  РЛС, количества и взаимного расположения «блестящих» точек и их вклада в суммарный эхо-сигнал.

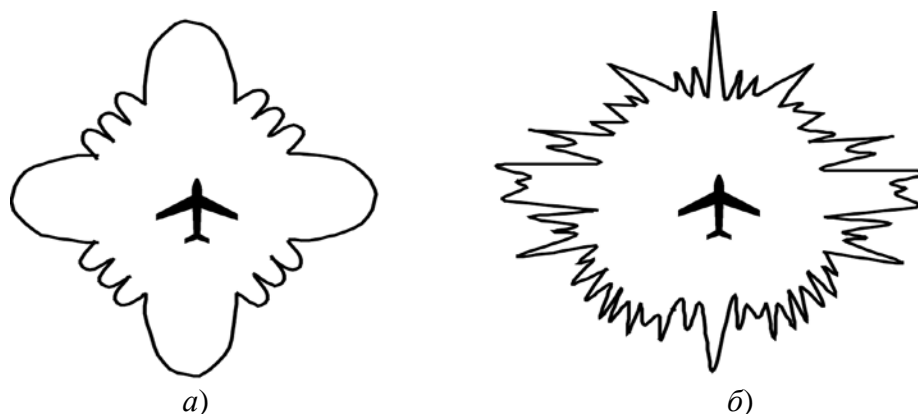


Рис. 1.3. Диаграммы обратного вторичного излучения самолета в горизонтальной плоскости при  $\lambda = 3..5$  м (а) и  $\lambda = 10$  см (б)

У любой цели, летящей с параметром относительно РЛС, угол  $\theta_{\text{ц}}$  непрерывно меняется, что приводит к изменениям среднего значения  $\sigma_{\text{ц}}$  за время облучения  $t_{\text{обл}}$  и даже от импульса к импульсу, вызванным вращением турбин (винтов) ЛА и вибрациями элементов конструкции в полете.

При обнаружении целей на предельных дальностях используют сумму эхо-сигналов за время  $t_{обл}$ , поэтому основными данными для характеристики целей являются данные о среднем значении  $\sigma_{ц}$  и характере флуктуаций (законе их распределения). Ориентировочные данные о величине  $\sigma_{ц}$  для основных классов СВН и диапазонов волн приведены в табл. 1.1.

Данные табл. 1.1 относятся к случаю совпадения поляризации радиоволн при излучении и приеме. Это характерно для большинства РЛС РТВ. Причем горизонтальная поляризация антенн предпочтительнее, поскольку аэродинамические цели имеют преимущественно горизонтальную ориентацию элементов конструкции.

Таблица 1.1

## ЭПР для основных классов СВН

Тип средства	Диапазон волн, см								
	сантиметровый (3...10)			дециметровый (10...100)			метровый (150...200)		
	ППС	борг	ЗПС	ППС	борг	ЗПС	ППС	борг	ЗПС
СРЭМ (УРС)	0,02... 0,03	0,07... 0,08	0,1... 0,2	0,03... 0,07	0,3... 0,8	0,2... 0,5	0,7... 2,5	0,8... 0,9	0,5... 1,0
АЛКМ(СРК)	0,1... 0,2	0,35... 0,4	0,2... 0,3	0,1...1	0,4... 1,8	0,2... 0,4	1...2	1,8... 3,0	0,4... 4,8
В-1А (СА)	10...14	50	45	14... 40	50... 100	35... 45	40... 50	~100	35... 80
В-52 (СА)	75...80	63... 70	120... 125	55... 75	53... 63	30... 120	50... 55	53... 66	27... 30
FB-111 (ТА)	8...8,5	10... 11	7... 7,5	≈ 8,5	9... 11	7,5... 8,5	8,5... 9	9... 13	8,5... 15
А-4,-5 (ТА)	7...10	6...7	15... 20	10... 20	7... 15	10... 15	14... 17	15... 29	10... 15
АДА	0,3... 0,5	0,3... 0,5							
Крейсер	1 000...15 000								
Подводная лодка в НП	40...100								

*Примечание:* ППС – из передней полусферы цели (с носа); ЗПС – из задней полусферы цели (с хвоста); НП – надводное положение.

Изрезанность диаграммы  $\sigma_{ц}(\theta_{ц})$  (рис. 1.3) и межобзорные флуктуации эхо-сигналов, вплоть до глубоких замираний, в основном проявляются на более коротких дециметровых (ДМВ) и сантиметровых (СМВ) волнах и при увеличении размеров и сложности формы ЛА возрастают. Поэтому в РЛС сантиметрового диапазона волн получить коэффициент проводки

$K_{\text{пров}} = 0,8 \dots 0,9$  цели в ЗО можно лишь за счет неоправданного увеличения потенциала РЛС, а в метровом диапазоне волн (МВ) непрерывная проводка цели ( $K_{\text{пров}} = 1$ ) сравнительно легко обеспечивается (импульсная мощность РЛС СВВ достигает  $1 \dots 3$  МВт, а РЛС МВ – сотен кВт).

Если зондирующий сигнал достаточно узкополосен и цель можно считать точечной, то изменением величины  $\sigma_{\text{ц}}$  в пределах ширины спектра сигнала можно пренебречь, но для разных участков рабочего диапазона частот РЛС зависимость  $\sigma_{\text{ц}}(f_0)$  ощутима. Так, при фиксированном радиусе  $\theta_{\text{ц}}$  на разных несущих частотах  $f_{0i}$ ,  $i = 1, 2 \dots$  значения случайной величины  $\sigma_{\text{ц}}$  можно считать независимыми, если разность частот  $\Delta f_{ik} = f_{0i} - f_{0k}$  достаточно велика:

$$\Delta f_{ik} > \frac{C}{2L_{\text{ц}}}, (L_{\text{ц}} > \lambda_i/2 - \lambda_k/2),$$

где  $L_{\text{ц}}$  – радиальный размер ЛА;

$C$  – скорость света.

Этот фактор используется в многочастотных РЛС РТВ для уменьшения вредного влияния флуктуаций  $\sigma_{\text{ц}}$ , но он же снижает точность измерения угловых координат цели в РЛС с частотным сканированием луча антенны.

Противник стремится уменьшить ЭПР своих СВН. Это достигается как сопутствующий эффект при совершенствовании аэродинамической формы ЛА, уменьшении их размеров (до единиц метров для СКР и беспилотных летательных аппаратов – БПЛА) и устранении элементов внешней подвески. При этом уменьшается видимое сечение ЛА, увеличивается доля «зеркального» отражения и уменьшается обратное (в сторону однопозиционной РЛС) рассеяние радиоволн. Пик «зеркального» обратного отражения при положении ЛА «бортом к РЛС» может быть большим, но вероятность такого ракурса цели очень мала и в целом величина  $\bar{\sigma}_{\text{ц}}$  уменьшается. Указанные эффекты сильно проявляются в сантиметровом диапазоне и практически несущественны в метровом.

Второй путь снижения ЭПР цели связан с использованием специальных покрытий элементов ЛА, в первую очередь острых кромок, либо с применением специальных мероприятий. Поглощающие материалы утяжеляют ЛА и увеличивают риск их огневого поражения. Поэтому предпочтение, видимо, будет отдаваться переизлучающим покрытиям, рассчитанным на определенные участки сантиметрового диапазона волн. Так, комплекс мероприятий по программе «Stelth» должен обеспечить снижение ЭПР самолетов СА и ТА США в несколько раз.

Наиболее полные описания ЭПР целей дают поляризационные матрицы рассеяния, которые теоретически могут быть использованы для распознавания объектов. При поляризационной селекции целей на фоне помех возможно использование несовпадения поляризации излучения и приема, вплоть до их ортогонализации. Однако это может приводить к дополнительному уменьшению ЭПР целей на 3...7 дБ.

### 1.2.2. МЕШАЮЩИЕ ОТРАЖЕНИЯ

*Мешающими* являются все отражатели-неоднородности среды распространения радиоволн, которые не являются радиолокационными целями.

Эхо-сигналы «точечных» изолированных отражателей создают *имитирующие пассивные помехи* (ИПП), которые перегружают систему обработки РЛИ; распределенные в пространстве совокупности отражателей создают *маскирующие пассивные помехи* (МПП).

Источниками МПП являются облучаемые РЛС:

участки земной поверхности;

облака гидрометеоров;

облака искусственных металлических (металлизированных) отражателей – диполей, лент либо специализированных аэрозолей;

пылевые облака, крупные птицы, насекомые, турбулентная атмосфера; искусственно ионизированные области.

Маскирующий эффект МПП определяется соотношением ЭПР цели  $\sigma_c$  и средней ЭПР  $\sigma_{\text{мп}}$  распределенного отражателя – совокупности отражателей в элементе разрушения РЛС.

Искусственные МПП создают, сбрасывая пачки дипольных отражателей с высот 5–10 км с темпом 0,5–2 пачки на 100 м пути, обеспечивающим  $\sigma_{\text{мп}} \geq 50\text{--}150 \text{ м}^2$  на маршрутах протяженностью до сотен километров или в облаках дипольных отражателей площадью до  $50 \times 300 \text{ км}^2$ . Самолеты ТА могут нести до нескольких сотен пачек дипольных отражателей, самолеты СА и РЭБ – до нескольких тысяч пачек. Современные автоматы сброса дипольных отражателей обеспечивают нарезание отражателей по длине в полете в соответствии с конкретной радиоэлектронной обстановкой. Принимаются меры для рассеивания дипольных отражателей по высоте с целью расширения спектра флуктуаций создаваемых ими МПП. Время развития облака дипольных отражателей составляет от единиц до десятков минут, время существования – от 0,5 часа до нескольких часов. Раскрытие пачек дипольных отражателей (их разлет) после сброса занимает 10...30 с, поэтому самолет постановщик помех наблюдается впереди создаваемого им облака. Однако противником создаются автоматы, позволяющие выстреливать пачки дипольных отражателей в переднюю полусферу – в этом случае их постановщик будет находиться в облаке пассивных помех (ПП).

Величину  $\sigma_{\text{мп}}$  естественного происхождения рассчитывают, исходя из объема  $V_0$  (либо площади  $S_0$ ) элементов разрешения РЛС и объемной (поверхностной) удельной отражающей способности  $\sigma^0$  источников МПП:

$$\sigma_{\text{мп}} = \begin{cases} \sigma_{\text{об}}^0 \cdot V_0, \\ \sigma_{\text{пов}}^0 \cdot S_0. \end{cases}$$

Данные о значении  $\sigma^0$  получают эмпирически, в результате обширных систематических натурных измерений на специальных РЛС в разных диапазонах волн, при различных условиях погоды, рельефа местности и т. д.

Интенсивность МПП (отражений от гидрометеоров) обычно не велика, но они обладают широким спектром флюктуаций в связи с перемещением отражателей в турбулентной атмосфере. Доплеровская селекция сигналов на фоне таких помех не эффективна, но можно использовать эффект регулярности поляризации отражений от почти сферических капель дождя, тумана.

Наиболее интенсивны и распространены МПП – отражение от земли. Воздушный противник стремится всемерно использовать такие МПП, применяя полеты на малых высотах. Значения  $\sigma_{\text{пов}}^0$  могут достигать  $10^{-2}$  и более для суши; более слабые – для льдов ( $\sigma_{\text{пов}}^0 = 10^{-3} - 10^{-4}$ ) и моря ( $\sigma_{\text{пов}}^0 = 10^{-5} - 10^{-6}$ ). Очень мощные мешающие отражения наблюдаются от гор, многоэтажных застроек городов и торосистых льдов, но эти отражатели неподвижны, поэтому спектр флюктуаций узок. Отражения от поверхности земли, как и облаков дипольных отражателей, деполаризованы вследствие хаотичности ориентации отражателей. Удельный уровень обратного отражения, как правило, растет при уменьшении длины волны.

Протяженные облака (поверхности) с большим количеством равномерно распределенных отражателей дают реализации МПП с распределением вероятности уровней  $P(\sigma_{\text{мп}})$ , обычно имеющих протяженные «хвосты» (рис. 1.4).

В ближней зоне наземных РЛС в равнинной местности, наряду с областями сплошных МПП, наблюдаются зоны множественных целеподобных и «точечных» отражений от одиночных местных предметов (МП), число которых может достигать нескольких сотен. Такая «рваная» дискретная пассивная помеха (ПП) обладает маскирующим действием, перегружая устройства съема и обработки РЛИ.

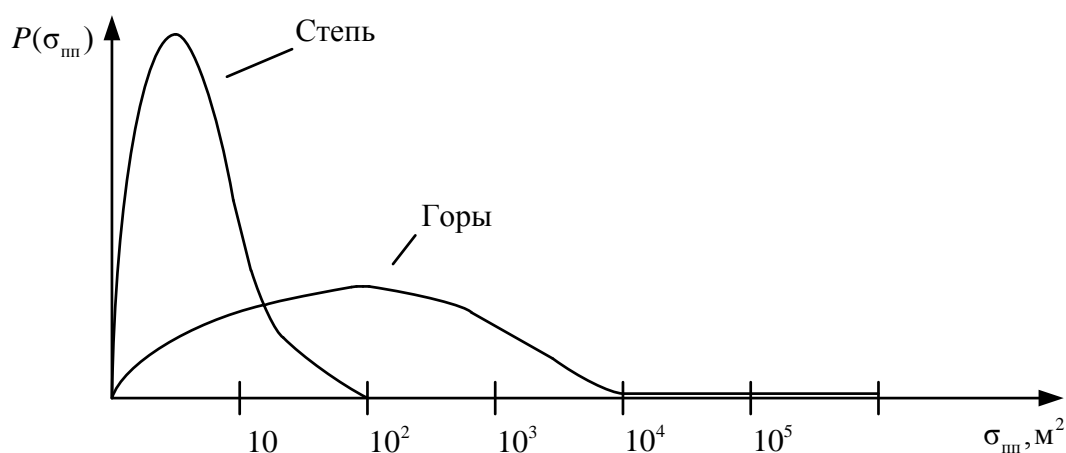


Рис. 1.4. Распределение вероятностей уровня МПП

Одиночные или групповые целеподобные ПП создаются противником преднамеренно с помощью отдельных выбросов пачек ДО, или запуска имитирующих ракет, либо БПЛА. Имитирующие ПП создаются и с помощью запуска по ветру лёгких шаров (до сотен и тысяч штук), летящих на высотах  $h = 1 \dots 5$  км. Длины их трасс могут составлять тысячи км.

ЭПР имитирующих целей может составлять от долей до десятков квадратных метров. Малые и малоскоростные отвлекающие объекты, если их не распознавать, серьезно воздействуют на систему ПВО. Уничтожение их проблематично из-за большого количества, слабой радиолокационной и визуальной наблюдаемости и малых скоростей полета.

Необходимость селекции целей на фоне маскирующих и имитирующих ПП учитывается при создании и совершенствовании образцов СРЛ РТВ ВВС.

### 1.2.3. ВНЕШНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

РТВ образуют многопозиционную радиолокационную систему, но каждая РЛС работает индивидуально, используя для получения РЛИ только собственное излучение. Поэтому для каждой РЛС любые посторонние излучения, воздействующие на приемный тракт, создают помехи эхолокации, которые принято называть активными помехами (АП). Источниками АП для РЛС РТВ могут быть:

авиационные станции АП, устанавливаемые на борту постановщиков активных помех (ПАП) – ударных СВН или самолетов, вертолетов, БПЛА, с целью радиоэлектронной борьбы (РЭБ);

станции АП корабельного и наземного базирования;

забрасываемые малогабаритные передатчики помех одноразового использования (ППОИ);

свои РЭС, в т. ч. РЛС РТВ, излучающие в соответствующих частотных диапазонах в пределах радиовидимости;  
 природные (естественные) источники электромагнитных излучений;  
 области ядерных взрывов.

По характеру воздействия на РЛС АП могут быть маскирующими (МАП) и имитирующими (ИАП). Основным видом преднамеренных помех являются маскирующие шумовые помехи. Взаимные помехи от других РЭС для РЛС РТВ обычно являются импульсными, т. е. имитирующими. По степени концентрации спектра мощности по частоте и направленности излучения АП делятся на *прицельные и заградительные*.

Тенденция развития средств постановки помех показывает, что следует ожидать применения заградительных маскирующих АП с большой шириной спектра: на метровых волнах – до 50–100 МГц; на дециметровых – до 100–300 МГц; на сантиметровых – до 500–1000 МГц. Прицельные по частоте АП создаются с шириной спектра от 2–3 до 10–15 МГц, что обеспечивает рост спектральной плотности мощности АП. Технически возможна дальнейшая концентрация спектра МАП вплоть до сверхприцельности – точного соответствия спектра ответной непрерывной шумовой помехи спектру зондирующего сигнала РЛС даже при быстрой перестройке частоты.

Скользящие по частоте МАП обеспечивают сочетание прицельного и заградительного режимов. При этом помеха по характеру может изменяться от маскирующей до хаотической импульсной.

Для создания МАП обычно используют не прямошумовую помеху, обладающую максимальным маскирующим эффектом, а частотно-моделированное шумом излучение (ЧМШ-помеху). Это позволяет избежать амплитудной модуляции, снижающей среднюю мощность генераторных приборов. На приемник РЛС обычно воздействует лишь часть спектра ЧМШ-помехи, в результате она «нормализуется» и становится практически гауссовой, т. е. прямошумовой.

Воздействие МАП на РЛС определяется спектрально-пространственной плотностью потока мощности  $J_{\Pi}$  (Вт/Гц·м<sup>2</sup>), создаваемого ПАП в точке стояния РЛС. Эта величина является сложной функцией двух угловых координат  $\{\beta, \varepsilon\}$ , частоты  $f$  и времени  $t$ . Она может быть рассчитана, если известны расположение ПАП и параметры их излучений. Степень подавления приемного радиолокационного канала определяется суммарным помеховым фоном, который является суммой спектральных плотностей мощности помех от разных ПАП (суммирование можно использовать ввиду статической независимости и гауссовости МАП от разных ПАП) с весами, соответствующими уровням приема диаграмм направленности антенн (ДНА) РЛС в направлениях на ПАП.

В качестве типовых расчетных параметров ПАП можно принимать дальность  $D = 200$  км и высоту  $H = 10$  км. Для этих расчетных значений

определяют суммарную спектральную плотность мощности излучения  $N_{\text{пэ}}$  «эквивалентного» ПАП, которым при упрощенных расчетах заменяют совокупность всех ПАП, воздействующих по боковым лепесткам ДНА РЛС. В сложной воздушной и помеховой обстановке возможны значения  $N_{\text{пэ}} \approx (1 - 3) \times 10^{-3}$  Вт/Гц.

В процессе боевой работы РЛС необходимы знания конкретного распределения  $J_{\text{п}}(f, \beta, \varepsilon, t)$ , что позволяет использовать неравномерность частотного спектра АП для ослабления их воздействия на РЛС. С этой целью РЛС РТВ оснащаются соответствующими средствами разведки, автоматического управления режимами работы и адаптивного ослабления помех.

Взаимные помехи от своих РЭС при наземном базировании сводят к допустимому минимуму за счет выполнения норм частотно-территориального разнеса и других мер по обеспечению электромагнитной совместимости РЭС при их разработке и эксплуатации, а также использования аппаратуры помехозащиты.

Телевизионные помехи действуют в основном в метровом диапазоне, их ослабляют специальными каналами защиты. В горах и предгорьях возможна специфическая активно-пассивная маскирующая взаимная помеха РЛС, работающих в одном диапазоне, за счет приема мощных переотраженных зондирующих сигналов соседней РЛС.

Электромагнитное излучение атмосферных (грозовых) разрядов и областей ядерных взрывов кратковременно, и для РЛС РТВ важно не помеховое, а поражающее действие данных факторов. В метровом диапазоне ощутимую шумовую помеху создает излучение Солнца, если оно в фиксированный момент располагается под малыми углами места (от 0 до 17°). Это явление может снижать дальность РЛО целей на 5–10 % в азимутальном секторе от 20 до 40°.

#### 1.2.4. СРЕДА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Основными эффектами среды распространения радиоволн, которые следует учитывать в наземных РЛС РТВ, являются:

непрямолинейность распространения (искривление) лучей радиоволн в вертикальной плоскости;

экранирующий эффект поверхности «сферической» Земли и её неоднородности (элементы рельефа, сооружения, растительность);

переотражение (рассеяние) радиоволн земной поверхностью;

затухание радиоволн в атмосфере.

Искривление (рефракция) лучей определяется градиентом  $\text{grad } n$  коэффициента преломления атмосферы. При нормальной положительной рефракции  $\text{grad } n < 0$  и луч отклоняется к земле, а дальность прямой видимости  $r_{\text{пр}}$  несколько увеличивается. Это полезно для радиолокационной



системы, но вызывает систематические ошибки измерения угла места целей, а следовательно, и высоты  $H_{ц}$  (рис. 1.5).

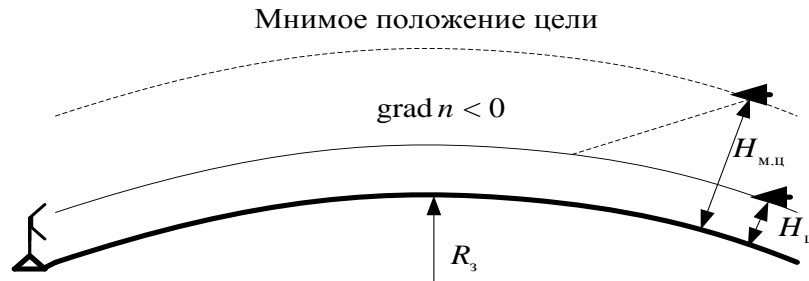


Рис. 1.5. Искривление луча радиоволны

Необходимые поправки при расчете  $r_{пр}$  и  $H_{ц}$  вводятся за счет использования эквивалентного радиуса Земли  $R_{зэ}$ , что приводит к эффекту как бы «спрямления» лучей (рис. 1.6).

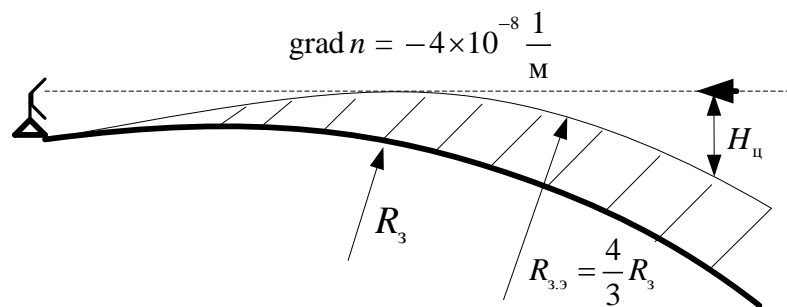


Рис. 1.6. «Спрямяние» луча радиоволны при нормальной рефракции

Обычно пользуются значением  $R_{зэ} \approx \frac{4}{3} R_з = 8\,500$  км соответствующим усредненной типовой («стандартной») атмосфере при  $\text{grad } n = 4 \times 10^{-8} \text{ 1/м}$ .

При отклонении  $\text{grad } n$  от указанного номинала необходимо изменить расчетное значение  $R_{зэ}$ , однако на практике подразделения РТВ не располагают данными о высотных профилях температуры и влажности атмосферы. Косвенные данные о реальной рефракции на конкретной позиции можно получить по виду радиолокационной карты местности, т. е. энергетического «рельефа» наблюдаемых отражений.

Если  $\text{grad } n = -15,7 \times 10^{-8} \text{ 1/м}$ , рефракция критическая (рис. 1.7), луч огибает «сферическую» Землю.