

Занятие 8. Характеристики радиолокационных станций.

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 радиолокационного обзора — область пространства, в пределах которой производится облучение и прием и обработка отраженных сигналов (для пассивных РЛС — только прием отраженных сигналов), в том числе обнаружение целей с заданными характеристиками. Эта зона (рис. 2.1) ограничивается по дальности пределами D_{\min} — D_{\max} , по азимуту — величиной $\alpha_{\text{обз}}$ и по углу места — величиной $\beta_{\text{обз}}$.

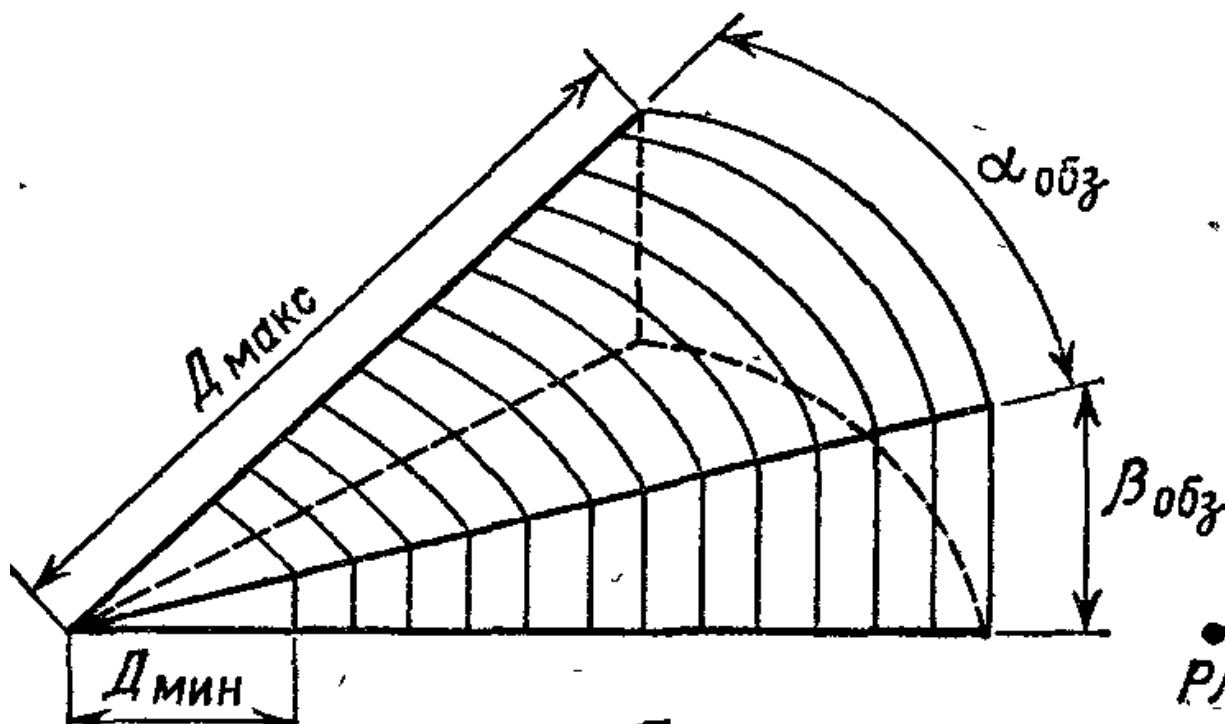


Рис. 2.1. Зона обзора РЛС

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

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 $P_{nn} = 1 - P_{ln}$. Крайние значения вероятностей равны 0 и 1.

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

Например, если максимальная дальность РЛС $D_{\max} = 300$ км при $P_{no} = 0,95$ и $P_{ln} = 10^{-3}$, 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 — это минимально возможное смещение цели относительно другой цели по соответствующей координате (при одинаковых значениях всех других координат), при котором возможно раздельное их наблюдение и измерение координат и параметров движения. Выделим в зоне обзора четыре соседних элементарных объема 1, 2, 3, 4 (рис. 2.2), 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 ΔD_{\min} , $\Delta \alpha_{\min}$, $\Delta \beta_{\min}$ оценивается разрешающая способность станции по дальности, азимуту и по углу места.

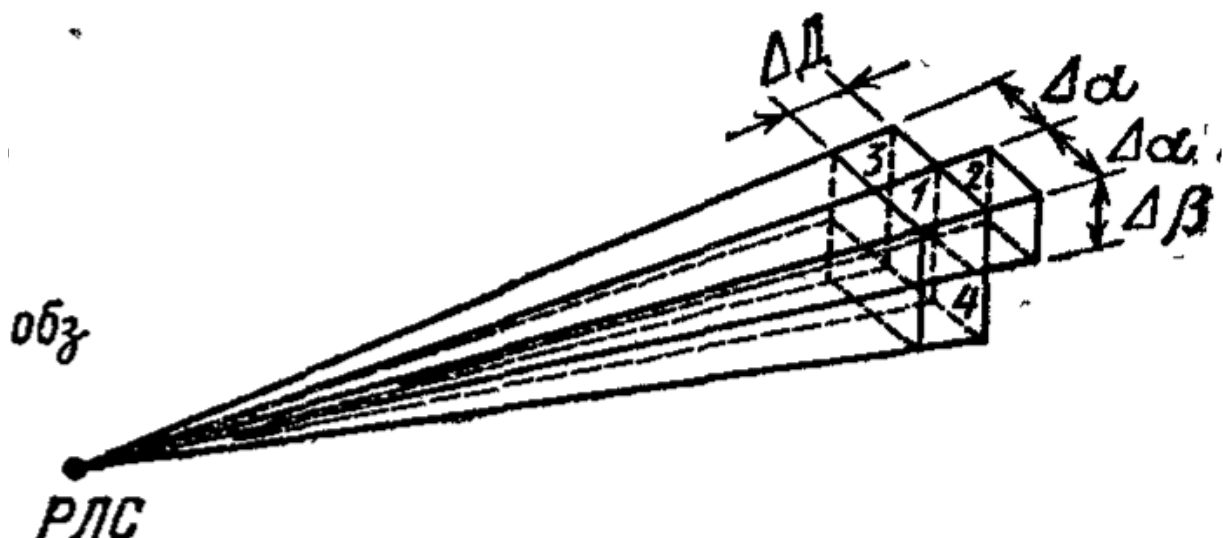


Рис. 2.2. Элементарные объемы зоны обзора РЛС

Разрешающая способность по дальности оценивается минимальным расстоянием ΔD_{\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 $\Delta v_{\text{д} \min}$ 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.

Как правило, при обнаружении устанавливается факт наличия цели и производится грубая оценка ее координат. На одной из последующих стадий обработки сигналов производится более точная оценка координат.

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 еще на этапе обнаружения целей.

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 Δx , 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 Δx_i , 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 :

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

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. 2.3). 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

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

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.

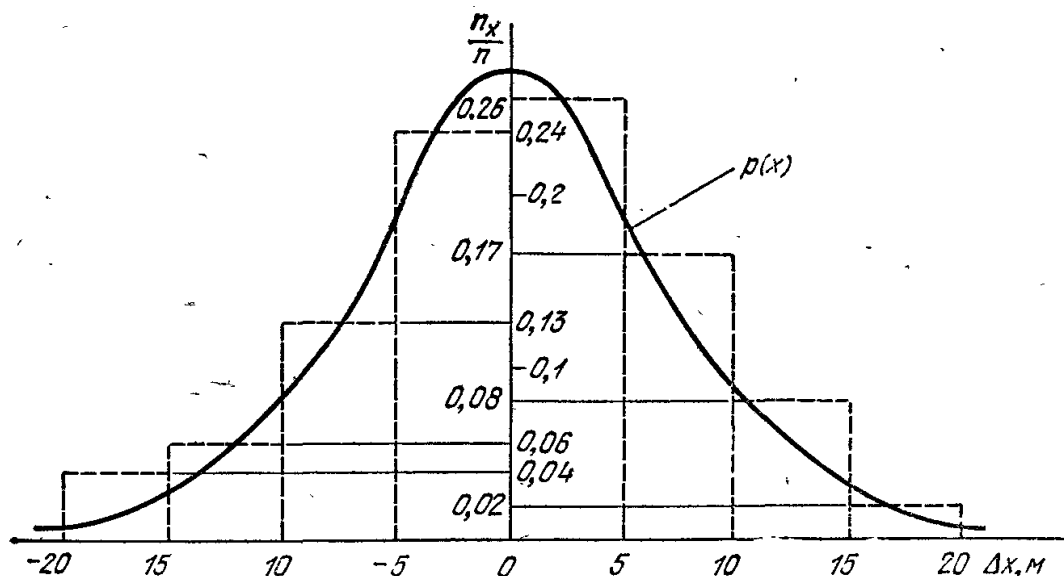


Рис. 2.3. Гистограмма и кривая распределения ошибок

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*:

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

где $p(x)$ — плотность вероятности появления случайной величины x ; $\bar{\Delta x}$ — 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 $\bar{\Delta x} = 0$, 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 среднеарифметическое результатов отдельных измерений, поэтому среднеквадратическая ошибка

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

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.

Выведем соотношения для определения оптимальных (минимальных) значений случайных ошибки измерений. Допустим, на входе РЛС действует аддитивная смесь полезного сигнала и шума. Необходимо найти измеренное значение координаты λ^* , если ее истинное значение равно λ_0 , то есть произвести операцию нахождения статистической оценки параметра сигнала.

В случае гауссовского шума оптимальная обработка состоит в формировании корреляционного интеграла, максимум которого приходится на точку λ^* . Выходной сигнал системы обработки в этом случае будет иметь вид:

$$Y = K(\Psi(\lambda)) = K(\Psi_S(\lambda) + \Psi_N(\lambda)), \quad (2.5)$$

где $\Psi_S(\lambda) = \int_0^T kS(t, \lambda_0)S(t, \lambda)dt$, $\Psi_N(\lambda) = \int_0^T kn(t)S(t, \lambda)dt$, k – коэффициент ослабления сигнала.

Определим потенциальную точность измерения параметра, приняв следующие допущения:

1) отношение сигнала к шуму достаточно велико и, следовательно, λ^* близко к λ_0 ;

2) за время измерения T координата (параметр) λ свое значение не меняет.

Найдем максимум функции $\Psi(\lambda)$:

$$\frac{d\Psi(\lambda)}{d\lambda} = \frac{d\Psi_S(\lambda)}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda^*} + \frac{d\Psi_N(\lambda)}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda^*} = 0. \quad (2.6)$$

Разложим сигнальную часть уравнения (первое слагаемое) в ряд Тейлора относительно истинного значения измеряемого параметра:

$$\frac{d\Psi_S(\lambda)}{d\lambda} = \frac{d\Psi_S(\lambda)}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_0} + \frac{d^2\Psi_S(\lambda)}{d\lambda^2} \Big|_{\lambda=\lambda_0} (\lambda - \lambda_0) + \frac{d^3\Psi_S(\lambda)}{d\lambda^3} \Big|_{\lambda=\lambda_0} (\lambda - \lambda_0)^2 + \dots \quad (2.7)$$

Так как в данном случае рассматриваются небольшие отклонения от λ_0 , то третье и последующие слагаемые равны 0 из-за малости в них второго множителя. Первое слагаемое строго равно 0, так как производная функции $\Psi_S(\lambda)$ в точке ее максимума равна 0. С учетом сказанного, подставим (2.7) в (2.6):

$$\frac{d^2\Psi_S(\lambda)}{d\lambda^2} \Big|_{\lambda=\lambda_0} (\lambda^* - \lambda_0) + \frac{d\Psi_N(\lambda)}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_0} = 0. \quad (2.8)$$

Возможность применения условия $\lambda = \lambda_0$ ко второму слагаемому объясняется стационарностью шума: при сдвиге по λ его характеристики не меняются. Из (2.8) можно записать выражение для ошибки измерения:

$$\Delta\lambda = \lambda^* - \lambda_0 = - \frac{\frac{d\Psi_N(\lambda)}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_0}}{\frac{d^2\Psi_S(\lambda)}{d\lambda^2} \Big|_{\lambda=\lambda_0}}. \quad (2.9)$$

Найдем ее статистические характеристики. Сначала найдем математическое ожидание числителя, так как знаменатель детерминирован:

$$\overline{\frac{d\Psi_N(\lambda)}{d\lambda}} = \frac{d}{d\lambda} \int_0^T \overline{n(t)} S(t, \lambda) dt = 0. \quad (2.10)$$

Значит, $m_{\Delta\lambda} = 0.$ (2.11)

$$\text{Дисперсия} \quad \overline{\Delta\lambda^2} = \left. \left(\frac{d\Psi_N(\lambda)}{d\lambda} \right)^2 \right|_{\lambda=\lambda_0} \frac{1}{\left. \frac{d^2\Psi_S(\lambda)}{d\lambda^2} \right|_{\lambda=\lambda_0}}. \quad (2.12)$$

Раскроем это соотношение, начиная с числителя:

$$\begin{aligned} \overline{\left(\frac{d\Psi_N(\lambda)}{d\lambda} \right)^2} &= \int_0^T \int_0^T \frac{1}{n(t_1)n(t_2)} \frac{dS(t_1, \lambda)}{d\lambda} \frac{dS(t_2, \lambda)}{d\lambda} dt_1 dt_2 = \\ &= \frac{N_0}{2} \int_0^T \int_0^T \delta(t_2 - t_1) \frac{dS(t_1, \lambda)}{d\lambda} \frac{dS(t_2, \lambda)}{d\lambda} dt_1 dt_2 = \frac{N_0}{2} \int_0^T \left(\frac{dS(t, \lambda)}{d\lambda} \right)^2 dt. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Теперь рассмотрим детерминированный знаменатель:

$$\begin{aligned} \left. \frac{d^2\Psi_S(\lambda)}{d\lambda^2} \right|_{\lambda=\lambda_0} &= \left. \frac{d^2}{d\lambda^2} a \int_0^T S(t, \lambda_0) S(t, \lambda) dt \right|_{\lambda=\lambda_0} = a \int_0^T S(t, \lambda_0) \left. \frac{d^2 S(t, \lambda)}{d\lambda^2} \right|_{\lambda=\lambda_0} dt = \\ &= -a \int_0^T \left(\frac{dS(t, \lambda)}{d\lambda} \right)^2 dt \Big|_{\lambda=\lambda_0}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\text{так как } S(t, \lambda) \frac{d^2 S(t, \lambda)}{d\lambda^2} = \left(\frac{1}{2} \frac{d^2 S^2(t, \lambda)}{d\lambda^2} \right)^2 - \left(\frac{dS(t, \lambda)}{d\lambda} \right)^2 = - \left(\frac{dS(t, \lambda)}{d\lambda} \right)^2.$$

В результате дисперсия

$$D_{\Delta\lambda} = \left. \frac{-N_0/2}{a \frac{d^2\Psi_S(\lambda)}{d\lambda^2}} \right|_{\lambda=\lambda_0} = \left. \frac{-1}{\frac{2a d^2\Psi_S(\lambda)}{N_0 d\lambda^2}} \right|_{\lambda=\lambda_0}. \quad (2.15)$$

Если нормировать производную второго порядка сигнальной функции величиной энергии опорного сигнала ($\Psi_S(\lambda) = a\Psi_{S0}(\lambda)$, $a^2 = E$), то получим следующее выражение:

$$D_{\Delta\lambda} = \left. \frac{-1}{\frac{2E d^2\Psi_{S0}(\lambda)}{N_0 d\lambda^2}} \right|_{\lambda=\lambda_0}. \quad (2.16)$$

Таким образом, ошибки радиолокационных измерений разделяются на грубые, систематические и случайные. Наиболее сложно компенсировать случайные погрешности, для чего необходимо увеличивать количество измерений, отношение сигнала к шуму и выбирать соответствующий вид зондирующего сигнала.

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:

$$Эф = T_{исп} / (T_n + T_p + T_o). \quad (2.17)$$

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.

В зависимости от назначения РЛС и методов, применяемых в ней, излучение может быть непрерывным (рис. 2.4, а), импульсным большой скважности — порядка сотен...тысяч (рис. 2.4, б) и импульсным малой скважности — порядка единиц...десятков (рис. 2.4, в). Под *скважностью импульсов* q_u понимают отношение периода следования T_c к длительности импульса τ_u : $q_u = T_c / \tau_u$.

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. 2.4, 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.

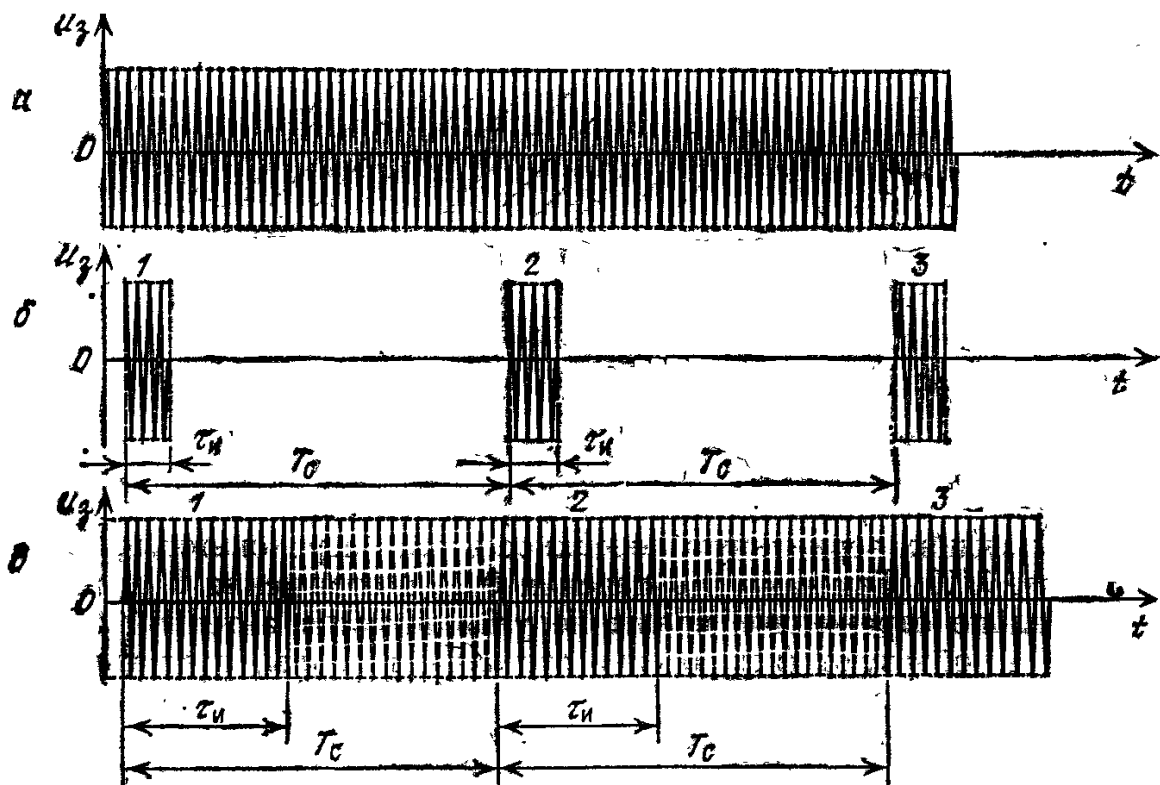


Рис. 2.4. Временные диаграммы зондирующего излучения

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. 2.5).

Зеркальное отражение (рис. 2.5, а) происходит при облучении целей, имеющих зеркальную поверхность или шероховатости, размером менее $\lambda/16$. Так как углы падения $\theta_{\text{пад}}$ и отражения $\theta_{\text{отр}}$ равны, то зеркально отраженные волны не улавливаются антенной РЛС и сигнала не образуют (исключение составляют волны, падающие под прямым углом к плоскости цели).

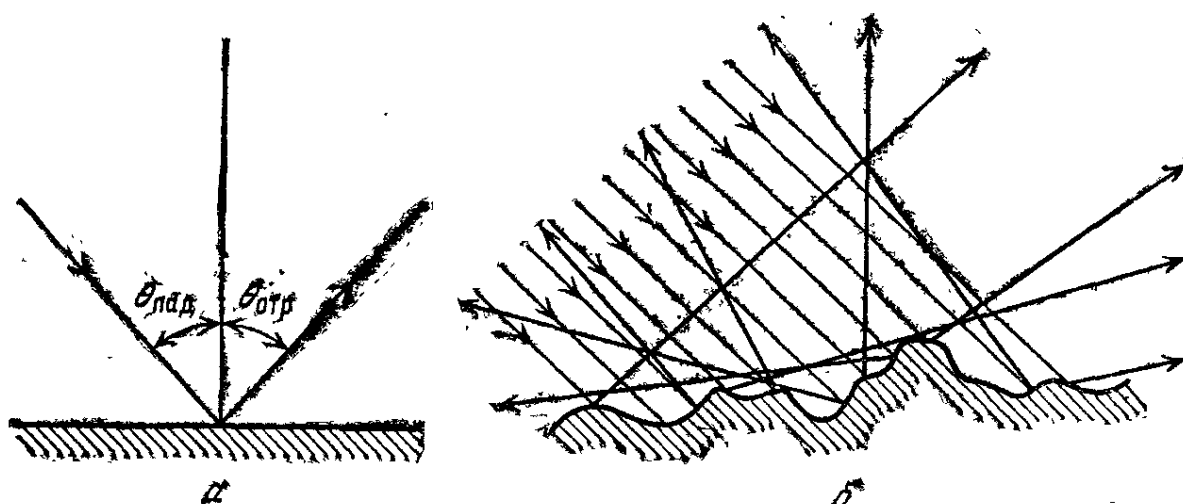


Рис. 2.5. Виды отражений радиоволн:

а – зеркальное отражение; б – диффузное отражение

Диффузное рассеяние (рис. 2.5, 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.

Радиолокационный обзор может выполняться следующими способами:

последовательный;

одновременный (параллельный);

смешанный.

При **последовательном обзоре** РЛС узким лучом с угловыми скоростями $\omega_{аз}$, $\omega_{ум}$ сканирует зону радиолокационного обзора. При использовании механических устройств сканирования обзор всей зоны займет большое время и велика вероятность пропуска цели. Поэтому современные радиолокационные технологии используют фазированные антенные решетки с электронным сканированием.

Имеются разновидности последовательного обзора. Если из двух угловых координат измеряют одну, как, например, в *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 радиолокационного обзора по этой координате. Такой обзор называется *круговым, или секторным*.

На рис. 2.6, а показана ДН, сжатая в горизонтальной плоскости, а на рис. 2.6, б — в вертикальной. Первая предназначена для РЛС, измеряющей дальность и азимут, а вторая — для РЛС, измеряющей угол места или высоту цели. На практике эти антенны работают в комплексе: обзор начинается с кругового вращения первой антенны вокруг вертикальной оси, на следующем этапе производится дистанционный разворот второй антенны на выявленный азимут интересующей цели и затем 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.

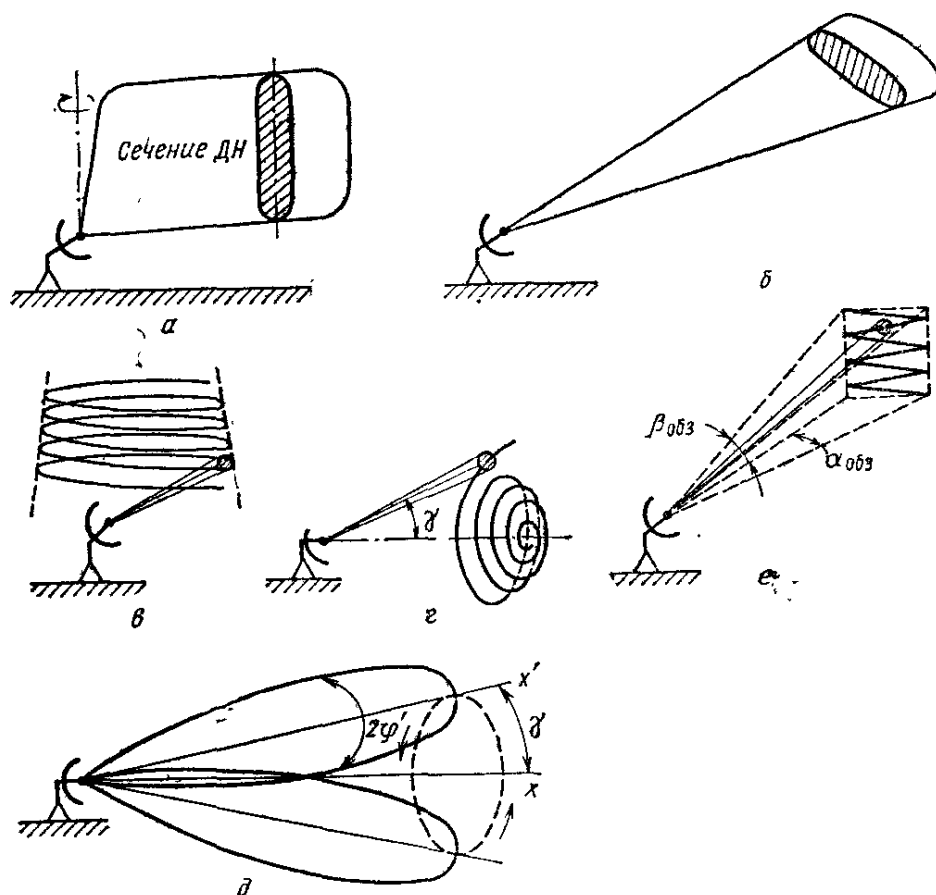


Рис. 2.6. Виды радиолокационного обзора плоскими и игольчатыми ДН

Винтовой обзор (рис. 2.6, в) складывается из кругового вращения в азимутальной плоскости и медленного изменения положения луча по углу места. *Спиральный обзор* (рис. 2.6, г) означает, что проекция луча на плоскость, перпендикулярную оси вращения, имеет вид спирали. *Конический обзор* (рис. 2.6, 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. 2.6, 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.

При **одновременном обзоре** у РЛС формируются один или несколько широких антенных лучей, охватывающих всю зону радиолокационного обзора. Однако при этом существенно ухудшаются разрешающая способность и точность измерения угловых координат целей. 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 антенны РЛС должна быть многолучевой и сразу охватывать всю зону радиолокационного обзора станции.

При **смешанном обзоре** комбинируют два предыдущих способа, например, используют двухдиапазонное (дециметровый и сантиметровый) сканирование зоны радиолокационного обзора: с уменьшением длины волны зондирующего излучения при постоянных геометрических параметрах антенны ширина диаграммы направленности антенны $\theta_{\alpha(\beta)}$ сужается.

Другим вариантом смешанного обзора может быть использование нескольких лучей, охватывающих зону радиолокационного обзора по одной угловой координате и совершающих последовательное круговое сканирование по другой, как в панорамных РЛС.

Соответственно, различают также однолучевые и многолучевые методы обзора.

Система радиолокационного обзора воздушного 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 (элемент разрешения); определенным способом сообщают диаграмме направленности перемещение по такому закону, чтобы за один цикл облучить всю зону. Длительность этого цикла, необходимого для облучения и приема сигналов от всех точек зоны радиолокационного обзора, называется *периодом обзора* $T_{обз}$. Время облучения $T_{обл}$ — это интервал времени с момента начала облучения цели и окончания прихода от нее сигналов (длительность облучения точечной цели).

К системе радиолокационного обзора предъявляется ряд требований.

1. Период (время) 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 θ_α и θ_β . Отсюда находим число элементов зоны обзора как частное от деления $\alpha_{обз} \cdot \beta_{обз}$ на $\theta_\alpha \cdot \theta_\beta$. Так как в каждом элементе можно зафиксировать не более одной точечной цели, то минимальный период обзора равен

$$T_{обзмин} = \frac{\alpha_{обз} \beta_{обз}}{\theta_\alpha \theta_\beta} T_{обл}. \quad (2.18)$$

В реальных условиях период обзора больше, чем $T_{обзмин}$, 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 , равным 1...2. Этот коэффициент показывает, во сколько раз фактический период обзора $T_{обз}$ больше идеализированного $T_{обзмин}$:

$$T_{обз} = k_p \cdot T_{обзмин}. \quad (2.19)$$

Эта формула определяет период радиолокационного 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.

Контрольные вопросы:

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.

Задание на самостоятельную подготовку:

1. Изучить материалы лекции.
2. Подготовиться к контрольной работе по контрольным вопросам.

Литература:

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.