

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ВОЕННАЯ КАФЕДРА



Дисциплина «Военно-специальная подготовка»
(наименование дисциплины)

Военная специальность 530200 «Математическое и программное
(наименование специальности)
обеспечение функционирования автоматизированных систем»

Тема лекции № 6.07 «Введение в радиолокацию»
(номер и наименование лекции)

Введение

Решение огромного количества боевых задач с заданной эффективностью невозможно без использования радиолокационной техники, физические принципы действия которой основаны на рассеянии радиоволн объектами, метеообразованиями и другими неоднородностями (далее объектами), отличающимися своими электрическими характеристиками (электрической проницаемостью ϵ , диэлектрической проницаемостью μ и электропроводностью σ). Интенсивность и другие неэнергетические характеристики рассеяния или отражения радиоволн (интенсивность вторичного поля) зависят от степени отличия характеристик облучаемых объектов и среды распространения радиоволн (РРВ), от формы объектов, соотношения их размеров l и длины волны λ и от поляризации радиоволн. Именно эти характеристики интересны с военной точки зрения.

Поэтому рассмотрение основных понятий, используемых в радиолокации, является весьма актуальным.

Для достижения поставленных целей рассмотрим следующие вопросы:

1. Физические основы радиолокации.
2. Системы координат, используемые в радиолокации.
3. Основные методы радиолокации.

Данный учебный материал можно найти в следующих **источниках**:

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004.
2. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М.: Советское радио, 1975.

Всего по радиолокации будет прочитано 5 лекций и проведена контрольная работа.

1. Физические основы радиолокации

Радиолокацией называется обнаружение объектов (целей) и определение их пространственных координат и параметров движения с помощью радиотехнических средств и методов. Этот процесс называется *радиолокационным наблюдением*, а устройства такого назначения — *радиолокационными станциями (РЛС) или радиолокаторами*.

В настоящее время радиолокация широко применяется для управления объектами и, в частности, для навигации, т. е. для ориентирования самолетов, морских и космических кораблей. Устройства радиолокации, радиоуправления и радионавигации в совокупности образуют радиотехнические системы (РТС).

К радиолокационным целям (или просто целям) относятся: пилотируемые и беспилотные летательные аппараты (ЛА), морские и речные корабли, различные наземные и надводные объекты, естественные и искусственные космические тела, атмосферные образования и др. объекты.

Радиотехнические измерения дальности называются *радиодальномерией*, а угловых координат — *радиопеленгацией*.

Измерению координат и скорости целей предшествует их обнаружение, разрешение и опознавание. Под *разрешением целей* понимают определение количества целей в группе, их протяженности, класса и т. д. *Опознавание цели* означает установление ее существенных признаков, в частности, государственной принадлежности.

Совокупность сведений, получаемых радиолокационными средствами, называется *радиолокационной информацией*. Последняя передается на командные пункты, счетно-решающие приборы и исполнительные устройства.

Из всех перечисленных функций радиолокации основной является радиолокационное наблюдение (обнаружение целей, измерение координат и параметров движения), а различение объектов, опознавание их и передача полученной радиолокационной информации по назначению относятся к дополнительным функциям РЛС.

Как известно, электромагнитные волны (ЭМВ) распространяются в однородной среде прямолинейно с постоянной скоростью

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a}}, \quad (1.1)$$

где ϵ_a , μ_a — абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды РРВ (для свободного пространства $\epsilon_a = \epsilon_0 = 1/36\pi \cdot 10^9$ Ф/м; $\mu_a = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м и соответственно $v = c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

Постоянство вектора скорости распространения ЭМВ в однородной среде, т. е. его модуля и направления, служит физической основой радиолокационных измерений.

Действительно, благодаря этому дальность D и время распространения радиоволны (РВ) связаны прямой пропорциональностью, и если измерено время

прохождения волны t_0 между целью и РЛС, то становится известным и расстояние между ними:

$$D = ct_0. \quad (1.2)$$

Цель вносит неоднородность в свободное пространство, так как ее параметры ε_a и μ_a отличаются соответственно от ε_0 и μ_0 , чем нарушается постоянство вектора скорости РРВ. В результате объект преобразует радиоизлучение: часть энергии переотражается, часть – поглощается объектом, переходя в тепло, а другая часть при радиопрозрачности объекта – преломляется, изменяя направление РРВ. С точки зрения радиолокации интересен первый случай, когда цель становится источником вторичного излучения. По времени запаздывания отраженного сигнала относительно излученного

$$t_0 = 2D/c \quad (1.3)$$

определяем наклонную дальность цели

$$D = ct_0/2. \quad (1.4)$$

Возможно и такое решение: на цели, если она «своя», а не противника, устанавливается приемопередатчик, называемый *ответчиком*, или *ретранслятором*, который принимает зондирующий сигнал от РЛС и усиливает его для запуска передатчика. Ответный сигнал принимается на РЛС, и дальность цели определяется по формуле

$$D = c(t_0 - t_{ome})/2, \quad (1.5)$$

где t_0 — запаздывание ответного сигнала относительно зондирующего; t_{ome} — заранее известное время задержки сигнала в цепях ответчика.

Величина t_0 должна измеряться безынерционными электронными часами, так как время запаздывания радиолокационных сигналов очень мало (от микро- до миллисекунд).

Например, РВ, отраженные от цели, расположенной на дальности $D=150$ м от радиолокатора, запаздывают на 1 мкс, и каждому километру дальности до цели соответствует задержка РВ на время $1000/150 = 6,7$ мкс.

Допустим, радиолокационная антенна имеет вид прямолинейной решетки из p вибраторов, отстоящих один от другого на расстоянии d (рис. 1.1, а). Значительная удаленность цели от РЛС позволяет считать, что лучи, идущие от цели к вибраторам, направлены параллельно под углом φ к антенной решетке, а амплитуды электрических движущих сил (ЭДС), наводимых в отдельных вибраторах, равны между собой: $\square_{1m} = \square_{2m} = \square_{3m} = \dots = \square_{pm}$.

В этих условиях ЭДС соседних вибраторов отличаются только сдвигом по фазе ψ , вызванным разностью хода волн $d\cos\varphi$. Так как на каждую единицу длины данная бегущая волна отстает по фазе на угол $2\pi/\lambda$, то

$$\psi = 2\pi(d\cos\varphi)/\lambda. \quad (1.6)$$

Сложение векторов ЭДС вибраторов $\square_{1m}, \square_{2m}, \square_{3m}, \dots, \square_{pm}$ при различных углах $\psi = \psi'$ (рис. 1.1, б) и $\psi = \psi''$ (рис. 1.1, в) дает различную результирующую ЭДС $\square_m$. Как видно из рисунка 1.1 и формулы (1.6), с изменением φ изменяется фаза ψ , а следовательно, и амплитуда результирующей ЭДС в приемной антенне.

Отсюда вытекает возможность пеленгации цели по амплитудным и фазовым характеристикам направленности антенны.

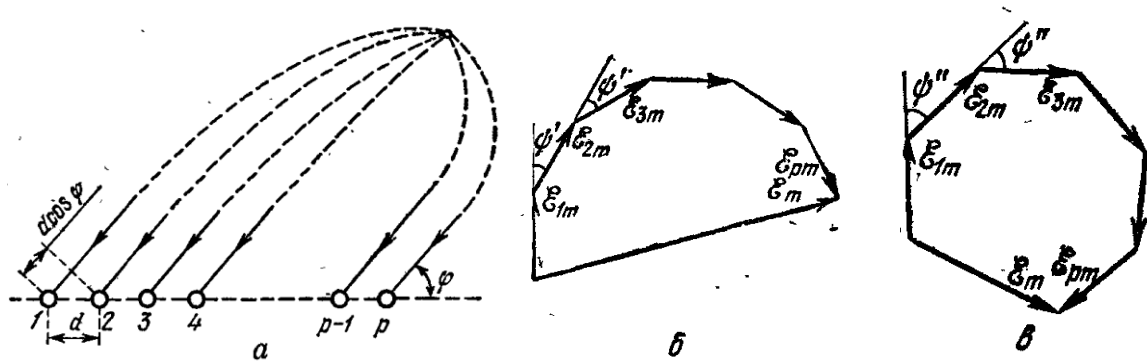


Рис. 1.1. Прием РВ линейной вибраторной антенной решеткой (а) и векторные диаграммы ЭДС решетки при различных направлениях облучения (б, в)

Как уже говорилось, первопричиной образования таких характеристик явилось различие в запаздывании волн, принимаемых отдельными элементами антенной решетки. Поэтому не только радиодальнометрия, но и радиопеленгация основана на постоянстве скорости и направления РРВ.

Радиальную и угловую скорости цели можно найти вычислением скорости приращения дальности и углов во времени. Обычно предпочитают более простую и точную операцию — непосредственное измерение так называемого доплеровского сдвига несущей частоты сигнала f_0 , вызванного движением цели. Доплеровский сдвиг частоты F_d связан с радиальной скоростью движения объекта V_r соотношением

$$F_d = -\left(\frac{2V_r}{c}\right)f_0 = -\frac{2V_r}{\lambda_0}, \quad (1.7)$$

где λ_0 — длина волны излучаемого сигнала; V_r — радиальная скорость относительного движения цели.

Если цель приближается к РЛС или удаляется от нее, то отраженный сигнал появляется в РЛС соответственно раньше или позже, чем при неподвижной цели. За счет этого фаза принимаемой волны имеет другие значения, что равнозначно приращению частоты радиосигнала. Измерив полученное (доплеровское) приращение частоты, можно (опять же благодаря постоянству скорости РРВ) определить радиальную скорость цели.

Подобно тому, как разность времени запаздывания сигнала в элементах антенны определяется угловыми координатами цели, разность доплеровских сдвигов частот в тех же (обычно крайних) элементах антенной решетки определяется скоростью изменения углового положения цели.

Таким образом, физической основой радиолокационных измерений дальности, угловых координат, радиальной и угловой скоростей цели является постоянство направления и скорости РРВ в однородной среде.

2. Системы координат, используемые в радиолокации

Местоположение объекта (цели) характеризуется положением центра объекта (его центра масс) в некоторой опорной системе координат (СК). При радиолокационном определении местоположения наиболее часто применяют местную горизонтальную сферическую СК, начало которой находится в точке размещения антенны РЛС. Если цель точечная, то ее положение в пространстве полностью определяется тремя координатами (рис. 1.2).

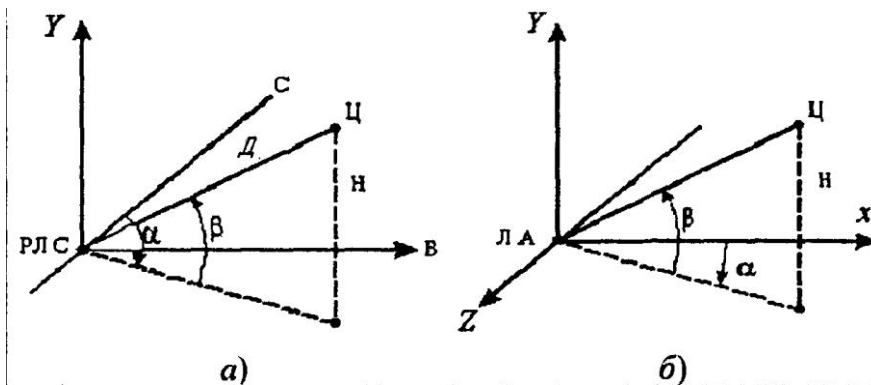


Рис. 1.2. Местные сферические СК:

а – при расположении РЛС на поверхности Земли; б – при расположении РЛС на борту ЛА

В наземной РЛС одна из осей координатной системы совпадает с северным направлением меридиана, проходящего через позицию антенны РЛС, поэтому местоположение цели (Ц) находится по результатам измерения наклонной дальности D , азимута α и угла места β (рис. 1.2, а). При этом СК неподвижна относительно земной поверхности.

Наклонной дальностью D называется расстояние по прямой от РЛС до цели..

Азимут цели α — это угол между вертикальной плоскостью, проходящей через цель, и исходным направлением отсчета. Азимут называют *истинным пеленгом цели*, если отсчет производится от северного меридиана, или *курсовым углом (КУ)*, если направлением отсчета служит продольная ось самолета или диаметральной плоскостью корабля.

Угол места β — угол между направлением на цель и его проекцией на горизонтальную плоскость.

Если РЛС располагается на ЛА и ось X координатной системы совмещается с продольной осью ЛА, а ось Z — с направлением правого крыла (рис. 1.2, б), то для определения местоположения цели измеряют наклонную дальность D , курсовой угол — азимут цели α и угла места β . Такая связанная с ЛА система координат перемещается относительно земной поверхности со скоростью, равной скорости полета ЛА, и поворачивается относительно Земли при его эволюциях.

Наряду со сферической СК в радиолокации применяют цилиндрическую систему с координатами: горизонтальная дальность D_z , азимут α и высота H (рис. 1.3).

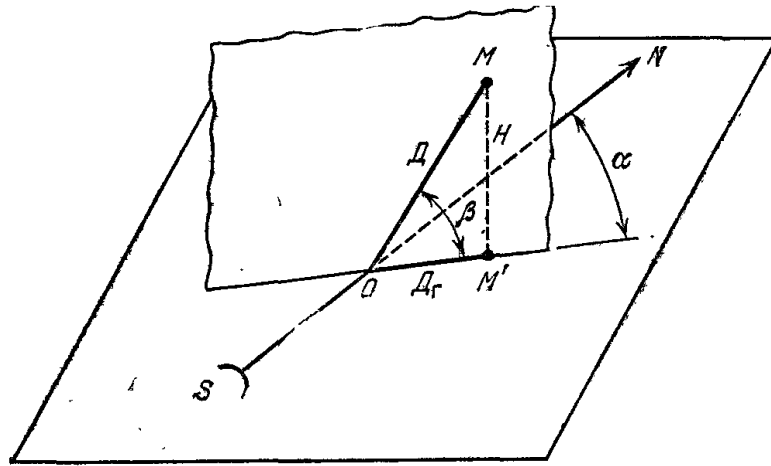


Рис. 1.3. Цилиндрическая СК

Горизонтальная дальность $D_z = OM'$ является проекцией линии наклонной дальности OM на горизонтальную плоскость. Высота цели H равна длине перпендикуляра, опущенного из M на горизонтальную плоскость, т. е. $H = MM'$. Очевидно, что

$$D_z = D \cos \beta; \quad H = D \sin \beta; \quad D = \sqrt{D_z^2 + H^2}. \quad (1.8)$$

При определении местоположения применяют как местные СК (рис. 1.2, 1.3), так и глобальные системы. Местные СК используют при дальностях D , не превышающих несколько сотен километров (в зоне прямой видимости), а глобальные — при большей дальности. Глобальные СК жестко связаны с Землей и охватывают всю или значительную часть земной поверхности. Наиболее распространенными глобальными СК являются географическая (геодезическая) и геоцентрическая (геосферическая) СК.

В географической (геодезической) СК $O_r X_r Y_r$ (рис. 1.4) за поверхность Земли принимают поверхность эллипсоида вращения. В качестве такого эллипсоида в нашей стране Постановлением Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 г. принят эллипсоид Красовского (по имени члена-корреспондента Академии наук СССР Ф.Н. Красовского), малая полуось которого составляет 6 356 863 м, а большая (экваториальный радиус Земли) — 6 378 245 м. В ряде других стран мира за модель Земли принят эллипсоид Хейфорда-Кларка, отличие размеров которого от эллипсоида Красовского не превышает сотен метров.

Положение точки C на поверхности эллипсоида вращения определяется геодезическими координатами — геодезической широтой φ_r и геодезической долготой λ_r .

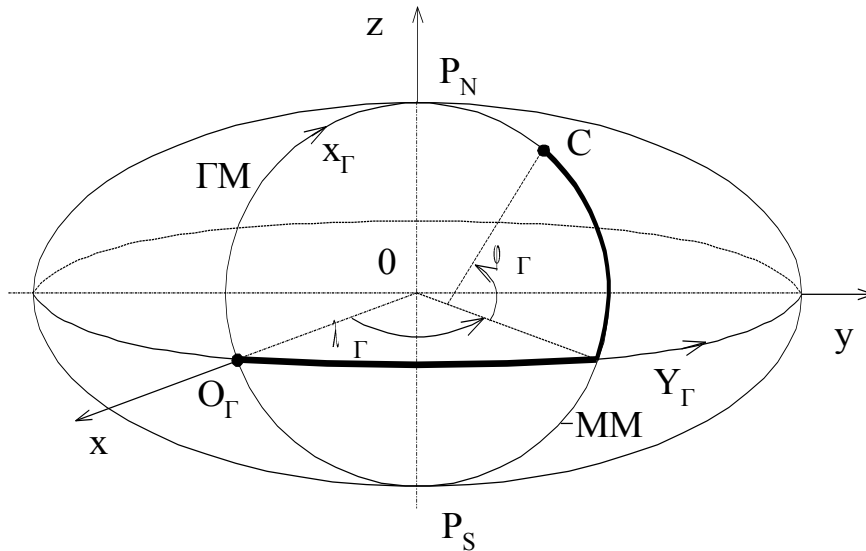


Рис. 1.4. Географическая (геодезическая) система координат

Геодезической широтой точки называется угол между плоскостью экватора и нормалью к поверхности эллипсоида в этой точке. Следует заметить, что нормаль пересекает плоскость экватора в общем случае не в центре. Широта отсчитывается от плоскости экватора к северному (P_N) и южному (P_S) полюсам от 0 до $\pm 90^\circ$ соответственно. На рис. 1.4 буквами O , x , y , z обозначена основная система координат, связанная с центром Земли и вращающаяся вместе с ней.

Геодезической долготой называют двугранный угол, заключенный между плоскостями Гринвичского (начального) меридиана (ГМ) и местного меридиана (ММ) точки C , проходящего через проекцию объекта на земную поверхность. Долгота измеряется либо центральным углом в плоскости экватора, либо дугой экватора в пределах от 0 до 360° . Долгота, отсчитываемая в восточном направлении, имеет знак плюс, а в западном – минус.

Хотя поверхность эллипсоида имеет строгое математическое описание, но формулы, описывающие решение задач радиолокации, оказываются столь сложными, что практически могут быть реализованы лишь с помощью высокоскоростных цифровых вычислительных машин (ЦВМ), обладающих большим объемом памяти. Поэтому модель Земли упрощают, представляя ее в виде шара радиусом $6\,371\,110$ м.

СК $O_{гц}X_{гц}Y_{гц}$, в которой Земля представляется в виде шара, называется геоцентрической (геосферической) (рис. 1.5). Отсчет геоцентрической широты $\varphi_г$ производится между плоскостью экватора и направлением радиус-вектора (направлением от объекта к центру Земли). Способ отсчета геоцентрической долготы (λ) совпадает со способом отсчета географической долготы.

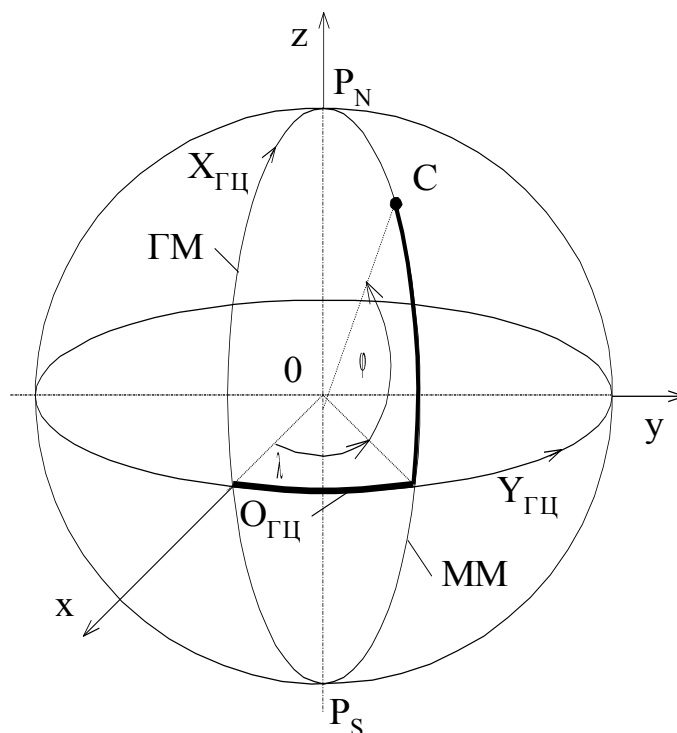


Рис. 1.5. Геоцентрическая (геосферическая) система координат

Таким образом, в современной радиолокации используются местные и глобальные СК. Местные СК подразделяются на цилиндрические и сферические СК, глобальные СК – на географические и геосферические.

3. Основные методы радиолокации

3.1. Методы формирования радиолокационных сигналов

Зондирующее излучение не является сигналом, так как ЭМВ становятся носителем информации о цели, т. е. *радиолокационным сигналом*, лишь после взаимодействия с целью. При этом цель играет активную или пассивную роль. Отсюда происходит следующая классификация методов радиолокации по способу образования радиолокационных сигналов.

При *активной радиолокации* (рис. 1.6, а) РВ, излучаемые антенной передающего устройства РЛС, направляются на цель. Приемное устройство той же РЛС принимает отраженные волны и преобразует их так, что выходное устройство с помощью опорных сигналов (см. пунктирную стрелку) извлекает содержащуюся в отраженном сигнале информацию: наличие цели, ее дальность, направление, скорость и др. Этот метод радиолокации называется *активным* потому, что предусматривает облучение цели антенной РЛС. Опорные сигналы являются необходимым элементом, обеспечивающим радиолокационные измерения, задаются прямой излучаемой волной и несут информацию о зондирующем излучении (несущей частоте, фазе, времени появления, об исходном направлении луча антенны и др.).

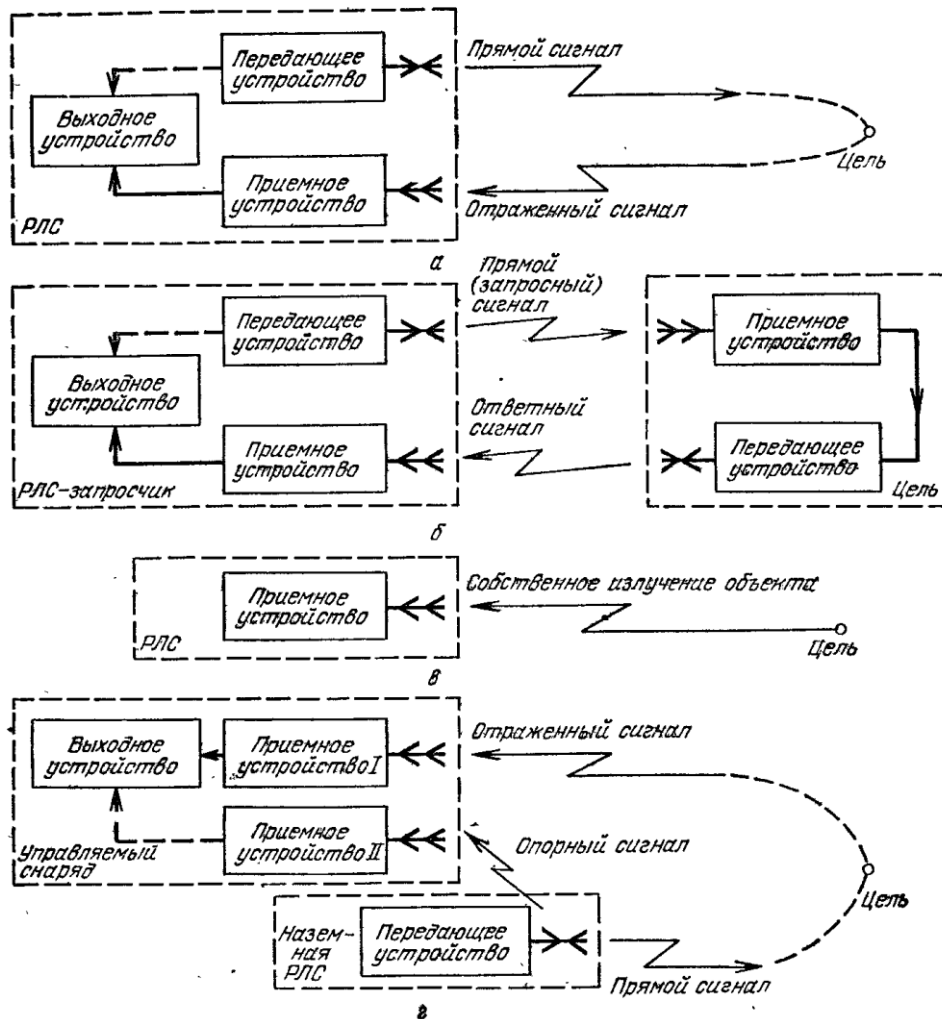


Рис. 1.6. Упрощенные схемы формирования радиолокационных сигналов:
а – при активной локации с пассивным ответом; б – при активной локации с активным ответом; в – при пассивной локации; г – при полуактивной локации

При активной радиолокации с активным ответом (рис. 1.6, б) предполагается наличие на объекте ответчика (ретранслятора), который состоит из приемного устройства, предназначенного для приема и усиления прямого сигнала, поступающего от РЛС – запросчика, и передающего устройства — для создания ответного сигнала (переизлучения).

При пассивной радиолокации сама цель является источником электромагнитного излучения, а РЛС выполняет функции приемного устройства, предназначенного для определения направления на этот источник (рис. 1.6, в). Собственное излучение создается нагретыми частями объекта, ионизированной атмосферой, окружающей объект, и, наконец, радиопередающим устройством, которое может оказаться на данном объекте.

Разнесенная радиолокационная система — разновидность радиолокации по пассивным целям. Ее характерная черта: передающее и приемное устройства разнесены на значительное расстояние. На рис. 1.6, г показана функциональная схема разнесенной системы активной радиолокации, в которой передающее

устройство принадлежит наземной станции, а приемные устройства — управляемому снаряду. Одно из них (I) предназначено для приема отраженных от цели сигналов, а другое (II) — для приема от передатчика опорных сигналов. Выходное устройство, используя эти сигналы, вырабатывает команды наведения снаряда на цель.

Возможна *разнесенная система пассивной радиолокации*, где цель не облучается со стороны РЛС, а наоборот, сама излучает волны с помощью имеющегося на ней специального передатчика — маяка. РЛС при этом только принимает и обрабатывает эти сигналы. Как видно, в обоих вариантах системы та ее часть, где производятся радиолокационные измерения, в облучении цели не участвует. Поэтому разнесенную систему относят к *полуактивной радиолокации*.

Активная радиолокация в отличие от пассивной позволяет определять все координаты цели (не только направление на нее). Преимущество пассивной системы — скрытый характер локации (со стороны РЛС нет излучения).

Полуактивную радиолокацию целесообразно применять в РЛС управления ЛА, где возможность уменьшить вес и габариты бортовой аппаратуры за счет исключения из нее передающей части РЛС особенно важна. Передатчик вместо этого устанавливают на пункте управления.

При активной радиолокации с активным ответом запросный и ответный сигналы кодируются, чтобы по коду можно было определить государственную принадлежность цели («свой — чужой») и получить дополнительную информацию. Такой метод радиолокации весьма эффективен и как средство навигации. Например, если запросный сигнал посылается с самолета или морского корабля, а ответчиком служит наземный передатчик — радиомаяк, то последний служит хорошим навигационным ориентиром для штурмана корабля или самолета. Третье важное преимущество систем с активным ответом — выигрыш в дальности действия, обусловленный значительно большей мощностью ответного сигнала по сравнению с отраженным от цели. Однако ответную аппаратуру можно установить только на «своем» объекте. Поэтому наибольшее применение получила активная радиолокация по пассивным целям (рис. 1.6, а), которую для краткости будем называть активной.

Таким образом, по принципам образования радиолокационных сигналов методы радиолокации разделяются на активные, полуактивные и пассивные. На практике часто их совмещают при проектировании радиолокационных систем.

3.2. Методы определения местоположения объектов

Общность физических основ радиодальнометрии и радиопеленгации находит выражение еще в том, что местоположение цели можно установить не только по ее дальности и углам, измеренным из одной точки O (рис. 1.3), но и путем измерения дальности или углов из разнесенных опорных точек O_1 и O_2, O_3

(рис. 1.7). Наибольшее применение получили дальномерный, разностно-дальномерный, угломерный (пеленгационный) и дальномерно-угломерный (комбинированный) методы определения местоположения целей.

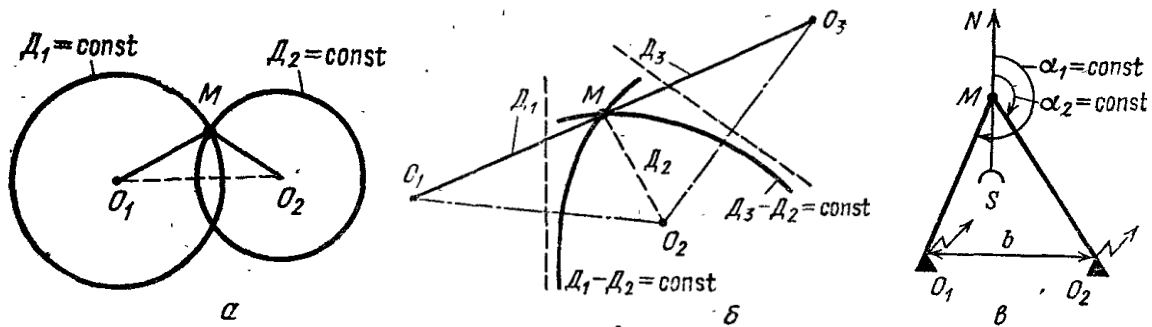


Рис. 1.7. Методы определения местоположения объектов:
а – дальномерный; б – разностно-дальномерный; в – пеленгационный (угломерный)

В радиолокации для определения местоположения цели (объекта) чаще всего применяют позиционный метод, основанный на использовании поверхностей или линий положения для определения места объекта в пространстве или на поверхности Земли. Поверхность положения представляет собой геометрическое место точек в пространстве, отвечающих условию постоянства параметра (измеряемой координаты относительно опорного пункта (дальности, угла и т.п.)). Местоположение ЛА в пространстве находится как точка пересечения трех поверхностей положения (ПП). Пересечение двух поверхностей положения дает линию положения (ЛП), которая является геометрическим местом точек с постоянными значениями двух параметров. Чтобы определить точку в пространстве, требуется пересечение трех поверхностей положения или линии и поверхности положения. В случае нахождения цели и опорных пунктов в одной плоскости достаточно двух ЛП (определения двух координат цели, которые измеряются двумя РЛУ) (рис. 1.7).

Дальномерный метод заключается в определении местоположения цели M (рис. 1.7, а) измерением расстояний между целью и опорными пунктами O_1, O_2 . Каждая поверхность положения представляет собой сферу с центром в опорном пункте и радиусом, равным дальности. Так как точки M, O_1, O_2 находятся в одной плоскости, то поверхности положения переходят в окружности радиусами $O_1M = D_1$ и $O_2M = D_2$ с точкой пересечения на цели M . Имеется еще одна точка пересечения окружностей, но неоднозначность измерений можно исключить.

Разностно-дальномерный метод (рис. 1.7, б) требует наличия на плоскости двух пар опорных пунктов O_1, O_2 и O_2, O_3 . Один из них обычно общий (O_2). Каждая пара станций используется для получения ЛП в виде гипербол с фокусами в опорных пунктах. Эти линии строятся как геометрические места точек с постоянной разностью расстояний: $D_1 - D_2 = \text{const}$ от O_1 и O_2 ; $D_3 - D_2 = \text{const}$ от O_2 и O_3 . Точка пересечения гипербол совпадает с целью M .

Угломерный (пеленгационный) метод основан на использовании направленных свойств антенн. Этот метод реализуется посредством радиопеленгатора, установленного на объекте M , и двух радиомаяков, расположенных в опорных пунктах O_1 и O_2 (рис. 1.7, в) с базой b .

Радиопеленгатор представляет собой радиоприемное устройство с направленной антенной, а радиомаяк — передающее устройство с ненаправленной антенной. Пеленгатор измеряет азимуты α_1 маяка O_1 и α_2 маяка O_2 , и так как ЛП с постоянными пеленгами ($\alpha_1 = \text{const}$, $\alpha_2 = \text{const}$) представляют собой прямые, проходящие под углами α_1 , α_2 к направлению юг — север, то они имеют одну точку пересечения, которая является искомой, т. е. совпадает с целью M .

Дальномерно-угломерный метод (рис. 1.2, 1.3, 1.8) требует применения только одной станции, содержащей радиодальномер и радиопеленгатор. Из точки стояния станции O дальномер определяет наклонную дальность цели $OM = D$, а пеленгатор устанавливает направление на цель, т. е. ее азимут α и угол места β . Цель M находится на пересечении поверхности положения дальномера в виде шара радиуса $OM = D$ и ЛП пеленгатора — в виде прямой с угловыми координатами α и β , проходящей через точку O . Этот метод наиболее характерен для радиолокации, а остальные методы — для радионавигации. Однако и в радиолокации местоположение цели определяют иногда из двух и более точек. Например, если обычная РЛС производит пеленгацию с большими ошибками, то прибегают к дальномерному методу, а если дальномерную часть РЛС нельзя использовать из-за сильных помех или вследствие применения пассивной радиолокации, то прибегают к пеленгационному методу.

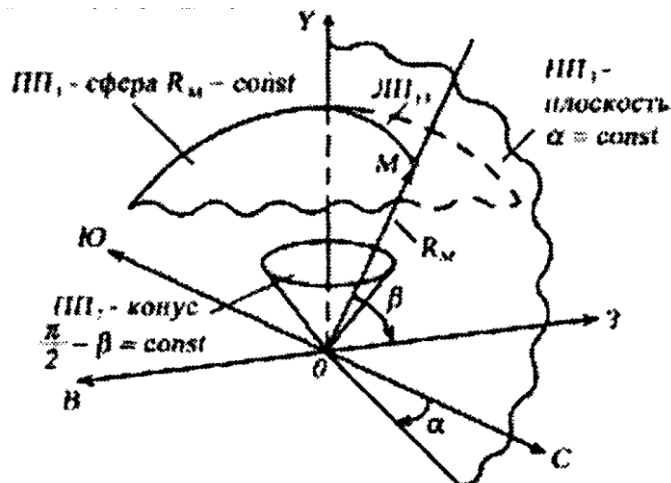


Рис. 1.8. ПП при определении местоположения объекта позиционным (дальномерно-пеленгационным) методом

Таким образом, в радиолокации для определения местоположения объекта применяют позиционные методы, основанные на использовании ПП или ЛП. Выбор метода определяет количество РЛУ, входящих в систему.

Заключение

1. Физической основой радиолокационных измерений дальности, угловых координат, радиальной и угловой скоростей цели является постоянство направления и скорости РРВ в однородной среде.

2. В современной радиолокации используются местные и глобальные СК. Местные СК подразделяются на цилиндрические и сферические СК, глобальные СК – на географические и геосферические.

3. По принципам образования радиолокационных сигналов методы радиолокации разделяются на активные, полуактивные и пассивные. На практике часто их совмещают при проектировании радиолокационных систем.

4. В радиолокации для определения местоположения объекта применяют позиционные методы, основанные на использовании ПП или ЛП. Выбор метода определяет количество РЛУ, входящих в систему.

На самоподготовке необходимо подготовиться к контрольной работе по следующим вопросам:

1. Принцип измерения дальности в радиолокации.
2. Принцип пеленгации в радиолокации.
3. Принцип измерения скорости в радиолокации.
4. Основные элементы сферической СК, используемой в радиолокации.
5. Основные элементы цилиндрической СК, используемой в радиолокации.
6. Основные элементы географической СК.
7. Основные элементы геоцентрической СК.
8. Сущность активных методов формирования радиолокационного сигнала.
9. Сущность полуактивного и пассивного методов формирования радиолокационного сигнала.
10. Сущность дальномерного и разностно-дальномерного методов определения местоположения объекта.
11. Сущность угломерного и дальномерно-угломерного методов определения местоположения объекта.

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ВОЕННАЯ КАФЕДРА



Дисциплина «Военно-специальная подготовка»
(наименование дисциплины)

Военная специальность 530200 «Математическое и программное
(наименование специальности)
обеспечение функционирования автоматизированных систем»

Тема лекции № 6.08 «Характеристики радиолокационных станций»
(номер и наименование лекции)

Введение

Эффективность и качество решения боевых задач с использованием радиолокационной техники непосредственно зависит от количественных характеристик РЛС. Такими характеристиками являются тактические и технические параметры, которые определяют возможности РЛС по выполнению своего назначения и средства, которыми это достигается. Поэтому рассмотрение сущности основных характеристик РЛС является весьма актуальным.

Для достижения поставленных целей рассмотрим следующие вопросы:

1. Тактические показатели радиолокационных станций.
2. Технические показатели радиолокационных станций.

Данный учебный материал можно найти в следующих **источниках**:

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004.
2. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М.: Советское радио, 1975.

Всего по радиолокации будет прочитано 5 лекций и проведена контрольная работа.

1. Тактические показатели радиолокационных станций

1.1. Зона обзора радиолокационных станций

Тактические показатели определяют возможности использования РЛС по назначению. К тактическим данным РЛС относятся зона обзора, разрешающая способность, точность радиолокационных измерений, помехозащищенность, надежность и степень автоматизации съема и обработки информации.

Зона обзора — область пространства, в которой производится обнаружение целей с заданными характеристиками. Эта зона (рис. 2.1, а) ограничивается по дальности пределами $D_{\min}$ — $D_{\max}$, по азимуту — величиной $\alpha_{\text{обз}}$ и по углу места — величиной $\beta_{\text{обз}}$.

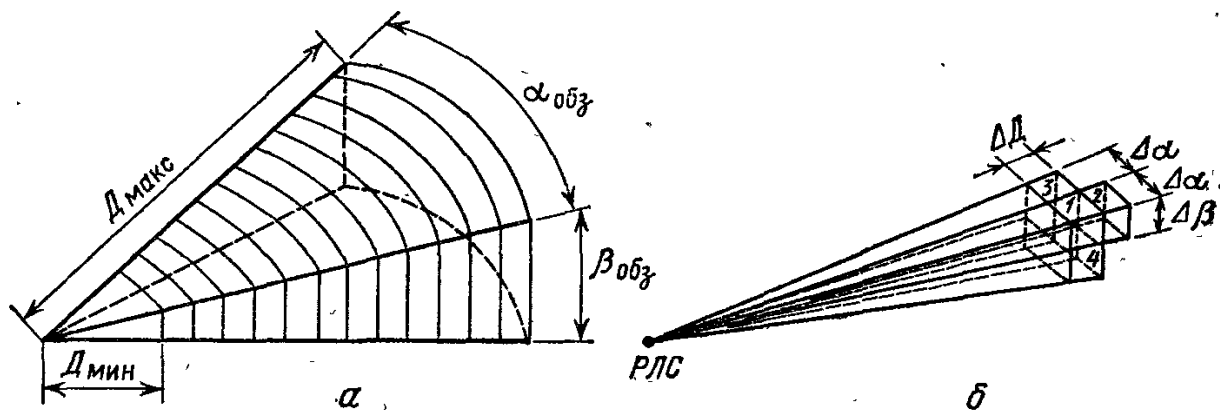


Рис. 2.1. Зона обзора РЛС (а) и элементарные объемы этой зоны (б)

Под *минимальной дальностью* $D_{\min}$ понимают радиус мертвой зоны, т. е. наименьшее расстояние от РЛС, на котором можно обнаружить цель и измерить ее координаты с заданной точностью.

Максимальной дальностью обнаружения $D_{\max}$ называется наибольшее расстояние между РЛС и целью, при котором соблюдаются заданные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги.

Раскроем смысл этих вероятностных оценок. Прием радиолокационных сигналов происходит в условиях помех естественного и искусственного происхождения (шумовые помехи в приемнике и антенне, умышленные помехи, создаваемые противником, и т. д.). Помехи имеют случайный характер, их величина и знак заранее неизвестны, причем помехи то уменьшают, то увеличивают входное напряжение приемника. В связи с этим прием радиолокационных сигналов относится к случайным явлениям, закономерности которых изучаются теорией вероятностей.

Когда цель находится в зоне обзора РЛС и сигнал цели различается на фоне помех, то происходит *правильное обнаружение*. Если же сигнал, находящийся в зоне обзора, не различается на фоне помех, имеет место *пропуск*

сигнала. Вероятность первого события обозначается P_{no} , вероятность второго — P_{nc} , и так как правильное обнаружение и пропуск сигнала — несовместимые события, т. е. исключают друг друга, то сумма их вероятностей равна единице: $P_{no} + P_{nc} = 1$.

Когда цели нет в зоне обзора, то образуется другая группа несовместимых событий: помеха достаточно сильная, чтобы быть принятой за сигнал цели, вследствие чего возникает ложная тревога с вероятностью P_{lm} ; правильное необнаружение с вероятностью P_{nn} , происходящее благодаря сравнительно слабому уровню помехи в данный отрезок времени. Сумма $P_{lm} + P_{nn} = 1$.

Часто первая группа событий оценивается вероятностью правильного обнаружения, а вторая — вероятностью ложной тревоги. Ими будут задаваться две другие вероятности: $P_{nc} = 1 - P_{no}$ и $P_{nn} = 1 - P_{lm}$. Крайние значения вероятностей равны 0 и 1.

Идеальными условиями приема сигналов были бы $P_{no} = 1$ и $P_{lm} = 0$, т. е. правильное обнаружение — достоверное событие, а ложная тревога — невозможное событие. В реальных условиях $P_{no} < 1$ и $P_{lm} > 0$.

Например, если максимальная дальность РЛС $D_{\max} = 300$ км при $P_{no} = 0,95$ и $P_{lm} = 10^{-3}$, то по теории вероятностей на границе зоны обзора, где $D = 300$ км, цель обнаруживается в 950 случаях из тысячи, а если цели нет, то в одном случае из тысячи возникает ложная тревога.

Таким образом, зона обзора является тактической характеристикой, определяющей область пространства, которую зондирует РЛС в соответствии со своим назначением с заданными качественными характеристиками.

1.2. Разрешающая способность радиолокационных станций

Разрешающая способность РЛС — возможность раздельно наблюдать и измерять координаты и параметры движения близко расположенных целей. Выделим в зоне обзора четыре соседних элементарных объема 1, 2, 3, 4 (рис. 2.1, б), в каждом из которых находится одна точечная цель. Элементы 1 и 2 имеют одинаковые угловые координаты, но отличаются по дальности на величину ΔD , элементы 1, 3 отличаются только по азимуту на $\Delta \alpha$ и 1, 4 — только по углу места на $\Delta \beta$, причем все цели наблюдаются раздельно. Будем сокращать каждую из величин ΔD , $\Delta \alpha$, $\Delta \beta$ до тех пор, пока раздельное наблюдение целей станет невозможным. Тогда объем 1 и будет разрешаемым объемом и его элементами $\Delta D_{\min}$, $\Delta \alpha_{\min}$, $\Delta \beta_{\min}$ оценивается разрешающая способность станции по дальности, азимуту и по углу места.

Разрешающая способность по дальности оценивается минимальным расстоянием $\Delta D_{\min}$ между двумя находящимися на одном направлении целями, при котором эти цели наблюдаются раздельно.

Разрешающая способность по азимуту оценивается минимальной разностью азимутов $\Delta \alpha_{\min}$ двух целей с одинаковыми дальностью и углом места, при которой эти цели еще наблюдаются раздельно.

Разрешающая способность по углу места оценивается минимальной разностью углов места $\Delta\beta_{\min}$ двух целей с одинаковыми дальностью и азимутом, при которой эти цели, еще наблюдаются раздельно.

Разрешающая способность по скорости оценивается минимальной разностью радиальных скоростей $\Delta v_{\text{д.мин}}$ двух целей с одинаковыми координатами D, α, β , при которой эти цели еще наблюдаются раздельно. В принципе достаточно разрешения целей по одной координате или по скорости.

Таким образом, разрешающая способность РЛС является тактической характеристикой, определяющей возможности РЛС разделять близко расположенные объекты и их элементы при их зондировании.

1.3. Точность измерения координат и параметров объектов

Ошибки измерений разделяются на грубые, систематические и случайные.

Грубые ошибки — результат грубого просчета оператора или следствие возникшей в аппаратуре неисправности. Такие погрешности значительно больше остальных ошибок в данном ряду измерений, и поэтому они легко выявляются.

Систематические ошибки вызываются длительно действующими факторами, например, задержкой сигнала в целях РЛС или несовершенством метода измерений. Такие ошибки в той или иной мере компенсируются калибровкой аппаратуры.

Случайные ошибки зависят от случайных обстоятельств, которые не поддаются предварительному учету.

Например, произведено 100 измерений дальности цели с помощью некоторого гипотетического радиодальномера. При этом случайные ошибки распределились по группам согласно табл. 2.1. Ошибки $\Delta x = -(20 \dots 15)$ м наблюдались в 4 опытах ($n_x = 4$), что соответствует частоте ошибок $n_x/n = 4/100 = 0,04$, ошибки $\Delta x = -(15 \dots 10)$ м наблюдались в 6 опытах ($n_x = 6$), т. е. их частота $n_x/n = 6/100 = 0,06$, и т. д.

Таблица 2.1

Распределение случайных ошибок измерений по интервалам

Группы ошибок $\Delta x, \text{ м}$	$-(20 \dots 15)$	$-(15 \dots 10)$	$-(10 \dots 5)$	$-(5 \dots 0)$	$0 \dots 5$	$5 \dots 10$	$10 \dots 15$	$15 \dots 20$
Среднее значение интервала ошибок $\Delta x_i, \text{ м}$	-17,5	-12,5	-7,5	-2,5	2,5	7,5	12,5	17,5
Число измерений n_x	4	6	13	24	26	17	8	2
Частота ошибок n_x/n	0,04	0,06	0,13	0,24	0,26	0,17	0,08	0,02

Среднее значение случайных ошибок $\overline{\Delta x}$ (черточка — знак усреднения) равно сумме произведений ошибок, точнее, средних значений интервалов Δx_i , на их частоту n_x/n :

$$\overline{\Delta x} = \llbracket 17,5 \cdot 0,04 \rrbracket + \llbracket 12,5 \cdot 0,06 \rrbracket + \llbracket 7,5 \cdot 0,13 \rrbracket + \llbracket 2,5 \cdot 0,24 \rrbracket + \llbracket 5 \cdot 0,26 \rrbracket + \llbracket 5 \cdot 0,17 \rrbracket + \llbracket 2,5 \cdot 0,08 \rrbracket + \llbracket 7,5 \cdot 0,02 \rrbracket = 0,25.$$

Полученный результат неточный, так как отличается от *математического ожидания*. Так называют среднюю ошибку, которую следует ожидать по результатам многократных измерений ($n \rightarrow \infty$) и которая вычисляется при делении диапазона ошибок x на бесконечно малые интервалы ($\Delta x \rightarrow 0$). Только тогда выявится строгая закономерность случайных ошибок и частота их будет называться *вероятностью ошибок* P_x .

Данные таблицы иллюстрируются посредством прямоугольников с основанием, равным интервалу ошибок Δx_i , и площадью, равной соответствующей частоте ошибок n_x/n (рис. 2.2). Когда $n \rightarrow \infty$ и $\Delta x \rightarrow 0$, площади прямоугольников выражают вероятности появления случайной ошибки P_x в данном бесконечно малом интервале ошибок Δx , и вершины прямоугольников попадают на кривую, называемую *кривой распределения ошибок*. Ординаты этой кривой (поскольку высота прямоугольника равна частоте ошибок n_x/n , делённой на $|\Delta x|$) являются производной от вероятности ошибки P_x по ее текущему значению x . Полученная производная может быть названа *плотностью вероятности* случайных ошибок

$$p(x) = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ n \rightarrow \infty}} \frac{n_x/n}{\Delta x} = \frac{dP_x}{dx}. \quad (2.1)$$

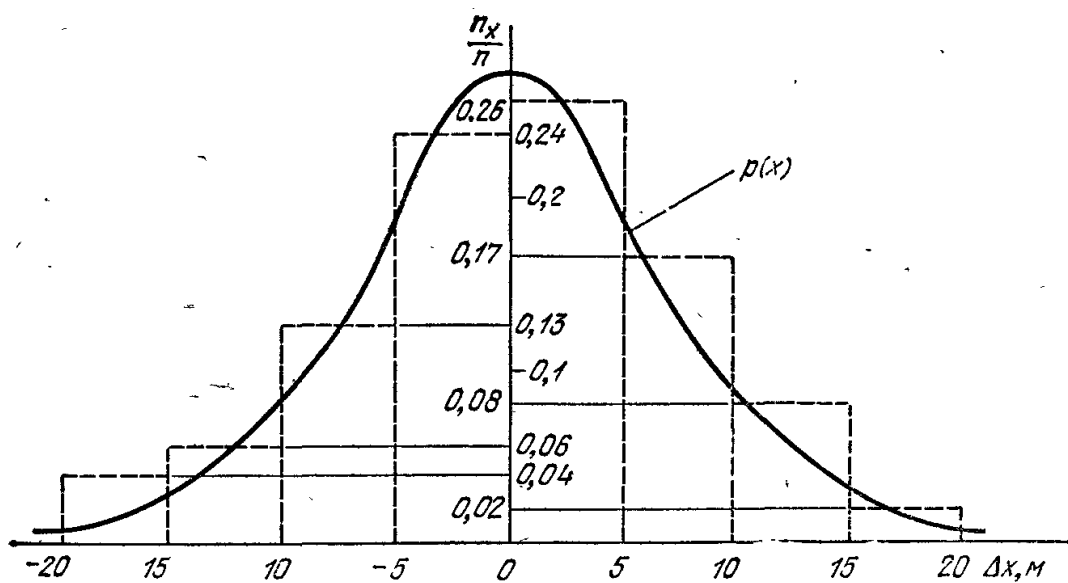


Рис. 2.2. Гистограмма и кривая распределения ошибок

Площадь под кривой распределения, выражающая суммарную вероятность ошибок, равна единице. Эта сумма распределяется *непрерывно* по всем значениям случайных ошибок. Следовательно, вероятность появления данной ошибки бесконечно мала, но плотность вероятности, как предел отношения двух бесконечно малых величин, величина конечная. Вот почему по оси ординат

кривой распределения откладывают плотность вероятности, а не саму вероятность ошибок.

Случайные ошибки измерений, как и многие другие случайные явления в радиолокации, возникают под действием многих независимых и незначительных по своему действию факторов, вероятность появления каждого из которых подчиняется *нормальному закону распределения*:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.2)$$

где $p(x)$ — плотность вероятности появления случайной величины x ; $\bar{x}$ — среднее значение (математическое ожидание) величины x ; σ^2 — дисперсия случайной величины x ; σ — *среднеквадратическое отклонение*, равное корню квадратному из дисперсии; e — основание натурального логарифма.

Если измерения производятся в неизменных условиях, то каждое значение случайной ошибки x появляется с равной вероятностью как со знаком $+$, так и со знаком $-$. Поэтому кривая распределения $p(x)$ (плотность распределений вероятностей) симметрична относительно оси ординат и среднее значение $\bar{x} = 0$, т. е. *центр распределения случайных ошибок равен нулю*. Тогда

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.3)$$

Из формул (2.2), (2.3) следует, что качество измерений тем выше, чем меньше дисперсия (рассеяние) ошибок, так как тогда понижается вероятность появления больших случайных ошибок. Кроме того, дисперсия суммы случайных величин равна сумме дисперсий слагаемых, что справедливо не только для нормального закона распределения. Например, пусть в неизменных условиях произведено n независимых измерений какого-либо параметра. Тогда случайные ошибки каждого измерения имеют одинаковую дисперсию, которую обозначим q^2 , а дисперсия суммы ошибок в n раз больше $\sigma^2 = nq^2$. Среднеквадратическое значение этой суммы $\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{n}q$. Но результат n измерений определяется как среднееарифметическое результатов отдельных измерений, поэтому среднеквадратическая ошибка

$$\sigma/n = \sqrt{n}q/n = q/\sqrt{n}, \quad (2.4)$$

т. е. с увеличением числа n опытов (измерений) некоторой величины, произведенных в неизменных условиях, среднеквадратическая ошибка уменьшается в $\sqrt{n}$ раз, так как рассеяние случайных ошибок сказывается все меньше и меньше.

Таким образом, ошибки радиолокационных измерений разделяются на грубые, систематические и случайные. Наиболее сложно компенсировать случайные погрешности. Для этого необходимо увеличивать количество измерений.

1.4. Эксплуатационные и другие тактические характеристики радиолокационной станции

Помехозащищенность РЛС складывается из помехоустойчивости и скрытности. *Помехоустойчивость* — способность станции противостоять внешним помехам, создаваемым противником. Помехоустойчивость тем выше, чем меньше внешние помехи снижают максимальную дальность действия РЛС. *Скрытность работы РЛС* — способность станции противостоять радиотехнической разведке, которую предпринимает противник для выявления параметров излучения подавляемой РЛС. Эти данные необходимы противнику для постановки эффективных помех.

Пропускная способность — способность РЛС обеспечивать одновременную работу с рядом объектов. Например, мерой пропускной способности может служить количество одновременно сопровождаемых целей или одновременно управляемых объектов.

Надежность — способность РЛС работать в течение требуемого времени с сохранением всех заданных эксплуатационных показателей.

Эксплуатационная эффективность (Эф) характеризует средние затраты времени на настройку (T_n), регулировку (T_p) и обслуживание (T_o) системы по сравнению с временем использования ($T_{исп}$) системы по назначению:

$$Эф = T_{исп} / (T_n + T_p + T_o). \quad (2.5)$$

Степень автоматизации съема и обработки информации во многом зависит от назначения РЛС. Радиолокационные сигналы подвергаются обработке в приемном и выходном устройствах РЛС. Назначение обработки — отделить сигналы от помех и извлечь из сигналов максимум полезной информации о целях.

Если получателем информации является оператор РЛС, то выходным устройством станции служит индикатор. В этом случае обработка информации полуавтоматическая, поскольку в ней участвует человек. Если же получатель информации — вычислительное устройство, то съем и обработка информации полностью автоматизируются.

2. Технические показатели радиолокационных станций

2.1. Параметры зондирующего сигнала

Технические параметры характеризуют технические средства, необходимые для обеспечения заданных тактических параметров. К ним относятся значение и стабильность несущей частоты; вид и параметры модуляции излучаемых колебаний; диаграммы направленности антенных устройств (ДНА); мощность передатчика; чувствительность приемника; надежность устройств системы; массогабаритные характеристики системы и др. Отклонение любого технического параметра от заданного значения влияет

на определенный тактический параметр (или группу параметров), что может вызвать выход тактических параметров РЛУ за установленные пределы, т.е. отказ системы. Рассмотрим основные из них.

Излучение может быть непрерывным (рис. 2.3, а), импульсным большой скважности — порядка сотен...тысяч (рис. 2.3, б) и импульсным малой скважности — порядка единиц...десятков (рис. 2.3, в). Под *скважностью импульсов* q_u понимают отношение периода следования T_c к длительности импульса τ_u : $q_u = T_c / \tau_u$.

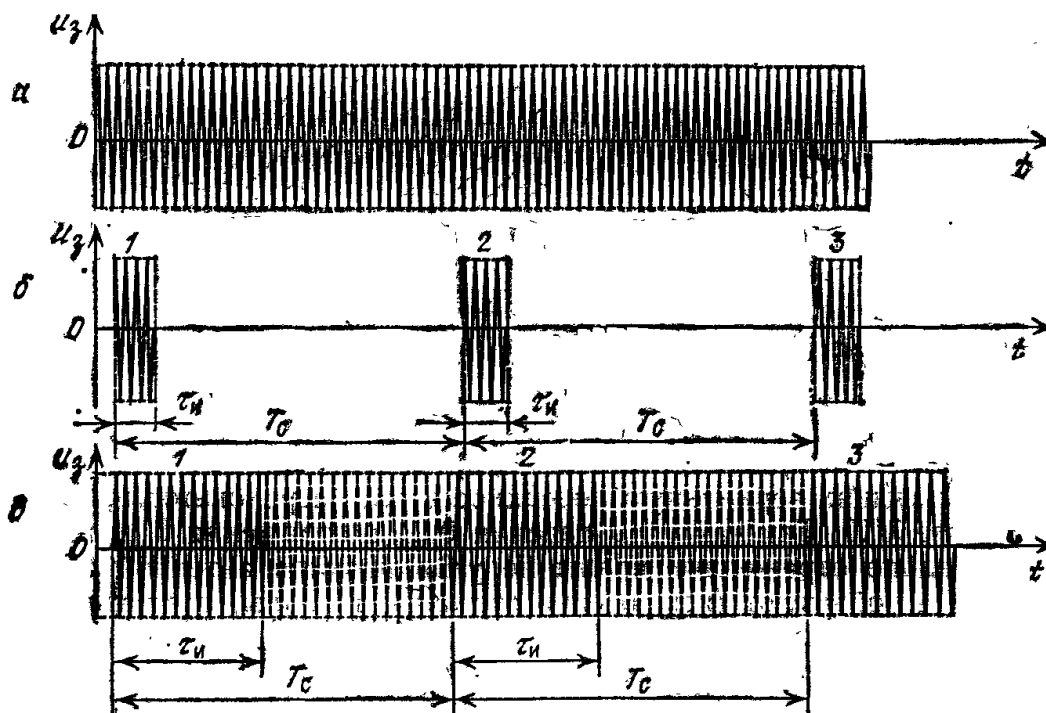


Рис. 2.3. Временные диаграммы зондирующего излучения

Периодическую последовательность импульсов малой скважности называют также *квазинепрерывным сигналом*, так как имеющийся в нем интервал между импульсами относительно невелик. Излучение считается *когерентным*, если начальные фазы всех импульсов одинаковые или закономерно изменяются от импульса к импульсу. Если это условие не соблюдается, то излучение *некогерентное*. Представленная на рис. 2.3, в последовательность импульсов когерентная: закономерность изменения фаз выражается в ней тем, что показанное пунктиром продолжение импульса 1 совпадает с началом импульса 2, а продолжение импульса 2 — с началом импульса 3 и т. д.

Радиолокация осуществляется преимущественно с помощью сигналов очень высокой частоты по следующим причинам: 1) острая направленность волн, необходимая для точной пеленгации и большой дальности действия РЛС, может быть получена только при условии, что длина волны λ значительно меньше линейных размеров антенны, а это, как правило, выполняется при

$\lambda < 10$ м; 2) такой выбор длины волны вызывается условиями вторичного излучения. Различают три вида вторичного излучения: зеркальное отражение, диффузное рассеяние и резонансное переизлучение (рис. 2.4).

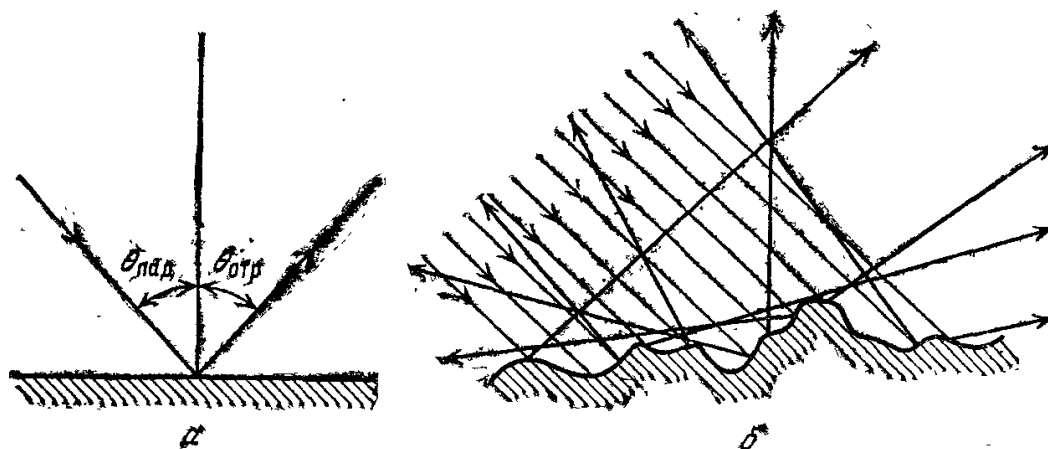


Рис. 2.4. Виды отражений радиоволн:
а – зеркальное отражение; б – диффузное отражение

Зеркальное отражение (рис. 2.4, а) происходит при облучении целей, имеющих зеркальную поверхность или шероховатости, размером менее $\lambda/16$. Так как углы падения $\theta_{пад}$ и отражения $\theta_{отр}$ равны, то зеркально отраженные волны не улавливаются антенной РЛС и сигнала не образуют (исключение составляют волны, падающие под прямым углом к плоскости цели).

Диффузное рассеяние (рис. 2.4, б) имеет место при более шероховатой или многогранной отражающей поверхности, причем интенсивность диффузно рассеянных волн возрастает с уменьшением λ .

Вторичные волны становятся еще более интенсивными в случае *резонансного переизлучения*, когда линейные размеры цели равны или кратны полуволне. Если же длина волны значительно больше размеров отражающей поверхности, то волны огибают эту поверхность (дифракция) и почти не улавливаются приемной антенной РЛС.

Требования радиолокации способствовали развитию техники сверхвысоких частот. В радиолокации последовательно внедрялись все более короткие радиоволны: метровые, дециметровые, сантиметровые, миллиметровые, а в последние годы успешно развивается лазерная локация (оптический диапазон волн). Вместе с тем возникла необходимость в радиолокации на низких радиочастотах, которая, по-видимому, возможна только при достаточно больших размерах антенн и целей.

Таким образом, выбор параметров зондирующего сигнала существенно влияет на качество выполнения радиолокационных задач.

2.2. Параметры радиолокационного обзора

Система радиолокационного обзора пространства поэлементно облучает зону обзора РЛС для выявления имеющихся в зоне целей и измерения их координат и параметров движения. РРВ по дальности происходит естественным путем и практически мгновенно — со скоростью света. Основная трудность заключается в обзоре по угловым координатам: антенна формирует диаграмму направленности в виде одного или нескольких лучей; каждый из лучей охватывает телесный угол одного элемента зоны обзора; определенным способом сообщают диаграмме направленности перемещение по такому закону, чтобы за один цикл облучить всю зону. Длительность этого цикла называется *периодом обзора* $T_{обз}$.

Методы обзора разделяют на однолучевые и многолучевые, мгновенные (параллельные) и последовательные.

Мгновенный обзор одним неподвижным лучом применяют в РЛС, измеряющих только дальность и, следовательно, не нуждающихся в сканировании луча, например в самолетных радиовысотомерах и дальномерах. Мгновенный обзор возможен и при измерении угловых координат, но для этого диаграмма направленности (ДН) антенны РЛС должна быть многолучевой и сразу охватывать всю зону обзора станции. Такой *мгновенный многолучевой обзор иначе называется параллельным*.

Однолучевой обзор со сканированием называют последовательным, так как требует последовательного облучения всех элементов зоны. Имеются разновидности последовательного обзора.

Если из двух угловых координат измеряют одну, как, например, в так называемых *панорамных РЛС*, то лучу антенны придают большую ширину в плоскости неизмеряемой угловой координаты для того, чтобы за один оборот (одно качание) антенны перекрывалась вся зона обзора. Такой обзор называется *круговым, или секторным*.

На рис. 2.5, а показана ДН, сжатая в горизонтальной плоскости, а на рис. 2.5, б — в вертикальной. Первая предназначена для РЛС, измеряющей дальность и азимут, а вторая — для РЛС, измеряющей угол места или высоту цели. Обзор начинается с кругового вращения первой антенны вокруг вертикальной оси, следующий этап — дистанционный разворот второй антенны на выявленный азимут интересующей цели и последний этап — качание этой антенны вокруг горизонтальной оси с одновременным измерением угла места или высоты цели.

Если для точного измерения обеих угловых координат применяется однолучевой обзор, то сканирование совершается игольчатым лучом по винтовой линии, спирали, зигзагообразно или по другой сложной траектории. При этом период обзора, естественно, больше, чем при круговом или секторном вращении плоского луча.

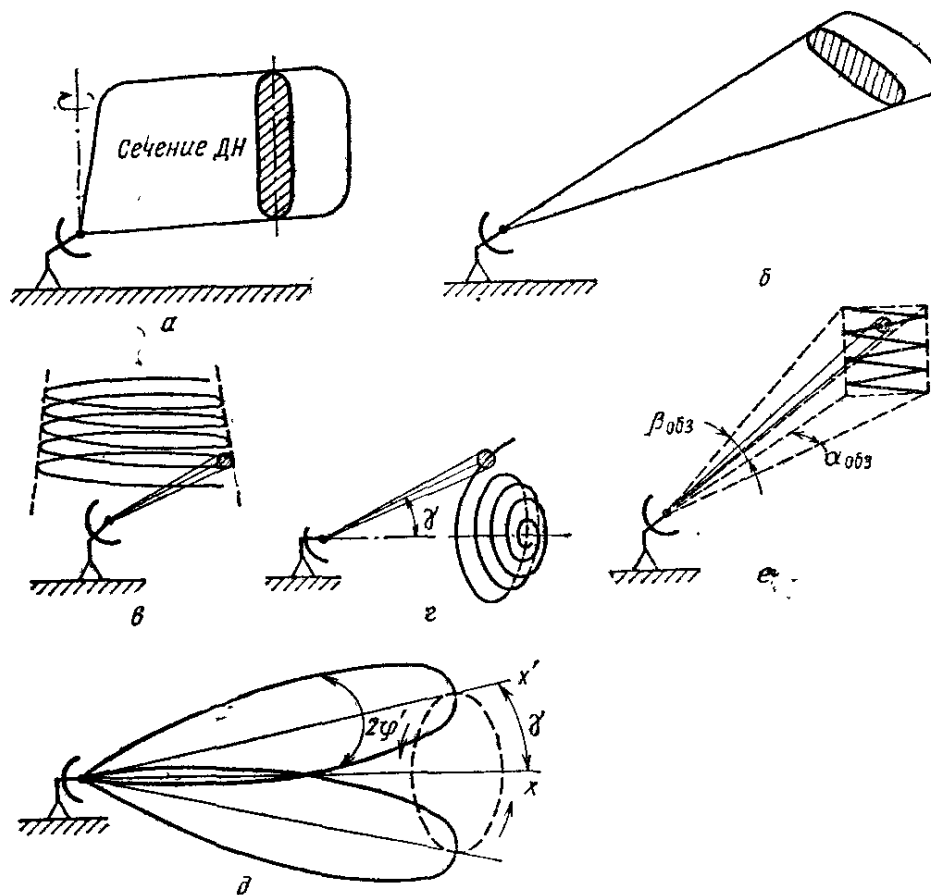


Рис. 2.5. Виды радиолокационного обзора плоскими и игольчатыми ДН

Винтовой обзор (рис. 2.5, в) складывается из кругового вращения в азимутальной плоскости и медленного изменения положения луча по углу места. *Спиральный обзор* (рис. 2.5, г) означает, что проекция луча на плоскость, перпендикулярную оси вращения, имеет вид спирали. *Конический обзор* (рис. 2.5, д) можно рассматривать как частный случай спирального, когда угол γ между осью вращения и осью луча не изменяется. Этот угол при спиральном обзоре меньше 45° , а при винтовом может быть значительно больше. Винтовой и спиральный обзоры применяются в режиме поиска цели, а коническое сканирование совершается в режиме автоматического слежения за целью. К коническому сканированию проще перейти от спирального обзора, чем от винтового.

Зигзагообразный обзор (рис. 2.5, е) означает колебательное движение луча по азимуту или углу места с постепенным изменением его положения по другой угловой координате. Такая траектория луча выгодна тем, что позволяет устанавливать секторы обзора независимо по азимуту и углу места.

Кроме последовательного и параллельного существует *смешанный обзор*, при котором несколько лучей сразу охватывают зону обзора по одной угловой координате, а по другой совершается последовательное круговое

сканирование, как в панорамных РЛС. Параллельный и смешанный виды обзора будут рассмотрены при изучении многолучевых РЛС.

К системе радиолокационного обзора предъявляется ряд требований.

1. Период обзора $T_{обз}$ должен быть минимальным. Это требование имеет существенное значение при последовательном обзоре, когда облучение любого элемента зоны повторяется лишь через интервалы $T_{обз}$; важно, чтобы за период обзора цель не успела значительно изменить свои координаты, так как тогда отметка цели «прыгает» по экрану индикатора или, что еще хуже, цель вовсе проходит незамеченной через зону обзора РЛС.

2. Облучение цели за один цикл обзора должно быть достаточно длительным, чтобы энергия отраженного сигнала превысила энергию помех, и тем самым обеспечивалось уверенное обнаружение цели. Это требование противоречит первому и потому удовлетворяется компромиссно.

3. Устройство сканирования должно быть механически простым и надежным в эксплуатации, что вынуждает в ущерб направленным свойствам антенны уменьшать размеры и вес ее вращающихся частей.

4. Метод обзора должен быть согласован с требуемой точностью измерения угловых координат.

Ясно, что перечисленные требования удовлетворяются по-разному в РЛС различного назначения.

Допустим, что зона обзора ограничена углами $\alpha_{обз}$ по азимуту и $\beta_{обз}$ по углу места при ширине луча антенны, равной соответственно $2\varphi_{0,5}$ и $2\theta_{0,5}$. Отсюда находим число элементов зоны обзора как частное от деления $\alpha_{обз} \cdot \beta_{обз}$ на $2\varphi_{0,5} \cdot 2\theta_{0,5}$. Так как в каждом элементе можно зафиксировать не более одной точечной цели, то минимальный период обзора равен

$$T_{обзм\text{ин}} = T_{обл} \cdot \alpha_{обз} \cdot \beta_{обз} / (2\varphi_{0,5} \cdot 2\theta_{0,5}), \quad (2.6)$$

где $T_{обл}$ — длительность облучения точечной цели.

В реальных условиях период обзора больше, чем $T_{обзм\text{ин}}$, в связи с необходимостью замедлять движение антенны при резком изменении траектории луча и затрачивать дополнительное время на переход его из конечной точки траектории в исходную. Это учитывается *коэффициентом реверсирования* k_p , который показывает, во сколько раз фактический период обзора $T_{обз}$ больше идеализированного $T_{обзм\text{ин}}$:

$$T_{обз} = k_p \cdot T_{обзм\text{ин}} = k_p \cdot T_{обл} \cdot \alpha_{обз} \cdot \beta_{обз} / (2\varphi_{0,5} \cdot 2\theta_{0,5}), \quad (2.7)$$

Эта формула определяет период обзора пространства антенной, но не время обнаружения $T_{обн}$ всех целей, имеющих в зоне обзора РЛС. Обычно $T_{обн} > T_{обз}$. Например, обзор по дальности совершается практически мгновенно, а последовательная обработка сигналов по диапазону дальности длится конечное и подчас значительное время.

Таким образом, параметры радиолокационного обзора влияют на скорость обнаружения целей и надежность всей РЛС.

Заключение

1. Зона обзора является тактической характеристикой, определяющей область пространства, которую зондирует РЛС в соответствии со своим назначением с заданными качественными характеристиками.

2. Разрешающая способность РЛС является тактической характеристикой, определяющей возможности РЛС разделять близко расположенные объекты и их элементы при их зондировании.

3. Ошибки радиолокационных измерений разделяются на грубые, систематические и случайные. Наиболее сложно компенсировать случайные погрешности. Для этого необходимо увеличивать количество измерений.

4. Выбор параметров зондирующего сигнала существенно влияет на качество выполнения радиолокационных задач.

5. Параметры радиолокационного обзора влияют на скорость обнаружения целей и надежность всей РЛС.

На самоподготовке необходимо подготовиться к контрольной работе по следующим вопросам:

1. Зона обзора РЛС и ее элементы.
2. Сущность разрешающей способности по различным координатам.
3. Виды ошибок радиолокационных измерений.
4. Характеристики случайных ошибок радиолокационных измерений.
5. Определения тактических характеристик РЛС.
6. Основные параметры зондирующего сигнала РЛС.
7. Факторы, учитываемые при выборе частоты зондирующего сигнала РЛС.
8. Понятие и виды радиолокационных обзоров.
9. Требования к параметрам радиолокационного обзора.

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ВОЕННАЯ КАФЕДРА



Дисциплина «Военно-специальная подготовка»
(наименование дисциплины)

Военная специальность 530200 «Математическое и программное
(наименование специальности)
обеспечение функционирования автоматизированных систем»

Тема лекции № 6.09 «Принципы построения радиолокационных систем и
(номер и наименование лекции)
устройств»

Введение

Сфера применения радиолокационной техники в настоящее время очень широка, а с применением достижений современной схемотехники, радиоэлектронных технологий и вычислительной техники – все более расширяется. Это объясняется, прежде всего, уникальными свойствами РВ, с помощью которых можно производить различные исследования с широким спектром объектов. Поэтому рассмотрение основных принципов, используемых при построении радиолокационных устройств и систем, является весьма актуальным.

Для достижения поставленных целей рассмотрим следующие вопросы:

1. Классификация радиолокационных станций.
2. Принцип действия простейшей радиолокационной станции.
3. Размещение аппаратуры радиолокационных систем в пространстве.

Данный учебный материал можно найти в следующих **источниках**:

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004.
2. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М.: Советское радио, 1975.

1. Классификация радиолокационных станций

РЛС классифицируют по следующим признакам:

происхождению радиосигнала, принимаемого приемником РЛС (активные РЛС (с активным и пассивным ответом), полуактивные и пассивные РЛС);

используемому диапазону РВ (РЛС декаметрового, метрового, дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов);

виду зондирующего сигнала (РЛС с непрерывным (немодулированным или частотно-модулированным) и импульсным (некогерентным, когерентно-импульсным с большой и малой скважностью, с внутриимпульсной частотной или фазовой модуляцией) излучением);

числу применяемых каналов излучения и приема сигналов (одноканальные и многоканальные с частотным или пространственным разделением каналов);

числу и виду измеряемых координат (одно-, двух- и трехкоординатные);

способу измерения, отображения и съема координат объекта;

месту установки РЛС (наземные, корабельные, самолетные, спутниковые);

функциональному назначению РЛС (от малогабаритных переносных РЛС измерения скорости автомобилей до огромных наземных РЛС систем противовоздушной (ПВО) и противоракетной (ПРО) обороны).

Перечислим основные типы наземных, корабельных и самолетных РЛС различного назначения.

Основные типы *наземных РЛС*:

обнаружения воздушных целей и наведения на них истребителей;

управления воздушным движением (обзорные и диспетчерские);

обнаружения и определения координат баллистических ракет (БР) и искусственных спутников Земли (ИСЗ);

целеуказания станциям управления зенитной артиллерией и наведения зенитных управляемых ракет (ЗУР);

управления зенитной артиллерией и ЗУР;

обнаружения минометов;

метеорологические;

обзора акватории порта;

обзора летного поля;

обнаружения и определения скорости наземных движущихся объектов.

Основные типы *корабельных РЛС*:

обеспечения кораблевождения;

обнаружения надводных объектов и низколетящих ЛА, определения их координат;

обнаружения и определения координат высоколетящих самолетов;

управления ЗУР и зенитной артиллерией;

обнаружения и определения координат БР и ИСЗ.

Основные типы *самолетных РЛС*:

радиолокационные дальномеры;

радиовысотомеры;

доплеровские измерители путевой скорости и угла сноса самолета;

РЛС обнаружения самолетов и предотвращения столкновений;

панорамные РЛС обзора земной поверхности;

РЛС бокового обзора (в том числе и с синтезированным раскрывом антенны);

РЛС перехвата и прицеливания;

РЛС наведения управляемых ракет;

радиолокационные взрыватели.

По назначению РЛС подразделяют на обзорные и следящие.

Обзорные РЛС применяют для обнаружения и измерения координат всех целей в данной области пространства или земной поверхности, а также для управления воздушным движением (УВД) ПВО и ПРО, разведки, получения метеорологической информации и т.п.

Следящие РЛС выполняют функцию точного и непрерывного определения координат одной или ряда целей. Полученная РЛС информация используется, например, для наведения оружия на цель или для управления объектом.

Различают автономные и неавтономные системы и устройства. *Автономные* работают самостоятельно без помощи других радиоэлектронных устройств и не используют радиоприемных, связывающих бортовую аппаратуру данного объекта с внешними по отношению к нему системами и устройствами. В таких радиосистемах реализуется принцип однопозиционной радиолокации, т.е. информация об элементах извлекается из отраженного от земной поверхности или цели сигнала.

Неавтономные имеют в своем составе как бортовую аппаратуру, установленную на объекте, так и связанную с ней радиоприемную аппаратуру специальных радиоустройств, размещаемых в наземных пунктах или на других объектах, т.е. реализуется принцип многопозиционной радиолокации.

Основными характерными признаками сигнала являются вид излучаемого (зондирующего) сигнала (непрерывный или импульсный), тип модуляции, динамический диапазон мощности, ширина спектра и др.

По виду измеряемого элемента различают угломерные, дальномерные и разностно-дальномерные устройства, а также устройства измерения скорости.

Угломерные устройства радиолокаторов определяют угол между опорным направлением и направлением на объект в горизонтальной или вертикальной плоскости (измеряют пеленг) в соответствующей СК. К этим устройствам (радиопеленгаторам) относят средства, которые позволяют найти угловые координаты источника излучения электромагнитных колебаний по результатам измерения направления прихода радиоволн.

Дальномерные устройства (радиодальномеры) предназначены для измерения расстояния до объекта. Обычно радиодальномеры измеряют

запаздывание отраженного объектом сигнала относительно собственного излученного (зондирующего) сигнала. Дальномеры – часть большинства РЛС, они также применяются самостоятельно, например, для нахождения высоты полета ЛА (радиовысотомеры). Дальномеры могут реализовать принцип запрос – ответ, когда дальность измеряется по ретранслируемому сигналу.

Приведенная классификация включает далеко не все используемые типы РЛС. Однако и перечисленных типов достаточно для характеристики широты и многообразия применения радиолокационных средств.

2. Принцип действия простейшей радиолокационной станции

Как уже говорилось в предыдущих лекциях, физической основой радиолокации является рассеяние радиоволн объектами, отличающимися своими электрическими характеристиками от соответствующих характеристик окружающей среды при их облучении. Причем интенсивность рассеяния или отражения РВ (интенсивность вторичного поля) зависит от степени отличия электрических характеристик объекта и среды, от формы объекта, от соотношения его размеров и длины волны, от поляризации РВ. Результирующее вторичное ЭМП состоит из поля отражения, распространяющегося в сторону облучающего первичного поля, и теневого поля, распространяющегося за объект (в ту же сторону, что и первичное поле).

С помощью приемной антенны и приемного устройства (Прм) можно принять часть рассеянного сигнала, преобразовать и усилить его для последующего обнаружения. Таким образом, простейшая РЛС может состоять из передатчика (Прд), формирующего и генерирующего радиосигналы, передающей антенны, излучающей эти радиосигналы, приемной антенны, принимающей отраженные сигналы, радиоприемника, усиливающего и преобразующего сигналы и, наконец, выходного устройства (ВУ), обнаруживающего отраженные сигналы (рис. 3.1).

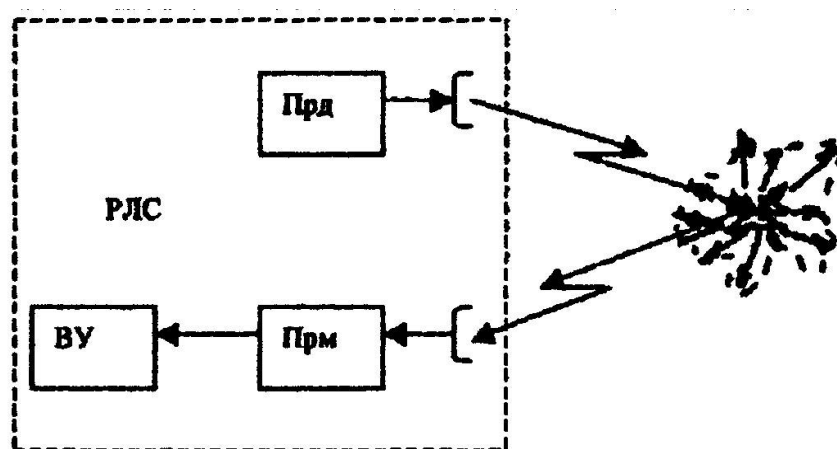


Рис. 3.1. Принцип действия простейшей РЛС

Как правило, амплитуда (или мощность) принимаемого сигнала мала, а сам сигнал имеет случайный характер. Малая мощность сигнала объясняется большим расстоянием до объекта (цели) и поглощением энергии сигнала при его распространении. Кроме того, на интенсивность отраженного сигнала существенно влияют размеры целей. Случайный характер сигнала является следствием флуктуации отраженного сигнала за счет случайного перемещения элементов цели сложной формы при отражении РВ, многолучевого РРВ, хаотических изменений амплитуды сигнала при распространении и ряда других факторов. В результате принимаемый сигнал по виду, интенсивности и характеру изменения похож в приемном тракте на шумы и помехи. Поэтому первой и основной задачей РЛС является обнаружение полезного радиосигнала, т.е. вынесение решения о присутствии полезного сигнала в поступающей на вход приемного тракта смеси полезного сигнала с помехами, называемой *входной реализацией*. Эта статистическая задача решается входящим в радиолокационное устройство (РЛУ) специальным устройством – обнаружителем, в котором стараются использовать алгоритм оптимального (наилучшего) обнаружения. Качество процесса обнаружения характеризуют вероятностью правильного обнаружения, когда присутствующий во входной реализации сигнал обнаруживается, и вероятностью ложной тревоги, когда за полезный сигнал принимается помеха, а сам сигнал отсутствует.

Большинство параметров принимаемого сигнала априори неизвестны, поэтому при обнаружении приходится осуществлять поиск нужного параметра радиосигнала, отличающего его от сопутствующих шумов и помех.

Построение РЛС на базе современных технологий обработки информации заключается в использовании в качестве антенн фазированной антенной решетки (ФАР), в качестве генератора пусковых импульсов синтезатора частоты – синхронизатора, в качестве выходного устройства – цифрового процессора. Передатчик в зависимости от того, какая антенна используется в РЛС, может быть реализован в модульном варианте и встроен в активную ФАР, либо в виде модулятора и однокаскадного или многокаскадного генератора радиочастоты для пассивной ФАР или зеркальной антенны. Таким образом, перспективная РЛС (рис. 3.2) состоит из ФАР, синтезатора-синхронизатора, аналогового процессора (приемника), цифрового процессора и устройства отображения информации.

Антенна по сигналам от цифровой вычислительной машины (ЦВМ) осуществляет формирование лучей и их перемещение для обзора пространства. Радиопередатчик формирует зондирующие сигналы, которые излучаются антенной. Радиоприемник усиливает слабые отраженные целью и принятые антенной сигналы. Поскольку эти сигналы приходят в смеси с шумами и помехами, то их выделение осуществляется с помощью согласованных фильтров сосредоточенной селекции и цифровых фильтров. Обычно процессор сигналов (приемник) выдает электрические сигналы в цифровом коде. Дальнейшая обработка сигналов выполняется в процессоре данных по

заложенным в него программам алгоритмов обработки. Рабочие частоты и временные интервалы в РЛС задаются с помощью синтезатора-синхронизатора. Устройство отображения информации (УОИ) выполняется обычно на индикаторе с электроннолучевой трубкой или на дисплее процессора.

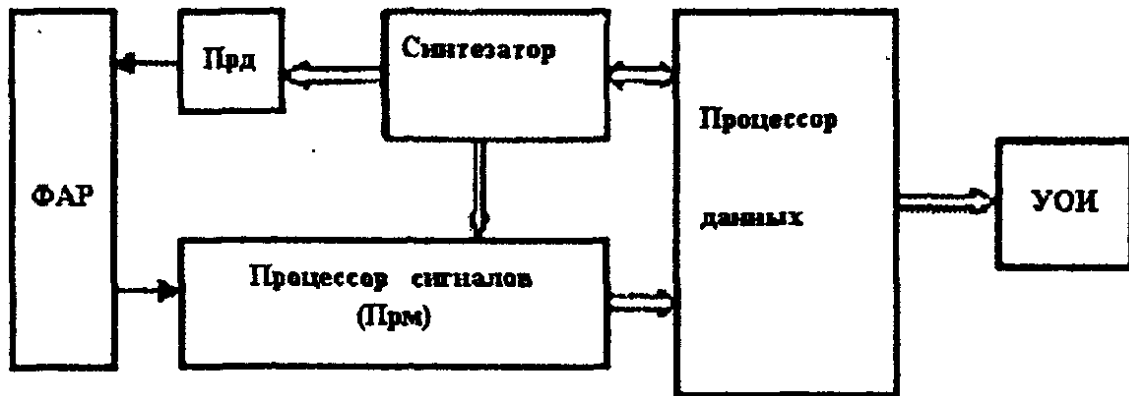


Рис. 3.2. Принцип построения современной импульсной РЛС

Количество одновременно обнаруживаемых и сопровождаемых целей определяется быстродействием систем обработки информации – выходного устройства, в качестве которого обычно используется цифровой процессор.

Типичное изображение на экране индикатора кругового обзора (ИКО) РЛС управления воздушным движением (УВД) показано на рис. 3.3, а. Здесь можно различить светящиеся радиальные и круговые метки. В центре экрана «находится» РЛС. Яркие точки — отметки целей. По радиусу можно отсчитать дальность, а по углу поворота радиуса, проходящего через отметку цели, относительно вертикали, проходящей через центр экрана, можно измерить пеленг цели. К каждой отметке на экране «прикреплен» формуляр, который содержит необходимую информацию о бортовом номере, высоте, дальности и азимуте самолета (рис. 3.3, б). На рис. 3.3 для лучшей различимости проведено инвертирование изображения.

Таким образом, простейшая РЛС состоит из **Прд**, **Прм**, антенного устройства, вычислительного устройства и **УОИ**. Помимо обнаружения объектов, **УОИ** РЛС выводит и другую информацию о целях, позволяющую идентифицировать объекты.

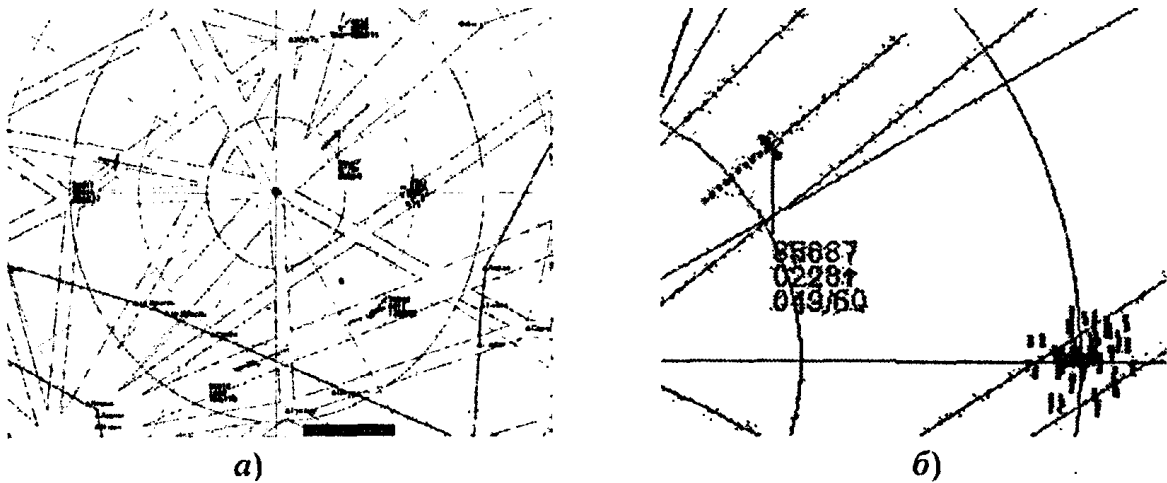


Рис. 3.3. Вид экрана РЛС УВД:

а – общий вид экрана; б – укрупненное изображение фрагмента экрана с формуляром

3. Размещение аппаратуры радиолокационных систем в пространстве

По характеру размещения частей аппаратуры в пространстве различают однопозиционные, двухпозиционные (бистатические) и многопозиционные РЛС. Последние два типа РЛС отличаются тем, что их аппаратура разнесена в пространстве, и эти РЛС могут функционировать как самостоятельно, так и совместно (разнесенная радиолокация). Благодаря пространственному разнесению элементов в таких системах достигаются большие информативность и помехозащищенность, однако сама система усложняется.

Однопозиционные радиолокационные системы (ОПРЛС) отличаются тем, что вся аппаратура располагается на одной позиции. Такие системы представляют собой РЛС. В ОПРЛС реализуется активный или пассивный вид радиолокации. При активной радиолокации с активным ответом аппаратура запросчика располагается в одной точке пространства, а ответчика – в другой. В зависимости от назначения РЛС и типа используемых сигналов структурные схемы ОПРЛС могут быть конкретизированы и при этом значительно отличаться друг от друга. Рассмотрим в качестве примера работу импульсной активной РЛС обнаружения воздушных целей для УВД, структура которой приведена на рис. 3.4. Устройство управления обзором (управления антенной) служит для просмотра пространства (обычно кругового) лучом антенны, узким в горизонтальной плоскости и широким в вертикальной.

В рассматриваемой ОПРЛС используется импульсный режим излучения, поэтому в момент окончания очередного зондирующего радиоимпульса единственная антенна переключается от Прд к Прм и используется для приема до начала генерации следующего зондирующего радиоимпульса, после чего антенна снова подключается к передатчику и т.д.

Эта операция выполняется переключателем прием-передача (ППП). Импульсы запуска, задающие период повторения зондирующих сигналов и

синхронизирующие работу всех подсистем ОПРЛС, генерирует синхронизатор (Синх). Сигнал с Прм после аналого-цифрового преобразователя (АЦП) поступает на аппаратуру обработки информации – процессор сигналов, где выполняется первичная обработка информации, состоящая в обнаружении сигнала и измерении координат цели. Отметки целей и трассы траекторий формируются при вторичной обработке информации в процессоре данных.

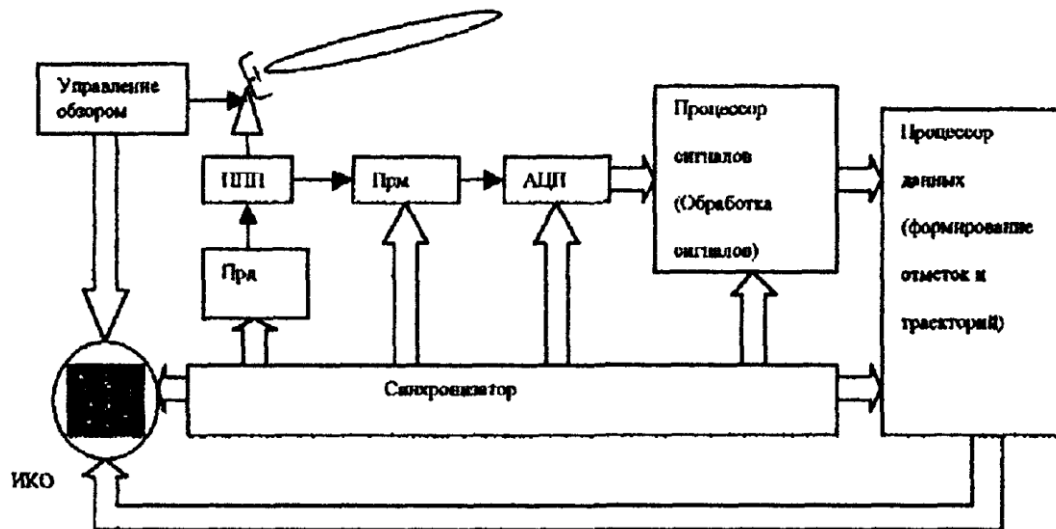


Рис. 3.4. Структурная схема РЛС обнаружения воздушных целей

Сформированные сигналы вместе с информацией об угловом положении антенны передаются для дальнейшей обработки на командный пункт, а также для контроля на ИКО. При автономной работе радиолокатора ИКО служит основным элементом для наблюдения воздушной обстановки. Такая РЛС обычно ведет обработку информации в цифровой форме. Для этого предусмотрено устройство преобразования сигнала в цифровой код (АЦП).

Бистатические радиолокационные системы (БиРЛС) представляют собой РЛС, в которых передающая и приемная части расположены в различных точках пространства (рис. 1.6, г). Такие БиРЛС основаны на активном виде радиолокации.

Многопозиционные радиолокационные системы (МПРЛС) (рис. 3.5) в общем случае объединяют однопозиционные (ОПРЛС1 и ОПРЛС2), бистатические (БиРЛС1 — БиРЛС6) и пассивные (ПРЛС1 — ПРЛС4) РЛС, расположенные в различных точках пространства (позициях). Расстояние между позициями РЛС называется базой (Б).

На рис. 3.6 показана структура МПРЛС, имеющей общую передающую и три разнесенные приемные позиции. Таковую МПРЛС называют *полуактивной*. Частным случаем полуактивной системы является БиРЛС. МПРЛС имеют несколько баз, которые обозначаются B_{jk} , где индексы j и k соответствуют номерам или названиям позиций. Следует отметить, что в зависимости от

В обобщенной структуре МПРЛС (рис. 3.7) можно выделить основные компоненты системы: аппаратуру разнесенных позиций (П), каналы передачи информации (1), каналы синхронизации (2) и пункт обработки информации ПОИ, где поступающие от разнесенных позиций сигналы и информация объединяются и обрабатываются совместно, что позволяет реализовать ряд преимуществ МПРЛС перед однопозиционной РЛС.

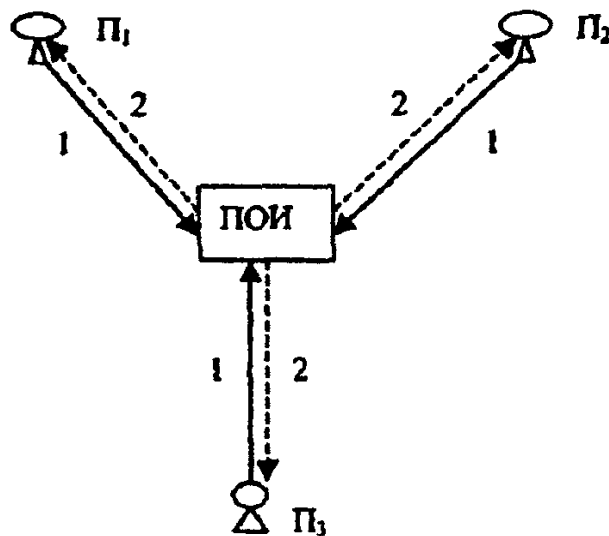


Рис. 3.7. Обобщенная структурная схема МПРЛС

Основные из этих преимуществ: возможность формирования сложных пространственных зон обзора; лучшее использование энергии в системе; большая точность измерения местоположения целей в пространстве; возможность измерения полного вектора скорости целей; повышение помехозащищенности по отношению к активным и пассивным помехам, а также увеличение надежности выполнения тактической задачи.

Однако эти преимущества достигаются ценой увеличения сложности и стоимости системы. Возникает необходимость синхронизации работы позиций (в том числе и при обзоре пространства) и организации линий передачи данных. Возрастает и сложность обработки информации из-за большого ее объема. Однако, несмотря на указанные недостатки, МПРЛС получили широкое распространение в практике радиолокации. В зависимости от задачи, решаемой в процессе обработки информации в МПРЛС, различают первичный, вторичный и третичный виды обработки.

Первичная обработка заключается в обнаружении сигнала цели и измерении ее координат с соответствующими качеством или погрешностями. *Вторичная обработка* предусматривает определение параметров траектории каждой цели по сигналам одной или ряда позиций МПРЛС, включая операции отождествления отметок целей. При *третичной обработке* объединяются

параметры траекторий целей, полученных различными приемными устройствами МПРЛС с отождествлением траекторий.

В зависимости от использования на разнесенных в пространстве позициях фазовой информации, содержащейся в отраженных от цели сигналах, различают МПРЛС *пространственно-когерентные, с кратковременной пространственной когерентностью* и *пространственно-некогерентные*.

Под пространственной когерентностью понимают способность сохранять жесткую связь фаз высокочастотных сигналов на разнесенных позициях. Степень пространственной когерентности зависит от длины волны сигнала, величины баз МПРЛС и размеров цели, а также от неоднородностей параметров трасс распространения радиоволн.

Если цель можно считать точечной, то фазовый фронт волны имеет форму сферы, а принимаемые на разнесенных позициях сигналы жестко связаны по фазе и когерентны. При протяженных целях фазовый фронт формируется в процессе интерференции электромагнитных волн от локальных центров отражения («блестящих» точек) цели. Большая протяженность цели приводит к флуктуациям фазового фронта, которые могут нарушить пространственную когерентность (корреляцию) сигналов, принятых на разнесенных позициях.

При однородной среде распространения и малой базе ($B \rightarrow 0$) сигналы на входе приемных устройств идентичны и когерентны. С увеличением базы сигналы начинают различаться в основном из-за многолепесткового характера диаграммы обратного рассеяния (ДОР) цели. При некотором размере базы

$$B_j = D\lambda / 4l_u, \quad (3.1)$$

где D – дальность до цели, l_u – наибольший размер цели, приемные позиции принимают отраженные от цели сигналы по разным лепесткам ДОР. Эти сигналы независимы и не коррелированы.

Пространственно-когерентные РЛС извлекают всю информацию, содержащуюся в пространственной структуре поля РВ, вплоть до фазовых соотношений. В этих РЛС фазовые набегі в каналах приема и обработки сигналов различных пространственных позиций одинаковы в интервалах времени, намного превышающих длительность сигнала (истинно когерентные системы). Поэтому аппаратура позиций синхронизируется во времени, а также по частоте и фазе высокочастотных колебаний. Разнесенные позиции образуют специфически расположенную ФАР.

Системы с кратковременной пространственной когерентностью имеют постоянство фазовых соотношений в трактах аппаратуры позиций в пределах длительности используемого сигнала (псевдокогерентные системы). При этом можно извлекать информацию о доплеровских частотах по изменению фаз в пределах длительности сигнала, но нельзя осуществлять фазовую пеленгацию, поскольку принимаемые на позициях сигналы некогерентны в один и тот же момент времени. Аппаратура позиций синхронизируется по времени и частоте, но не по фазе.

Пространственно-некогерентные РЛС обрабатывают сигналы после их детектирования, но до объединения в пункте обработки информации МПРЛС. Здесь не требуется синхронизация аппаратуры позиций по частоте и фазе. Нужно отметить, что пространственная некогерентность не противоречит временной когерентности сигналов, поступающих в аппаратуру каждой позиции. Поэтому на каждой позиции можно измерять радиальную составляющую скорости по доплеровскому сдвигу частоты.

В пункте обработки информации возможно объединение когерентных сигналов (когерентное объединение), видеосигналов, обнаруженных отметок и единичных замеров (результатов однократного измерения параметров сигнала и других элементов), а также объединение траекторий.

Когерентное объединение – наивысший уровень объединения информации. Радиочастотные сигналы от позиций МПРЛС поступают на центральный пункт обработки информации, где выполняются все операции обнаружения, отождествления и определения параметров движения цели и ее местоположения. Система, в которой осуществляется когерентное объединение сигналов, обладает наибольшими возможностями, так как в ней можно использовать пространственную когерентность сигналов, при которой отсутствуют случайные изменения разности фаз сигналов, принимаемых на позициях МПРЛС. Такая система отличается наибольшей простотой аппаратуры приемных позиций, однако усложняется ПОИ и требуются широкополосные линии передачи сигналов с высокой пропускной способностью.

Объединение траекторий – низший уровень объединения информации. С позиций сигналы поступают после вторичной обработки и отбраковки ложных отметок целей, поэтому большинство вычислительных операций выполняется на позициях МПРЛС, аппаратура которых наиболее сложна. Аппаратура центра обработки информации упрощается, и линии связи работают в наиболее легких условиях.

Таким образом, по характеру размещения частей аппаратуры в пространстве различают однопозиционные, двухпозиционные (бистатические) и многопозиционные РЛС. В МПРЛС обработка информации производится в несколько этапов, а затем объединяется. Чем выше уровень объединения информации, т.е. чем меньше информации теряется на приемных позициях до совместной обработки, тем выше энергетические и информационные возможности МПРЛС, но тем сложнее аппаратура центрального пункта обработки и выше требования к пропускной способности линий передачи информации.

Заключение

1. Радиолокационные средства характеризуются широтой и многообразием применения.

2. Простейшая РЛС состоит Прд, Прм, антенного устройства, вычислительного устройства и УОИ.

3. Помимо обнаружения объектов, УОИ РЛС выводит и другую информацию о целях, позволяющую идентифицировать объекты.

4. По характеру размещения частей аппаратуры в пространстве различают однопозиционные, двухпозиционные (бистатические) и многопозиционные РЛС.

5. В МПРЛС обработка информации производится в несколько этапов, а затем объединяется. Чем выше уровень объединения информации, т.е. чем меньше информации теряется на приемных позициях до совместной обработки, тем выше энергетические и информационные возможности МПРЛС, но тем сложнее аппаратура центрального пункта обработки и выше требования к пропускной способности линий передачи информации.

На самоподготовке необходимо подготовиться к контрольной работе по следующим вопросам:

1. Классификация РЛС.
2. Структурная схема и функционирование простейшей РЛС.
3. Структурная схема и функционирование современной импульсной РЛС.
4. Структурная схема и функционирование РЛС обнаружения воздушных целей.
5. Структуры построения МПРЛС.
6. Обработка информации в МПРЛС.

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ВОЕННАЯ КАФЕДРА



Дисциплина «Военно-специальная подготовка»
(наименование дисциплины)

Военная специальность 530200 «Математическое и программное
(наименование специальности)
обеспечение функционирования автоматизированных систем»

Тема лекции № 6.10 «Дальность действия радиолокационных систем»
(номер и наименование лекции)

Москва – 2010

Введение

Одной из основных задач при проектировании РЛС является расчет максимальной дальности обнаружения, которая также является одним из важнейших тактических показателей системы. При противоборстве очень важно, какая из сторон быстрее обнаружит соответствующий объект. От этого в основном зависит исход этого противоборства. Поэтому рассмотрение основных факторов, влияющих на дальность действия радиолокационных устройств и систем, является весьма актуальным.

Для достижения поставленных целей рассмотрим следующие вопросы:

1. Максимальная дальность действия активной радиолокации по пассивным целям.
2. Дальность действия радиолокационной станции с активным ответом.
3. Эффективная площадь рассеяния объектов.
4. Влияние условий распространения радиоволн на дальность действия радиолокационной станции.

Данный учебный материал можно найти в следующих **источниках**:

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004.
2. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М.: Советское радио, 1975.

1. Максимальная дальность действия активной радиолокации по пассивным целям

Данную задачу рассмотрим для импульсной РЛС, антенна которой при коэффициенте направленного действия (КНД) K_A излучает импульсную мощность P_u в направлении на цель, удаленную на расстояние D от РЛС. Допустим сначала, что в пространстве, окружающем цель, нет потерь энергии.

Если бы антенна РЛС была ненаправленной, то на сфере радиуса D излучаемая мощность равномерно распределилась по поверхности $4\pi D^2$. Реальная антенна направленная, и за счет этого плотность потока мощности у цели в K раз больше:

$$P_u = P_u K_A / 4\pi D^2. \quad (4.1)$$

Энергия прямой волны частично поглощается, а частично рассеивается целью. Всякая реальная цель обладает направленностью вторичного излучения и ее отражающие свойства в направлении к РЛС оцениваются некоторой средней эффективной площадью рассеяния (ЭПР) $S_{эфц}$. Значит, мощность отраженной волны представляется произведением $P_u S_{эфц}$, а плотность потока мощности $P_{прм}$ в месте расположения приемной антенны

$$P_{прм} = P_u S_{эфц} / 4\pi D^2 = P_u K_A S_{эфц} / (4\pi)^2 D^4. \quad (4.2)$$

Приемная антенна в соответствии со своей эффективной площадью $S_{эфА}$ подводит к согласованному с ней приемнику мощность сигнала

$$P_c = P_{прм} S_{эфА} = P_u K_A S_{эфц} S_{эфА} / (4\pi)^2 D^4. \quad (4.3)$$

Это выражение называют *основным уравнением радиолокации*. Оно устанавливает зависимость между мощностью принимаемого сигнала P_c и мощностью излучения P_u при активной радиолокации по пассивным целям. Как видно из уравнения, с увеличением дальности до цели D мощность сигнала, подводимого к приемнику, убывает очень быстро — в четвертой степени от дальности. Такой большой динамический диапазон мощностей принимаемых сигналов требует применения эффективной автоматической регулировки усиления (АРУ) в приемнике. Но главный вывод другой: *так как мощность шумов от дальности D не зависит, то отношение сигнал/шум с увеличением D уменьшается так же быстро, как уровень сигнала, т. е. обратно пропорционально D^4 .*

Мощность сигнала цели P_c , убывая с расстоянием, достигает порога $P_{с мин}$ при $D = D_{макс}$. Это значит, что более удаленная цель не видна с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги:

$$P_{с мин} = P_u K_A S_{эфц} S_{эфА} / (4\pi)^2 D_{макс}^4. \quad (4.4)$$

Известно [2: с. 35], что для приемника с эффективной полосой пропускания $\Delta f_3 = 1/\tau_u$ мощность порогового сигнала равна

$$P_{с мин} = m_p k T_0 K_{ш} \Delta f_3 = m_p k T_0 K_{ш} / \tau_u, \quad (4.5)$$

где m_p — коэффициент различимости; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ — постоянная Больцмана; $T_0 = 290 \text{ K}$ — комнатная температура; $K_{ш}$ — коэффициент шума приемника.

Подставляя $P_{с мин}$ из (4.5) в (4.4), получаем так называемое *уравнение дальности*

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_u K_A S_{\text{эфц}} S_{\text{эфА}}}{4\pi^2 P_{\min}}} = \sqrt[4]{\frac{P_u \tau_u K_A S_{\text{эфц}} S_{\text{эфА}}}{4\pi^2 m_p k T_0 K_{\text{ш}}}}. \quad (4.6)$$

Если учесть, что в импульсных РЛС одна и та же антенна используется в качестве передающей и приемной, а коэффициент направленного действия K_A и эффективная площадь $S_{\text{эфА}}$ антенны связаны зависимостью

$$K_A = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_{\text{эфА}}, \quad (4.7)$$

то уравнению (4.6) можно придать вид

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_u \tau_u S_{\text{эфА}}^2 S_{\text{эфц}}}{4\pi m_p k T_0 K_{\text{ш}} \lambda^2}} \quad (4.8)$$

или

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_u \tau_u K_A^2 S_{\text{эфц}} \lambda^2}{4\pi^2 m_p k T_0 K_{\text{ш}}}}. \quad (4.9)$$

Из выражений (4.8), (4.9) следуют выводы.

1. Дальность действия РЛС тем больше, чем больше энергия радиоимпульса, излучаемая передающей антенной, $P_u \tau_u$, и с этой точки зрения безразлично, будет ли увеличена энергия за счет мощности излучения P_u или длительности τ_u импульсов. Заметим, что

$$P_u = P_{\text{ин}} \eta_A, \quad (4.10)$$

где $P_{\text{ин}}$ — мощность передатчика в импульсе, а η_A — КПД антенны.

2. Увеличение $D_{\max}$ повышением отношения $P_{\text{ин}} / P_{\min}$, которое называется *энергетическим потенциалом РЛС*, связано с большими трудностями, так как это отношение входит в формулу дальности под корнем четвертой степени. Например, увеличение дальности $D_{\max}$ в два раза достигается ценой увеличения мощности передатчика $P_{\text{ин}}$ или чувствительности приемника (уменьшения $P_{\min}$) в $2^4=16$ раз.

3. Большой эффект дает увеличение геометрической S_A , а следовательно, и эффективной $S_{\text{эфА}}$ площади антенны (они связаны зависимостью $S_{\text{эфА}} \approx (0,5 \dots 0,75) S_A$). Например, как показывает формула (4.8), для увеличения дальности $D_{\max}$ в два раза достаточно увеличить площадь антенны в четыре раза.

4. Максимальная дальность радиолокации *обратно пропорциональна* $\sqrt{\lambda}$, если эффективная площадь антенны $S_{\text{эфА}}$ остается постоянной (4.8), и *пропорциональна* $\sqrt{\lambda}$, если неизменным остается КНД антенны K_A (4.9). Здесь нет противоречия: в первом случае уменьшение длины волны при постоянной $S_{\text{эфА}}$ увеличивает дальность $D_{\max}$ за счет увеличения КНД антенны (4.7), а во втором случае увеличение длины волны увеличивает дальность действия РЛС из-за того, что для сохранения неизменным коэффициента K_A нужно еще в большей мере (пропорционально λ^2) увеличить эффективную площадь антенны $S_{\text{эфА}}$. Стационарные РЛС проектируют на более длинные волны, чем самолетные РЛС того же назначения, так как на самолетах значительно меньше возможностей для размещения громоздких антенн.

5. Максимальная дальность действия РЛС зависит от размеров и отражающих свойств цели ($S_{эфц}$) и, разумеется, одна и та же РЛС способна обнаружить линкор, например, на значительно большем расстоянии $D_{макс}$, чем истребитель.

6. Обработка сигналов должна быть по возможности оптимальной, а потери, вызванные несовершенством аппаратуры, должны быть сведены к минимуму, чтобы коэффициент различимости m_p был как можно меньше.

2. Дальность действия радиолокационной станции с активным ответом

Условимся все величины, относящиеся к запросчику, дополнять индексом «з», а относящиеся к ответчику — индексом «о». При этом плотность потока мощности у цели, снабженной ответчиком и удаленной от запросчика на расстояние D , записывается в виде

$$\Pi_z = P_{из} K_{Az} / 4\pi D^2, \quad (4.11)$$

где $P_{из}$ — мощность излучения запросчика; K_{Az} — КНД антенны запросчика.

Умножив Π_z на эффективную площадь антенны ответчика $S_{эфAo}$, получим мощность запросного сигнала на входе приемника ответчика:

$$P_{co} = \Pi_z S_{эфAo} = P_{из} K_{Az} S_{эфAo} / 4\pi D^2. \quad (4.12)$$

Максимальная дальность действия канала запроса ($D = D_{зо}$) соответствует порогу приемника ответчика ($P_{co} = P_{co мин}$):

$$P_{co мин} = P_{из} K_{Az} S_{эфAo} / 4\pi D_{зо}^2. \quad (4.13)$$

Выразив эффективную площадь антенны ответчика через ее КНД и длину волны запросного сигнала ($S_{эфAo} = K_{Ao} \lambda_z^2 / 4\pi$), представим максимальную дальность действия этого канала:

$$D_{зо} = \sqrt{P_{из} K_{Ao} K_{Az} \lambda_z^2 / 4\pi P_{co мин}}. \quad (4.14)$$

По аналогии выразим максимальную дальность системы по каналу ответа

$$D_{оз} = \sqrt{P_{ио} K_{Ao} K_{Az} \lambda_o^2 / 4\pi P_{сз мин}}. \quad (4.15)$$

Характерно, что в полученных формулах фигурирует корень квадратный, а для систем с пассивным ответом — корень четвертой степени. Этим подтверждается, что *действия систем с активным ответом при прочих равных условиях значительно больше дальности активной радиолокации по пассивным целям.*

Проектируя систему с активным ответом, стремятся ее сбалансировать, т. е. уравнивать дальности по запросному и ответному каналам, так как при неравенстве $D_{зо}$ и $D_{оз}$ дальность действия системы определяется меньшей из этих величин.

Согласно (4.14) и (4.15) в сбалансированной системе ($D_{зо} = D_{оз}$) имеем

$$P_{из} P_{сз мин} \lambda_z^2 = P_{ио} P_{со мин} \lambda_o^2. \quad (4.16)$$

Выполнение этого условия облегчается тем, что одна из станций, обычно запросчика, стационарная: в ней можно использовать более мощный передатчик ($P_{из} > P_{ио}$) и более чувствительный приемник ($P_{сз\ мин} < P_{сомин}$), обеспечив этим равенство (4.16).

Таким образом, при активной радиолокации с активным ответом необходимых энергетических соотношений добиться проще из-за активного характера цели.

3. Эффективная площадь рассеяния объектов

Радиолокационные цели можно разделить на элементарные и сложные. *Элементарные цели* имеют простейшую форму: предполагается, что они изготовлены из металла и полностью отражают ЭМВ. ЭПР элементарных целей вычисляются из простых соотношений. *Сложные цели* — это самолеты, корабли, земная и водная поверхности, в общем, все те объекты, ЭПР которых можно определить только экспериментально или в результате сложных расчетов, выполняемых с помощью цифровых вычислительных машин.

Рассмотрим сначала элементарные цели: шар, полуволновой вибратор, плоский лист и уголкового отражатель. Поскольку это вторичные излучатели, к ним применимы такие понятия теории антенн, как КНД цели в направлении РЛС $K_{ц}$ и эффективная площадь цели с учетом ($S_{эфц}$) и без учета ($S_{эфц}'$) ее направленности, причем

$$S_{эфц} = K_{ц} S_{эфц}'. \quad (4.17)$$

Шар, радиус которого a значительно больше длины волны λ . При соотношении $a \gg \lambda$ дифракции практически нет: волны не огибают шар и перекрываются только его поперечным сечением πa^2 . Отсюда эффективная площадь шара $S_{эфц}' = \pi a^2$, но так как шар направленными свойствами не обладает ($K_{ц} = 1$), то его ЭПР

$$S_{эфц} = K_{ц} S_{эфц}' = \pi a^2. \quad (4.18)$$

Цель в виде полуволнового вибратора. Такая цель (рис. 4.1) имеет ЭПР

$$S_{эфц} = 0,86 \lambda^2 \sin^2 \theta \cos^2 \gamma, \quad (4.19)$$

где θ — зенитный угол, т. е. угол между осью вибратора OO' и направлением потока мощности Π принимаемой ЭМВ; γ — угол между вектором напряженности электрического поля E и осью вибратора (вектор напряженности магнитного поля H , показанный на рисунке, ориентирован в соответствии с векторами E и Π).

В формуле (4.19) учтены направленные свойства и поляризация вибратора: с увеличением зенитного угла θ от 0 до 90° КНД полуволнового вибратора возрастает от 0 до 1,64. Такое же увеличение угла γ уменьшает э. д. с, наводимую в вибраторе, от максимума до нуля, так как наибольшая э. д. с. получается, когда вектор E параллелен оси вибратора, а когда они взаимно перпендикулярны, э. д. с. вовсе не наводится. Увеличение длины волны λ ,

равносильное удлинению полуволнового вибратора, увеличивает наводимую э.д.с и мощность отраженных от вибратора волн,

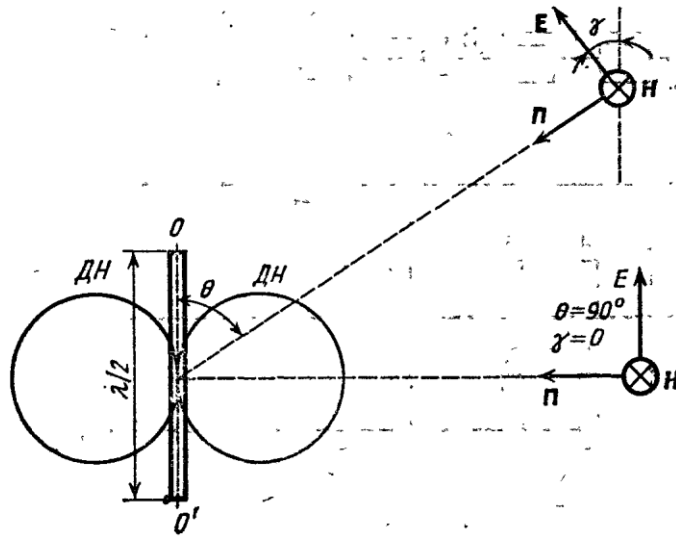


Рис. 4.1. Определение ЭПР полуволнового вибратора

Если волны, излучаемые РЛС, поляризованы таким образом, что вектор E находится в меридиональной плоскости вибратора (эта плоскость проходит через ось OO'), то $\gamma = \pi/2 - \theta$ и формула (4.19) упрощается:

$$S_{эфц} = 0,86 \lambda^2 \sin^2 \theta \cos^2(\pi/2 - \theta) = 0,86 \lambda^2 \sin^4 \theta. \quad (4.20)$$

При $\theta = 90^\circ$ и $\gamma = 0^\circ$ ЭПР полуволнового вибратора достигает максимума: $S_{эфц \text{ макс}} = 0,86 \lambda^2$. В реальных условиях углы θ и γ принимают любые значения и поэтому эффективная площадь $S_{эфц}$ с равной вероятностью принимает значения от 0 до $0,86 \lambda^2$.

Цель в виде прямоугольной площадки со сторонами a и b (рис. 4.2). Если направление на РЛС перпендикулярно данной площадке, то падающая ЭМВ облучает его геометрическую площадь ab равномерно и синфазно. Значит, падающая волна полностью перехватывается площадкой ($S_{эфц}' = ab$), которой, как известно из теории антенн, соответствует максимальный КНД $K_{ц \text{ макс}} = 4\pi ab / \lambda^2$. Перемножая $S_{эфц}'$ и $K_{ц \text{ макс}}$ получаем максимальную ЭПР листа

$$S_{эфц \text{ макс}} = S_{эфц}' K_{ц \text{ макс}} = ab(4\pi ab / \lambda^2) = 4\pi (ab)^2 / \lambda^2. \quad (4.21)$$

КНД цели при отклонении направления РЛС — цель от перпендикуляра к площадке изменяется весьма значительно в соответствии с ДН прямоугольной площадки, имеющей многолепестковую структуру. Это приводит к примерно такому же изменению эффективной отражающей площади цели $S_{эфц}$. Таким образом, в данном случае наблюдается еще большее, чем в предыдущем случае, влияние на $S_{эфц}$ ориентации отражающей поверхности цели относительно направления РЛС — цель.

Угловой отражатель. Искусственными целями могут служить, например, трехгранные отражатели со взаимно перпендикулярными сторонами

(рис. 4.3). При облучении одной грани волны от нее отражаются ко второй, затем к третьей и обратно к РЛС. Такая концентрация отраженных волн соблюдается для всех лучей, падающих в заштрихованный на рисунке шестиугольник с размером a внешней стороны одной грани.

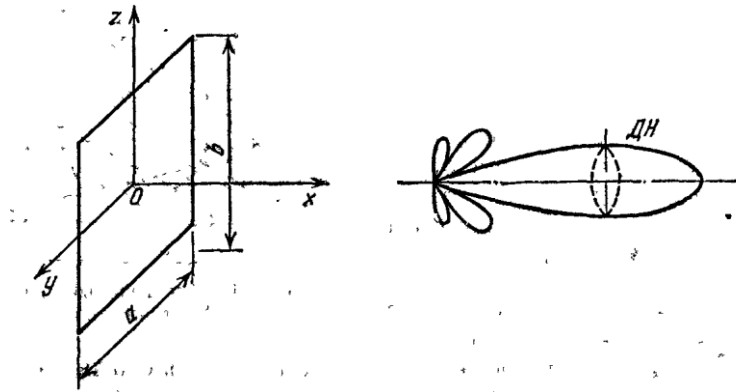


Рис. 4.2. Определение ЭПР прямоугольной площадки

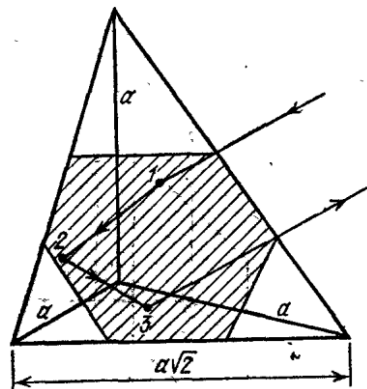


Рис. 4.3. Определение ЭПР трехгранного уголкового отражателя

Следовательно, уголкового отражателя эквивалентен плоской пластине, нормальной падающему лучу и имеющей площадь заштрихованного шестиугольника $S_{эфц} = a^2/\sqrt{3}$. Соответственно КНД пластины

$$K_u = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left(\frac{a^2}{\sqrt{3}} \right), \quad (4.22)$$

а ЭПР уголкового отражателя

$$S_{эфц} = S_{эфц}' K_u = \frac{a^2}{\sqrt{3}} \frac{4\pi a^2}{\sqrt{3}\lambda^2} = \frac{4}{3} \frac{\pi a^4}{\lambda^2}. \quad (4.23)$$

Пример 4.1. Сравнить ЭПР металлических элементарных целей в виде шара радиусом a , полуволнового вибратора, квадратного листа со стороной a и трехгранного уголкового отражателя, причем длина волны $\lambda = 3$ см и размер $a = 30$ см.

ЭПР шара

$$S_{эфц} = \pi a^2 = 3,14 \cdot 0,3^2 = 0,28 \text{ м}^2,$$

полуволнового вибратора (в максимуме)

$$S_{эфц \text{ макс}} = 0,86 \lambda^2 = 0,86 \cdot 0,03^2 = 7,74 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

квадратного листа (в максимуме)

$$S_{эфц \text{ макс}} = 4\pi(ab)^2/\lambda^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot 0,3^4/0,03^2 = 113 \text{ м}^2,$$

и уголкового отражателя

$$S_{эфц} = 4\pi a^4/3\lambda^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot 0,3^4/3 \cdot 0,03^2 = 37,7 \text{ м}^2.$$

Следует обратить внимание на то, что даже, при сравнительно малых размерах трехгранный отражатель имеет большую ЭПР и не только при облучении по нормали, но и при значительном отклонении от нее — до 45° в отличие от прямоугольной пластины.

Сложные цели. Большинство реальных радиолокационных целей имеет сложную конфигурацию и состоит из множества простых отражателей. Волны, отраженные от них, интерферируют, и в результате этого амплитуда и фаза радиолокационного сигнала оказываются а большей мере зависящими от взаимного расположения РЛС и цели. Диаграмма переизлучения получается многолепестковой с шириной отдельных лепестков порядка десятых долей градуса.

Для движущейся цели, особенно при ее маневрировании, характерны хаотическое изменение положения отражающих элементов цели относительно РЛС и, как следствие, случайные пульсации ЭПР (рис. 4.4). Эти флуктуации достигают десятков децибел и имеют спектр частот от нуля до сотен герц. Наиболее интенсивные флуктуации наблюдаются на частотах, меньших 10 Гц.

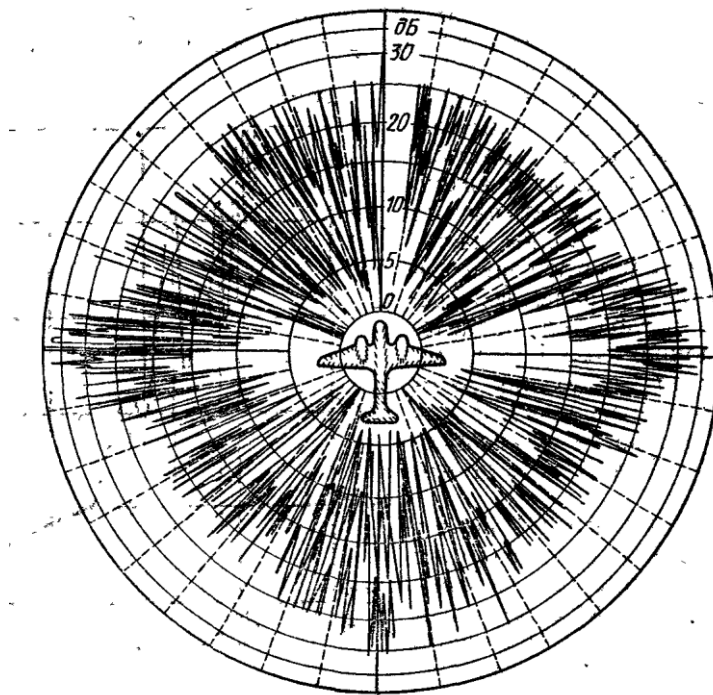


Рис. 4.4. Диаграмма ЭПР двухмоторного самолета

Таким образом, в радиолокации не только шумы, но и сигналы имеют случайный характер, и это снижает эффективность обнаружения целей.

4. Влияние условий распространения радиоволн на дальность действия радиолокационной станции

Влияние на дальность действия РЛС внешних условий обусловлено поглощением и рассеянием РВ в атмосфере, отражением их от Земли и атмосферной рефракцией.

Уменьшение дальности действия РЛС вследствие поглощения и рассеяния РВ. Если бы атмосфера не содержала гидрометеоров, то электромагнитная энергия поглощалась только имеющимися в тропосфере газами. Энергия РВ вызывает в молекулах газов переход электронов с одного энергетического уровня на другой. Так как внутриатомным переходам свойственны собственные частоты, то когда с какой-либо из них совпадает частота распространяемой волны, наступает резонанс и поглощение резко возрастает. В парах воды резонансное поглощение происходит при длинах волн $\lambda = 1,7$ мм (коэффициент затухания $\alpha = 14$ дБ/км) и $\lambda = 1,35$ см ($\alpha = 0,1$ дБ/км), а в кислороде — при $\lambda = 1,7$ мм ($\alpha = 12$ дБ/Км) (рис. 4.5).

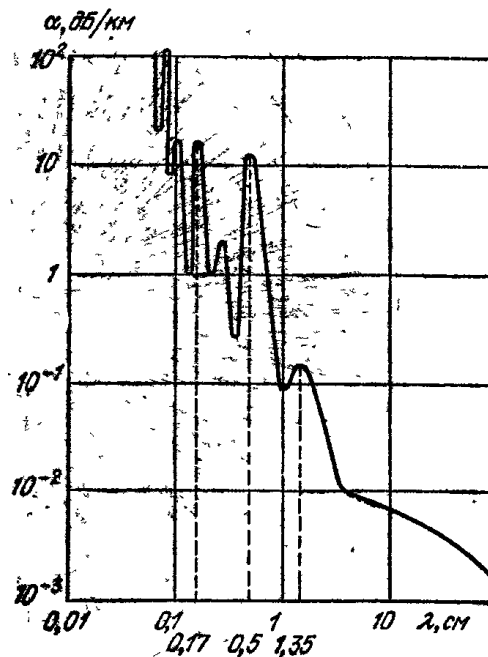


Рис. 4.5. Зависимость коэффициента затухания РВ в атмосфере от частоты

Если же в атмосфере имеются осадки, то ЭМВ вызывают в каплях влаги токи смещения, которые становятся источниками вторичного излучения. Тем самым энергия волн рассеивается вне прямой, соединяющей РЛС с целью. Одновременно происходит поглощение энергии РВ, поскольку частицы влаги

имеют некоторую активную проводимость. Чем больше частота и интенсивность осадков, тем больше потери энергии.

В диапазоне волн, применяемых в радиолокации, затухание в атмосфере становится значительным при $\lambda < 3$ см, а на миллиметровых волнах оно играет решающую роль: только небольшое «окно» между частотами резонансного поглощения (на волне $\lambda \approx 8,7$ мм) удастся использовать для радиолокации.

Допустим, что на всем пути РЛС — цель — РЛС протяженностью $2D_{\text{макс}}$ [км] происходит поглощение энергии РВ при одинаковом коэффициенте затухания α [дБ/км], т. е. общее затухание равно $2\alpha D_{\text{макс}}$ [дБ]. Так как 1 дБ равен одной десятой единицы измерения десятичного логарифма отношения мощностей — бела, то это значит, что мощность принимаемого сигнала уменьшилась за счет поглощения в атмосфере от P_c до $P_c \cdot 10^{-0,2\alpha D_{\text{макс}}}$ и поскольку эта мощность входит в уравнения дальности под корнем четвертой степени, то уравнения следует дополнить множителем

$$\sqrt[4]{10^{-0,2\alpha D_{\text{макс}}}} = 10^{-0,05\alpha D_{\text{макс}}} \quad (4.24)$$

Атмосферная рефракция и ее влияние на дальность радиолокации. Максимальная дальность, вычисленная по приведенным формулам, не всегда может быть реализована из-за сферичности земной поверхности. Если бы тропосфера была однородной, РВ распространялись бы прямолинейно (луч OM_1 на рис. 4.6) и предельная дальность радиолокации $D_{\text{пред}}$ ограничивалась геометрической видимостью согласно формуле

$$D_{\text{пред}} [\text{км}] = 3,57(\sqrt{h} + \sqrt{H}), \quad (4.25)$$

где h — высота антенны РЛС; H — высота цели.

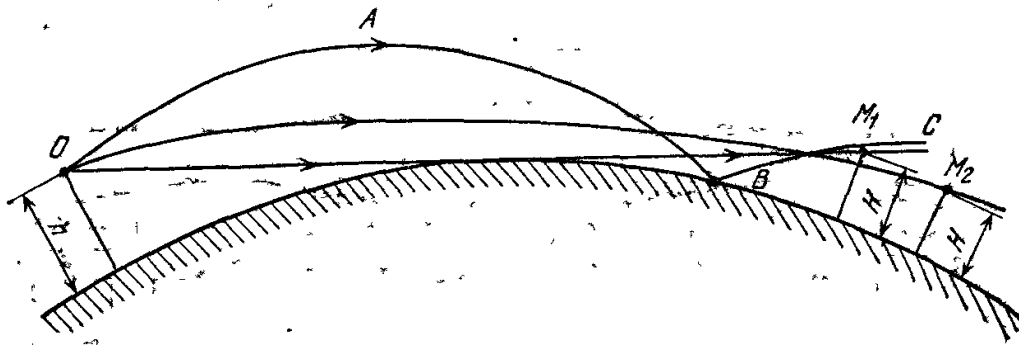


Рис. 4.6. Распространение РВ в тропосфере

В действительности тропосфера неоднородна: с высотой температура, давление и влажность воздуха изменяются, а это влечет за собой изменение показателя преломления и искривление лучей РВ. В нормальных атмосферных условиях лучи искривляются в сторону Земли таким образом (OM_2), что при тех же высотах РЛС h а цели H предельная дальность радиолокации возрастает на 17%:

$$D_{\text{пред}} [\text{км}] = 4,1 (\sqrt{h} + \sqrt{H}), \quad (4.26)$$

Когда с высотой температура повышается, а влажность резко уменьшается, показатель преломления настолько быстро убывает по высоте, что возникает *сверхрефракция*. Наиболее ярко сверхрефракция проявляется в образовании атмосферного волновода: РВ многократно отражаются от Земли и от определенного уровня тропосферы (ОАВС). Это, естественно, резко увеличивает возможности радиообнаружения, но поскольку сверхрефракция явление необычное, нельзя рассчитывать предельную дальность радиолокации с учетом ее.

Советский ученый Н. И. Кабанов в 1946 г. обнаружил, что лучи коротковолнового диапазона ($\lambda=10\ldots 100$ м) после отражения от ионосферы облучают цель (земную поверхность), рассеиваются ею и частично возвращаются по тому же пути к РЛС. Это позволяет осуществить радиолокацию наземных или возвышающихся над Землей целей, расположенных за горизонтом. Такие коротковолновые РЛС в принципе могут обнаружить старт баллистической, ракеты или ядерный взрыв за линией горизонта по сигналу, отраженному от ионизированного воздуха. Например, в США таким способом был обнаружен ядерный взрыв, произведенный на расстоянии 12 000 км от РЛС.

Таким образом, реальная дальность действия РЛС меньше данного показателя в свободном пространстве из-за поглощения и рассеяния РВ в атмосфере, отражения их от Земли и атмосферной рефракции.

Заключение

1. Дальность действия РЛС тем больше, чем больше энергия радиоимпульса, излучаемая передающей антенной, эффективная площадь антенны, ЭПР цели и чем меньше коэффициент шума приемника.

2. При активной радиолокации с активным ответом необходимых энергетических соотношений добиться проще из-за активного характера цели.

3. В радиолокации не только шумы, но и сигналы имеют случайный характер, и это снижает эффективность обнаружения целей.

4. Реальная дальность действия РЛС меньше данного показателя в свободном пространстве из-за поглощения и рассеяния РВ в атмосфере, отражения их от Земли и атмосферной рефракции.

На самоподготовке необходимо подготовиться к контрольной работе по следующим вопросам:

1. Вывод максимальной дальности действия для активной радиолокации по пассивным целям.

2. Основные факторы, влияющие на максимальную дальность действия для активной радиолокации по пассивным целям.

3. Дальность действия для РЛС с активным ответом.

4. ЭПР шара и полуволнового вибратора.

5. ЭПР прямоугольной площадки и уголкового отражателя.

6. Сравнение ЭПР различных стандартных целей.

7. Уменьшение дальности действия РЛС из-за поглощения и рассеяния РВ.

8. Изменение дальности действия РЛС из-за атмосферной рефракции.

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ВОЕННАЯ КАФЕДРА



Дисциплина «Военно-специальная подготовка»
(наименование дисциплины)

Военная специальность 530200 «Математическое и программное
(наименование специальности)
обеспечение функционирования автоматизированных систем»

Тема лекции № 6.11 «Обработка радиолокационной информации»
(номер и наименование лекции)

Москва – 2010

Введение

Основной задачей радиолокации является сбор и обработка информации относительно зондируемых объектов. В многопозиционных наземных РЛС, как нам известно, вся обработка радиолокационной информации подразделяется на три этапа. *Первичная обработка* заключается в обнаружении сигнала цели и измерении ее координат с соответствующими качеством или погрешностями. *Вторичная обработка* предусматривает определение параметров траектории каждой цели по сигналам одной или ряда позиций МПРЛС, включая операции отождествления отметок целей. При *третичной обработке* объединяются параметры траекторий целей, полученных различными приемными устройствами МПРЛС с отождествлением траекторий.

Содержание данных этапов свидетельствует об их важности и необходимости для создания полной картины о воздушной обстановке. Поэтому рассмотрение сущности всех видов обработки радиолокационной информации является весьма актуальным.

Для достижения поставленных целей рассмотрим следующие вопросы:

1. Первичная обработка радиолокационной информации.
2. Вторичная обработка радиолокационной информации.
3. Третичная обработка радиолокационной информации.

Данный учебный материал можно найти в следующих **источниках**:

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004.
2. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М.: Советское радио, 1975.

1. Первичная обработка радиолокационной информации

Для автоматизации процессов управления авиацией необходимо иметь исчерпывающую и непрерывно обновляющуюся информацию о координатах и характеристиках воздушных целей. Эту информацию в автоматизированных системах управления (АСУ) получают с помощью средств, входящих в подсистему сбора и обработки радиолокационной информации (РЛИ), а именно: постов и центров обработки РЛИ, авиационных комплексов радиолокационного дозора и наведения. Основными средствами получения сведений о воздушных целях являются РЛС. Процесс получения сведений об объектах, находящихся в зоне видимости РЛС, называется обработкой РЛИ. Такая обработка позволяет получать данные о координатах цели, параметрах ее траектории, времени локации и др. Совокупность сведений о цели условно называют отметкой. В состав отметок, кроме указанных выше данных, могут входить сведения о номере цели, ее государственной принадлежности, количестве, типе, важности и др.

Сигналы, которые несут необходимую для оператора информацию, называют полезными, но на них, как правило, обязательно накладываются помехи, искажающие информацию. В связи с этим в процессе обработки возникают задачи выделения полезных сигналов и получения необходимых сведений в условиях помех.

Обработка информации основывается на существовании различий между полезным сигналом и помехой. Весь процесс обработки РЛИ можно разделить на три основных этапа: первичную, вторичную и третичную обработку.

На этапе первичной обработки РЛИ цель обнаруживают и определяют ее координаты. Первичная обработка осуществляется по одной, но чаще по нескольким смежным разверткам дальности. Этого хватает для обнаружения цели и определения ее координат. Таким образом, первичной обработкой РЛИ называется обработка информации за один период обзора РЛС. В состав первичной обработки РЛИ включают:

- обнаружение полезного сигнала в шумах;
- определение координат цели;
- кодирование координат цели;
- присвоение номеров целям.

До недавнего времени эту задачу решал оператор РЛС. Но в настоящее время в реальных условиях слежения по индикаторам за многими целями, движущимися с большими скоростями, человек – оператор не в состоянии оценивать многообразие воздушной обстановки, пользуясь только визуальным способом. В связи с этим возникла проблема передачи части или всех функций человека – оператора при обработке РЛИ вычислительным средствам, которые были созданы на объектах АСУ авиацией.

Первичная обработка РЛИ начинается с обнаружения полезного сигнала в шумах. Этот процесс складывается из нескольких этапов: обнаружение

одиноким сигналом; обнаружение пакета сигналов; формирование полного пакета сигналов; определение дальности до цели и ее азимута. Все эти этапы реализуются с использованием оптимальных алгоритмов, основанных на критериях минимума ошибок принятия решения и результатов измерения.

Таким образом, операции, производимые при первичной обработке, может производить РЛС самостоятельно.

2. Вторичная обработка радиолокационной информации

Единичная отметка от цели лишь приблизительно отражает истинное положение цели в момент локации. По ней еще нельзя принять достоверного решения об обнаружении цели, тем более судить о параметрах движения цели. В связи с этим становится очевидным, что первичная обработка не дает исчерпывающей информации о целях, находящихся в зоне обзора РЛС. Чтобы принять правильное решение о наличии цели и определить параметры ее движения, необходимо проанализировать информацию, полученную за несколько периодов обзора. Именно так и поступает оператор, наблюдающий за экраном индикатора. Если в какой-либо точке экрана появилась одиночная отметка, оператор фиксирует ее как возможную цель. Если в следующем обзоре отметка появилась вновь и, кроме того, сдвинулась на некоторое расстояние, то уже имеется основание для принятия решения об обнаружении цели. Одновременно можно определить направление и скорость движения цели. Операции, выполняемые оператором, могут быть формализованы, а их выполнение возложено на специализированную ЭВМ. При этом возможны полуавтоматическая и автоматическая системы обработки информации.

Автоматическая или полуавтоматическая обработка информации, полученной за несколько периодов обзора РЛС с целью обнаружения и непрерывного сопровождения траекторий целей, называется вторичной обработкой радиолокационной информации.

Она включает в себя следующие операции:

определение параметров движения целей (курс, скорость, ускорение и т. д.) по данным, полученным за несколько обзоров РЛС;

выделение области пространства, в которой с некоторой вероятностью ожидается появление отметки в следующем обзоре (экстраполяция отметок);

сличение экстраполированных координат с вновь полученными и привязка новой отметки к траектории цели (продолжение траектории).

Основными данными, *определяющими траекторию движения цели*, являются пространственные координаты отметок цели, изменение которых соответствует закону движения цели в пространстве. Траектория движения цели зависит от многих факторов и условий, таких, как тип цели, высота полета, скорость, маневренные возможности и т. п. Кроме того, на траекторию полета оказывает влияние цели ряд случайных факторов, под которыми

подразумеваются все причины, искажающие траекторию или затрудняющие ее обнаружение и воспроизведение.

Перечисленные и некоторые другие факторы вынуждают отнести движение целей к категории процессов со случайно изменяющимися во времени параметрами. Очевидно, для статистического описания таких процессов необходимо знать законы распределения вероятности параметров, определяющих эти процессы. Однако практически таких законов получить не удастся, поэтому приходится задаваться некоторыми гипотезами о статистических характеристиках обрабатываемых сигналов, т.е. исходить из более или менее правдоподобной статистической модели движения цели.

Если устройство предназначено для обработки траекторий самолетов или крылатых ракет, то модели их движения представляют собой совокупность участков с прямолинейным и равномерным движением и участков маневра. Для такого рода устройств за основу может быть взята полиномиальная модель движения. Она основана на представлении процесса изменения координат цели на ограниченном участке наблюдения в виде полинома степени n относительно времени:

$$y(t) = \sum_{i=0}^n b_i t^i = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \dots + b_n t^n, \quad (5.1)$$

где b_i – коэффициент, определяющий параметры траектории, на которые накладываются те или иные ограничения.

Исходя из характера движения целей, формируются три основных требования к системам автосопровождения:

на участках прямолинейного полета и на участках маневра гипотезы о характере изменения координат во времени должны быть различными;

на участке прямолинейного полета изменение координат во времени проще описывать полиномами первой степени

$$x(t) = x_0 + v_x t; \quad y(t) = y_0 + v_y t; \quad H(t) = H_0 + v_h t; \quad (5.2)$$

на участке маневра процесс изменения координат во времени лучше всего описывать полиномами второй степени

$$x(t) = x_0 + v_x t + \frac{a_x}{2} t^2; \quad y(t) = y_0 + v_y t + \frac{a_y}{2} t^2; \quad H(t) = H_0 + v_h t + \frac{a_h}{2} t^2, \quad (5.3)$$

где a_x, a_y, a_h – ускорения по каждой координате.

Процесс вторичной обработки разбивается на два самостоятельных этапа: обнаружение траекторий и слежение за траекториями.

Автоматическое обнаружение является начальным моментом вторичной обработки. Пусть появилась одиночная отметка № 1 от цели. Она принимается за начальную отметку траектории. В следующем обзоре вторую отметку, принадлежащую той же траектории, следует искать в некоторой области, заключенной внутри кольца и имеющую площадь

$$S_1 = \pi T_0^2 (v_{u_{\max}}^2 - v_{u_{\min}}^2), \quad (5.4)$$

где T_0 – период обзора РЛС; $v_{u_{\min}}, v_{u_{\max}}$ – возможные минимальная и максимальная скорости цели.

В область S_1 может попасть не одна, а несколько отметок, и каждую из них следует считать как возможное продолжение предполагаемой траектории. По двум отметкам вычисляются скорость и направление движения каждой из предполагаемых целей, а затем экстраполируется положение отметки на следующий обзор. Вокруг экстраполируемых отметок образуются круговые области S_2 . Если в какую-либо область S_2 в третьем обзоре попала отметка, она считается принадлежащей к обнаруживаемой траектории, траектория продолжается, и отметка передается на сопровождение.

Операции, которые выполняются при автообнаружении, сводятся к экстраполяции координат, их сглаживанию и стробированию отметок.

Процесс экстраполяции состоит в том, что по координатам ранее полученных отметок вычисляются координаты будущей отметки. Экстраполяция требует знания закономерностей движения цели, на основе которых прокладывается траектория.

Слежение за траекториями целей заключается в непрерывной привязке вновь полученных отметок к своим траекториям, в сглаживании координат и вычислении параметров движения целей. Если слежение производится автоматически, то его называют автосопровождением.

Пусть в n смежных обзорах РЛС получены отметки, создающие траекторию полета цели (рис. 5.1). Сначала производится сглаживание координат и вычисление параметров траектории, которые выдаются потребителю.

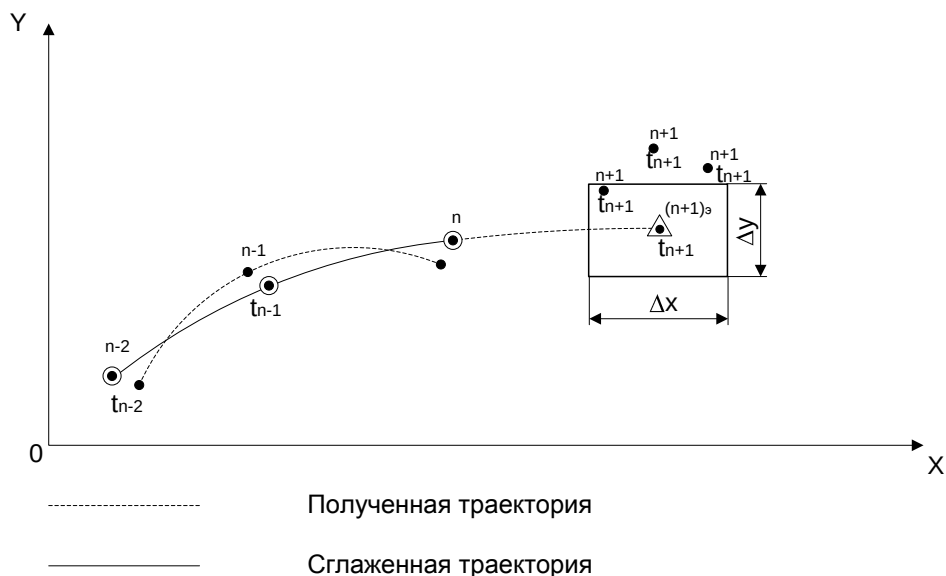


Рис. 5.1. Получение траектории цели

Если в $(n+1)$ -м обзоре получено несколько отметок, то необходимо определить, какая из них принадлежит данной траектории. Используя данные известных $(n-2)$, $(n-1)$ и n -го обзоров, и, экстраполируя на один обзор вперед, можно предсказать положение $(n+1)$ -й отметки траектории $(n+1)_3$. Как правило, эта рассчитанная отметка не совпадает ни с одной из вновь полученных. Если известны статистические характеристики ошибок измерения координат и заданы вероятностные характеристики степени достоверности полученного решения, то можно выделить вокруг экстраполированной отметки область, например, в виде прямоугольника со сторонами Δx и Δy , которую принято называть стробом. Координаты центра строба совпадают с координатами экстраполированной отметки. Если размеры строба выбраны так, что вероятность попадания в него истинной отметки велика, то отметку, попавшую в строб, следует отнести к данной траектории.

Таким образом, в процессе автосопровождения выполняются следующие операции:

- сглаживание координат и определение параметров траектории;

- экстраполяция координат цели на следующий обзор или на несколько обзоров вперед;

- выделение строба, в котором с некоторой вероятностью ожидается появление новой отметки;

- сличение координат экстраполированной отметки с координатами отметок, попавших в строб, и выбор одной из них для продолжения траектории.

Стробирование может быть физическим и математическим. Физическое стробирование – это выделение предполагаемой области появления отметки, принадлежащей сопровождаемой траектории, путем непосредственного воздействия на приемное устройство РЛС. Математическое стробирование – это формирование предполагаемой области появления отметки в виде границ строба. Строб может задаваться в полярной и прямоугольной системах координат.

Задача селекции отметок, т.е. выбора единственной отметки из всех имеющихся в стробе, решается путем вычисления квадратов линейных отклонений отметок от центра и сравнению результатов с целью выбора минимального.

Таким образом, если при первичной обработке из смеси сигнала с шумом на основе статистического различия структуры сигнала и шума выделяется полезная информация, то вторичная обработка, используя различия в закономерностях появления ложных отметок и отметок от целей, должна обеспечить выделение траекторий движущихся целей. Траектория движения цели представляется в виде последовательности полиномиальных участков с различными коэффициентами и степенями полиномов, т.е. система обработки должна перестраиваться в соответствии с характером движения каждой цели.

3. Третичная обработка радиолокационной информации

Системы управления боевыми действиями авиации, кроме рассмотренных выше задач по обработке информации, поступающей от одной РЛС, решают еще одну задачу, которая связана с объединением информации о целях, полученных от нескольких РЛС или первичных постов обработки РЛИ, и созданием общей картины воздушной обстановки.

Обработку РЛИ, поступающей от нескольких источников, условились называть третичной обработкой информации (ТОИ).

Ввиду того, что зоны обзора РЛС или зоны ответственности постов обычно перекрываются, сведения об одной и той же цели могут поступать одновременно от нескольких станций. В идеальном случае такие отметки должны накладываться одна на другую. Однако на практике этого не наблюдается из-за систематических и случайных ошибок в измерении координат, различного времени локации, а также из-за ошибок пересчета координат между точками стояния источника и приемника информации.

Главной задачей третичной обработки является решение вопроса, сколько целей находится в действительности в зоне ответственности. Для решения этой задачи необходимо выполнить следующие операции:

- произвести сбор донесений от источников;
- привести отметки к единой системе координат и единому времени отсчета;
- установить принадлежность отметок к целям, т.е. решить задачу отождествления отметок;
- выполнить укрупнение информации.

Для решения этих задач используются все характеристики целей. Устройства третичной обработки реализуются на специализированных ЭВМ с полной автоматизацией всех выполняемых операций. Однако иногда для упрощения автоматических устройств некоторые операции ТОИ могут производиться по командам и с участием оператора. В частности, таким образом выполняются операции отождествления и укрупнения.

Третичная обработка является завершающим этапом получения информации о воздушной обстановке.

Донесением о целях принято называть информацию, содержащую сведения о местоположении целей, об их характеристиках, выдаваемую от источников по каналам связи для ее дальнейшей обработки и использования. Задача *сбора донесений* заключается в том, чтобы принять возможно больше информации при минимальных потерях.

Каждое поступающее на вход донесение должно быть обработано, на что требуется некоторое время. Пусть в момент поступления донесения производится обработка предыдущего донесения. В этом случае поступившее донесение может либо покинуть систему необработанным, либо ждать своей очереди на обслуживание, пока система не освободится, либо ожидать обработки строго ограниченное время. В соответствии с этим все системы массового обслуживания разделяются на системы с отказами, системы с ожиданием и системы с ограниченным ожиданием (смешанного типа). На практике получили распространение системы смешанного типа с временем ожидания, выбранным из условия наилучшей обработки.

Координаты целей измеряются в системе координат обнаружившей их РЛС, поэтому при передаче данных на пункт ТОИ необходимо *пересчитать их к точке стояния приемника информации*. В качестве единой системы координат могут использоваться геодезическая, полярная или прямоугольная системы координат. Наиболее точной является геодезическая, однако расчеты в ней сложны. Поэтому она используется лишь тогда, когда источники и приемники информации находятся на больших расстояниях друг от друга и велик фактор кривизны Земли. В остальных случаях пользуются полярной или прямоугольной системами координат с поправкой по высоте. Расчеты в этих системах достаточно просты и приемлемы для решения целого ряда практических задач.

В АСУ передача координат целей обычно осуществляется в прямоугольной системе координат. На пункте обработки также используется прямоугольная система. Следовательно, задача сводится к преобразованию прямоугольных координат целей относительно точки стояния источника в прямоугольные координаты относительно точки стояния пункта обработки.

К единому времени отсчета приводятся отметки, полученные на пункте ТОИ от разных источников. Единое время необходимо для того, чтобы определить положение обрабатываемых отметок по состоянию на какой-то один момент времени. Эта операция значительно облегчает задачу отождествления отметок.

Координаты отметок приводятся к единому времени путем определения для каждой отметки времени экстраполяции относительно заданного момента сравнения. Учитывая сравнительно высокий темп обновления информации, целесообразно при экстраполяции принимать гипотезу равномерного и прямолинейного изменения координат.

Все источники РЛИ обрабатывают информацию автономно и независимо друг от друга. За счет перекрытия зон ответственности в

составе донесений могут быть дублирующие донесения, полученные от нескольких источников по одной и той же цели.

В процессе *отождествления отметок целей* вырабатывается решение, устанавливающее:

сколько целей имеется в действительности, если донесения о них поступают от нескольких источников;

как распределяются поступившие донесения по целям.

Обычно отождествление выполняется в два этапа. Сначала производится грубое отождествление или сравнение отметок, а затем проводится распределение отметок, позволяющее принять более точное решение на отождествление.

В основе этапа сравнения лежит предположение, что донесения об одной и той же цели должны содержать одинаковые характеристики. В силу этого решение о тождественности отметок принимают на основании сравнения характеристик. Однако в действительности из-за различных ошибок полного совпадения характеристик не бывает. В результате возникает неопределенность, выражаемая двумя конкурирующими гипотезами:

1. Гипотеза H_1 предполагает, что отметки от одной и той же цели, хотя произошло несовпадение.

2. Гипотеза H_2 предполагает, что отметки от разных целей, поэтому произошло несовпадение.

Решение на выбор той или иной гипотезы принимается на основании оценки величины несовпадения и использования критерия минимума ошибки принятия решения.

На этапе распределения для группирования отметок по отдельным целям используются признаки их принадлежности к источникам информации и нумерации целей в системе этих источников. Правила логического группирования отметок в соответствии с принадлежностью донесений о целях к источникам информации формулируются следующим образом.

1. Если в области допустимых отклонений получены отметки от одного и того же источника, то число целей равно числу отметок, так как одна станция в один и тот же момент времени не может выдавать от одной цели несколько отметок.

2. Если в области допустимых отклонений от каждого источника получено по одной отметке, то считается, что эти отметки относятся к одной и той же цели.

3. Если от каждой станции получено по равному числу отметок, то очевидно, что число целей равно числу отметок, полученных от одной

станции, ибо маловероятно, чтобы в пределах небольшой области станция обнаруживала только свои цели и не обнаруживала цель, которую наблюдает соседняя станция.

4. Если от нескольких источников поступило неодинаковое количество отметок, принимается, что источник, от которого получено наибольшее количество отметок, дает наиболее вероятную обстановку. При этом общее количество целей определяется числом отметок, принятых от указанного источника.

Таким образом, обработка донесений в группе состоит в группировании отметок от нескольких источников к одной цели. Эта задача решается сравнительно просто при использовании первого и второго правила и значительно труднее при применении третьего и четвертого.

По гипотезе третьего правила имеем две цели, к каждой из которых относится по одному донесению от каждого источника. Необходимо определить, какие пары отметок относятся к каждой цели. Наиболее правдоподобный вариант выбирается в результате сравнения сумм квадратов расстояний между отметками. Принимается та комбинация, для которой эта сумма минимальна.

Приведенные правила сравнения и распределения отметок не единственные, и в зависимости от требуемой точности могут быть усложнены или упрощены.

После отождествления сведения о цели выражаются группой отметок, полученных от нескольких источников. Для формирования одной отметки с более точными характеристиками координаты и параметры траектории усредняются.

Простейший способ усреднения заключается в том, что вычисляется среднее арифметическое координат. Этот способ достаточно прост, но он не учитывает точностных характеристик источников информации. Более правильным является усреднение отметок целей с учетом коэффициента веса отметок, а коэффициент выбирается в зависимости от точности источника. И наконец, в качестве усредненных можно взять ординаты отметки, полученные от одного источника, если имеются данные, что этот источник выдает наиболее точную информацию.

Укрупнение (группирование) отметок целей проводится в тех пунктах обработки, где не требуется информация по каждой цели или же плотность поступления отметок от целей оказывается выше рассчитанной пропускной способности. Обычно группирование производится на высших инстанциях системы управления.

Группирование осуществляется теми же способами, что и отождествление, и ведется по признаку близости координатных описаний группируемых объектов. Для этого формируется строб по тем координатам, которые назначаются как характерные для группы целей. Координаты центра сто́ба распространяются на всю группу. Обычно делается так, что центр сто́ба совпадает с отметкой головной цели в группе. Размеры сто́ба определяются, исходя из навигационных и тактических требований. Обычно используется полуавтоматический метод укрупнения, который включает в себя следующие основные этапы:

1. Выделение компактных групп целей на основе близости координат x , y , H . Оператор визуально определяет компактную группу целей по координатам, выделяет головную цель, назначает один из сто́бов укрупнения и вводит в ЭВМ номер сто́ба и головной цели. На основе этой информации ЭВМ завершает процесс выделения компактной группы.

2. Селекция внутри выделенных групп по скорости. Цель остается в составе укрупненной цели, если:

$$\begin{aligned} |v_x - v_{x_2}| &\leq \Delta v ; \\ |v_y - v_{y_2}| &\leq \Delta v . \end{aligned} \quad (5.5)$$

где v_{x_2} , v_{y_2} – составляющие скорости головной цели; Δv – порог селекции по скорости.

3. Определение характеристик укрупненной цели. Укрупненной цели присваивается количественный состав, и формируется обобщенный признак действия.

4. Корректировка решения оператора. Ввиду того что обстановка в воздухе меняется, имеется возможность скорректировать данные укрупненной цели путем ее укрупнения, разукрупнения, отукрупнения или приукрупнения.

5. Сопровождение укрупненной цели. Эта операция осуществляется автоматически ЭВМ. При этом производится корректировка координат, обеспечивается выбор головной цели при исчезновении информации о старой головной цели.

Таким образом, в процессе ТОИ производится сбор донесений от источников, приведение отметок к единой системе координат и единому времени отсчета, установление принадлежности отметок к целям (отождествление отметок) и выполнение укрупнения информации.

Заключение

1. Операции, производимые при первичной обработке, может производить РЛС самостоятельно.

2. Если при первичной обработке из смеси сигнала с шумом на основе статистического различия структуры сигнала и шума выделяется полезная информация, то вторичная обработка, используя различия в закономерностях появления ложных отметок и отметок от целей, должна обеспечить выделение траекторий движущихся целей.

3. Траектория движения цели представляется в виде последовательности полиномиальных участков с различными коэффициентами и степенями полиномов, т.е. система обработки должна перестраиваться в соответствии с характером движения каждой цели.

4. В процессе ТОИ производится сбор донесений от источников, приведение отметок к единой системе координат и единому времени отсчета, установление принадлежности отметок к целям (отождествление отметок) и выполнение укрупнения информации.

На самоподготовке необходимо подготовиться к контрольной работе по следующим вопросам:

1. Назначение и содержание первичной обработки радиолокационной информации.

2. Назначение и содержание вторичной обработки радиолокационной информации.

3. Определение параметров движения целей в процессе вторичной обработки радиолокационной информации.

4. Экстраполяция отметок в процессе вторичной обработки радиолокационной информации.

5. Продолжение траектории движения в процессе цели вторичной обработки радиолокационной информации.

6. Назначение и содержание третичной обработки радиолокационной информации.

7. Сбор донесений в процессе цели третичной обработки радиолокационной информации.

8. Приведение отметок целей к единой системе координат и единому времени отсчета в процессе цели третичной обработки радиолокационной информации.

9. Отождествление отметок целей в процессе цели третичной обработки радиолокационной информации.

10. Укрупнение информации в процессе ТОИ.