

Тема №1. Теоретические основы построения систем вооружения зенитных ракетных войск

Занятие № 3. Способы измерения координат, используемые в системах вооружения ЗРВ

Учебные вопросы

1. Способы измерения координат.
2. Разрешающая способность РЛС.

1. СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ

В системах вооружения ЗРВ информация о воздушной обстановке получается радиолокационными средствами. Сведения о наличии в пространстве целей, их координатах и параметрах движения, информация о действующих помехах содержится в параметрах радиосигналов, принимаемых радиолокационной станцией (РЛС). Основной функцией РЛС является извлечение полезной информации о целях из принятых сигналов.

Информацию о воздушной обстановке, полученную радиолокационными методами принято называть **радиолокационной информацией (РЛИ)**.

Для получения РЛИ используют следующие методы:

1. **Метод активной радиолокации с пассивным ответом** является наиболее распространенным и основан на облучении цели радиосигналом (активная локация) и приеме отраженных (рассеянных) целью радиоволн приемным устройством РЛС (пассивный ответ).

2. **Метод активной радиолокации с активным ответом** – при облучении цели радиосигналом от РЛС (активная локация) срабатывает установленный на цели ретранслятор (ответчик), который излучает ответный радиосигнал с заданными параметрами (активный ответ). Эти сигналы принимаются РЛС.

3. **Метод пассивной радиолокации** заключается в приеме сигналов собственного радиоизлучения целей (радиотепловое излучение тел, излучение собственных радиотехнических устройств и др.).

4. **Комбинационные методы**, включающие в себя вышеперечисленные методы в различных сочетаниях.

Все методы активной локации предусматривают излучение в направлении цели радиосигнала с заданными параметрами, его принято называть **зондирующим сигналом (ЗС)**.

Абсолютное большинство РЛС, используемых в системах вооружения ЗРВ, являются multifunctionalными и используют комбинационные методы получения РЛИ, построенные на базе активной локации с пассивным ответом.

Например, для обнаружения целей и измерения их координат применяется активная локация с пассивным ответом, для определения государственной принадлежности обнаруженных целей («свой – чужой») и измерения координат зенитных управляемых ракет (ЗУР) в полете применяется активная локация с активным ответом, а для пеленгования (определения углового направления) постановщика помех применяется пассивная локация.

Современные РЛС способны:

- определить факт наличия или отсутствия цели в заданном элементе пространства по наличию или отсутствию отраженного сигнала из этого элемента пространства (задача обнаружения целей);

- измерить координаты цели: дальность по запаздыванию радиосигнала на пути РЛС – цель – РЛС, угловое положение цели по направлению прихода сигнала от цели, радиальную скорость цели по доплеровской добавке частоты принятого сигнала (задача измерения координат целей);

- определить является ли цель одиночным или групповым объектом по количеству и характеру отметок от цели (задача разрешения целей);

- определить параметры движения целей, т.е. ответить на вопрос маневрирует цель или нет и проанализировать ее траекторию (задача траекторного анализа целей).

Для решения названных задач используются следующие физические свойства радиоволн:

- постоянство скорости распространения в свободном пространстве ($c = const = 300\,000\,000\text{ м/с}$);
- прямолинейность траектории распространения;
- изменение частоты радиосигнала при отражении его от движущегося объекта (эффект Доплера).

Очевидно, что для однозначного определения положения цели в трехмерном пространстве, РЛС необходимо определить три координаты цели. Как было показано при ознакомлении с радиолокационными целями, большинство из них являются высокоподвижными объектами, что приводит к необходимости измерения скорости целей. В радиолокаторах непосредственно измеряющих скорость целей, ее принято считать еще одной - четвертой измеряемой координатой.

На основании физических свойств радиоволн непосредственно могут быть измерены следующие координаты (рисунок 1):

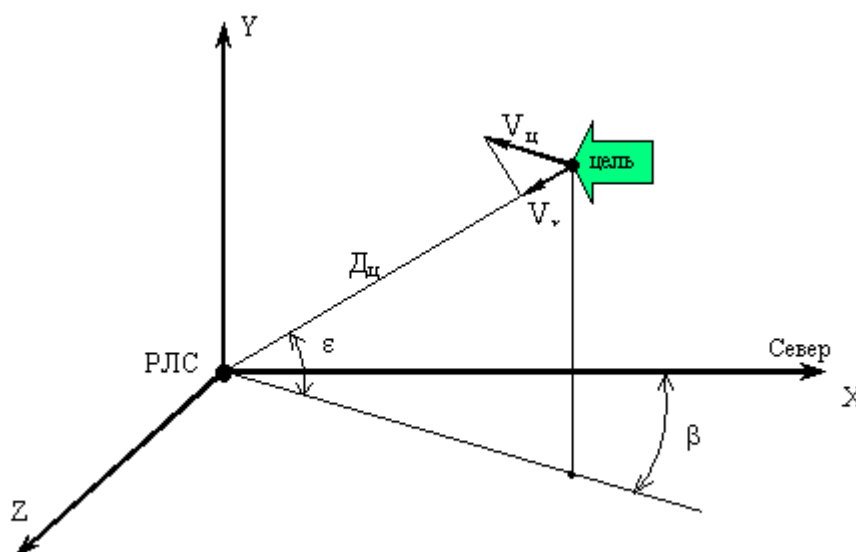


Рис. 1. Взаимное положение РЛС и цели в пространстве, измеряемые координаты

- расстояние между точкой стояния РЛС и целью – дальность до цели $D_{ц}$ (иногда ее называют наклонной дальностью);

- направление на цель относительно точки стояния РЛС. Как правило, это направление определяется как углы наклона линии РЛС – цель в вертикальной и горизонтальной плоскостях относительно горизонта и направления на север соответственно. Полученные значения координат обозначаются как угол места цели ε и ее азимут β ;

- проекция линейной скорости цели $V_{ц}$ на линию РЛС - цель – радиальная скорость цели V_r .

Значения измеряемых координат $D_{ц}$, ε , β по существу образуют трехмерную сферическую систему координат, привязанную к горизонту и направлению на север с центром в точке стояния РЛС (рисунок 1).

Значения прямоугольных координат X , Y , Z вычисляются на основе измеренных значений $D_{ц}$, ε , β :

$$\begin{cases} X = D_{ц} \cos \varepsilon \sin \beta \\ Y = D_{ц} \sin \varepsilon \\ Z = D_{ц} \cos \varepsilon \cos \beta. \end{cases}$$

Для получения информации о траектории движения цели необходимо многократно последовательно во времени измерять значения координат цели, а затем связать полученные точки единой линией (рисунок 2).

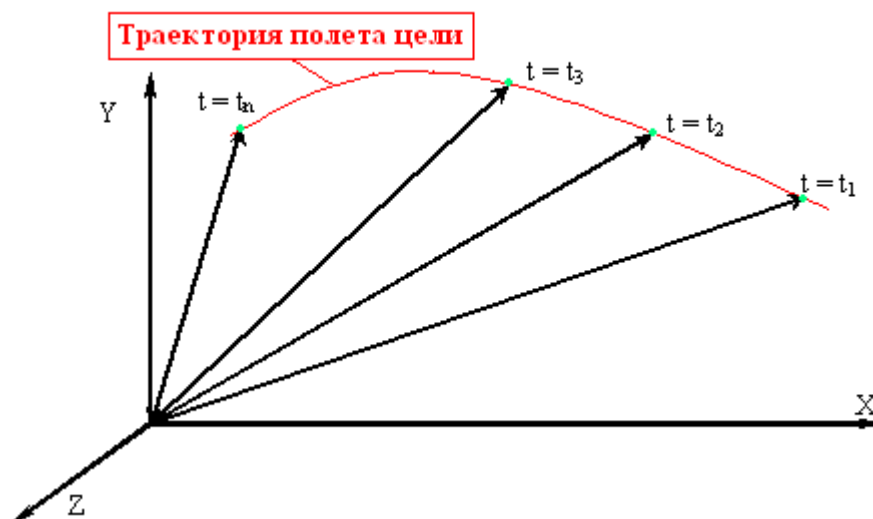


Рис.2. Формирование траектории цели

1.1 Способы измерения дальности

Из свойства $c = const.$ несложно получить простейший алгоритм измерения дальности цели D_u .

Непосредственно измеряется время распространения радиоволн от РЛС до цели и обратно t_z , его называют *временем запаздывания* отраженного сигнала: $t_z = t_{np} - t_{изл}$,

где: $t_{np}, t_{изл}$ - время приема и излучения сигнала.

Дальность цели определяется в соответствии с выражением:

$$D_u = \frac{t_z c}{2}. \quad (1)$$

Способ **непосредственного измерения времени запаздывания** может применяться для РЛС, использующих **активную локацию с пассивным ответом**.

В качестве примера рассмотрим случай измерения дальности в импульсной РЛС, где ЗС служит один из простейших сигналов - **простой прямоугольной радиоимпульс** (рисунок 3).

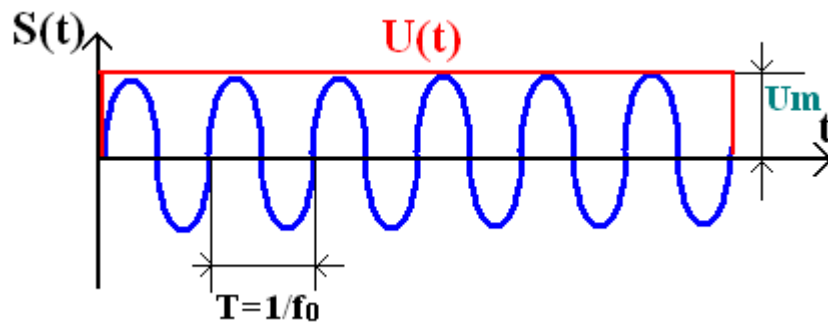


Рис.3. Простой прямоугольный радиоимпульс

Радиоимпульс на всей протяженности которого частота f_0 , начальная фаза φ_0 и амплитуда U_m сохраняются неизменными называют простым или немодулированным. Прямоугольным называют радиоимпульс, огибающая которого $U(t)$ имеет прямоугольную форму.

$f_0 = \text{const}$; $\varphi_0 = \text{const}$; $U_m = \text{const}$; при $0 \leq t \leq \tau_u$ – математическая запись параметров простого прямоугольного радиоимпульса.

Основным достоинством простых ЗС являются относительные простота и дешевизна их формирования и обработки.

Пример.

Дано: Зондирующий сигнал РЛС – простой прямоугольный радиоимпульс длительностью $\tau_u = 1$ мкс. Расстояние до цели $D_u = 150$ км.

Определить: потенциальную точность способа непосредственного измерения дальности.

Решение:

Потенциальная точность способа определяется погрешностями, присущими ему самому, без учета ошибок вносимых шумами, помехами, несовершенством аппаратуры и т.д. Для решения задачи необходимо вычислить погрешности способа измерения.

1. Вычисляем время запаздывания

$$t_3 = \frac{2D_u}{c} = \frac{2 \times 150000 \text{ м}}{3 \times 10^8 \text{ м/с}} = \frac{3 \times 10^5 \text{ м}}{3 \times 10^8 \text{ м/с}} = 1 \times 10^{-3} \text{ с} = 1 \text{ мс}.$$

2. Определяем погрешность способа измерения – ограничением по точности измерения времени запаздывания для простого прямоугольного радиоимпульса выступает длительность этого импульса – 1 мкс .

Относительная погрешность измерения:

$$\partial D_u = \partial t_3 = \frac{\tau_u}{t_3} \times 100\% = \frac{1 \text{ мкс}}{1 \text{ мс}} \times 100\% = 0,1\% .$$

Во многих практически важных случаях большую важность имеет не относительная, но абсолютная точность измерений, например при наведении ЗУР на цель.

Абсолютная погрешность измерений:

$$\Delta D_u = \frac{\tau_u \times c}{2} = \frac{10^{-6} \text{ с} \times 3 \times 10^8 \text{ м/с}}{2} = 150 \text{ м} .$$

Выводы:

а) Погрешности, т.е. ошибки измерения прямо пропорциональны параметрам ЗС. Для простого прямоугольного радиоимпульса – это его длительность. Точность измерения дальности тем выше, чем короче измерительный сигнал.

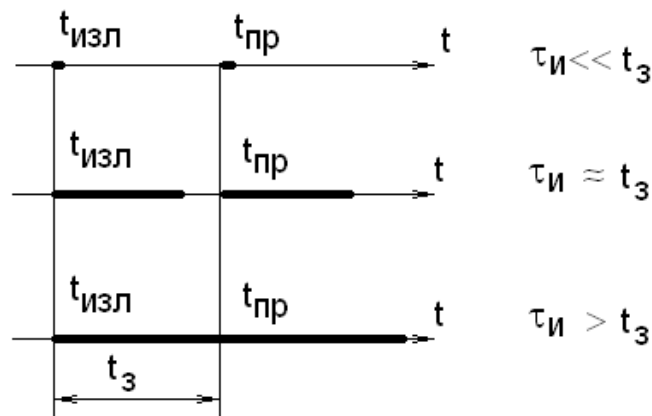


Рис.4. Иллюстрация соотношения времени запаздывания и длительности ЗС

б) В случае если время запаздывания t_3 сравнимо с длительностью импульса τ_u , например при использовании очень длительных ЗС, способ непосредственного измерения t_3 неприменим, т.к. он не обеспечивает требуемой точности.

Как видно из рисунка 4 ЗС (в рассматриваемом случае – радиоимпульс) служит инструментом отсчета на временной оси. Для простых сигналов (без внутриимпульсной модуляции) измерение производится по положению всего импульса в целом и при достижении условия $\tau_u \geq t_z$ измерение с помощью простых радиоимпульсов теряет смысл.

Определение дальности с помощью длинных сигналов $\tau_u \geq t_z$ возможно при использовании дополнительной модуляции внутренних параметров радиоимпульсов: частоты, амплитуды или начальной фазы.

Рассмотрим **частотный способ измерения дальности** на примере длинного импульса $\tau_u \geq t_z$ с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

Под частотной модуляцией понимается изменение частоты радиосигнала по заданному закону. Соответственно линейная частотная модуляция подразумевает зависимость частоты f от времени t по линейному закону, для случая линейного возрастания частоты закон ее изменения $f(t)$ имеет вид

$$f(t) = \frac{f_k - f_n}{\tau_u} t + f_n = f_n + \frac{\Delta f_\partial t}{\tau_u},$$

где:

f_n – начальное значение частоты, как правило совпадает со значением несущей частоты;

f_k – максимальное значение частоты, достигаемое к концу импульса;

$\Delta f_\partial = f_k - f_n$ – девиация частоты, т.е. диапазон в пределах которого идет перестройка частоты за время τ_u .

Графическое представление прямоугольного ЛЧМ радиоимпульса и закона изменения его частоты показано на рисунке 5.

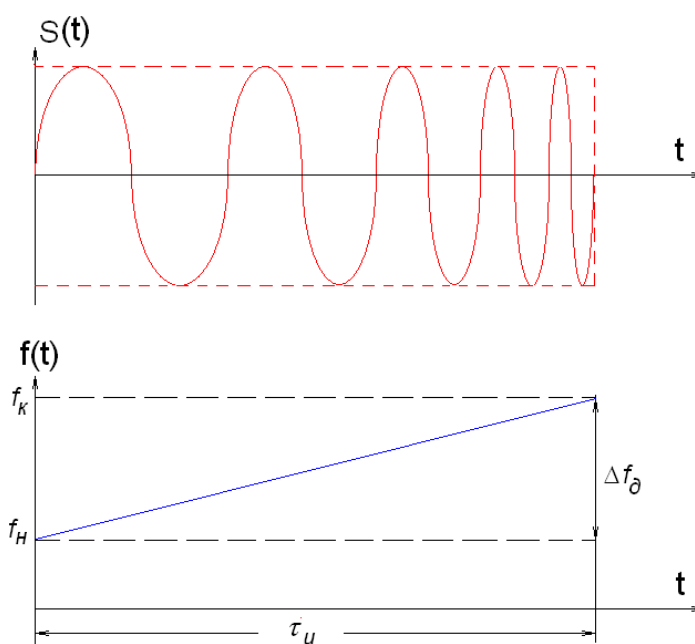


Рис.5. ЛЧМ радиоимпульс и закон изменения его частоты

На практике для уверенного определения дальности частотным способом с помощью длинного ЛЧМ радиоимпульса должно выполняться условие $\tau_u \gg t_z$. Для понимания принципа работы частотного способа определения дальности следует сосредоточить внимание на законах изменения частоты зондирующего и принятого сигналов. В простейшем случае цель неподвижна и доплеровская добавка частоты принятого сигнала равна нулю $F_D = 0$ (рисунок 6).

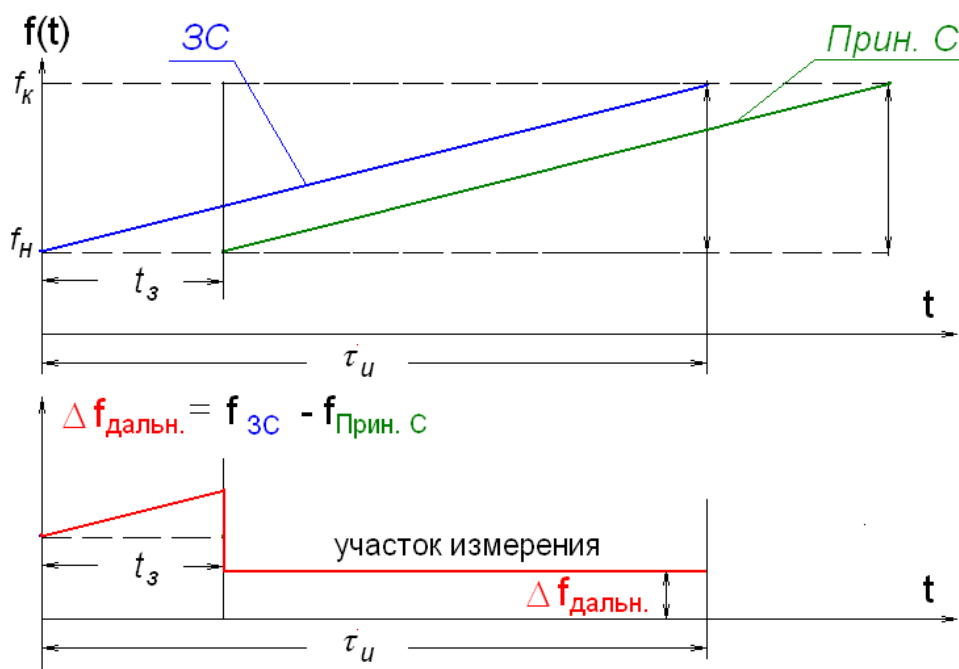


Рис.6. Принцип получения дальномерного значения частоты

В течение времени $\tau_u - t_3$ в РЛС одновременно присутствуют и зондирующий и принятый сигналы с одинаковыми законами изменения частоты. Отличия между ними обусловлены задержкой принятого сигнала на t_3 .

Непосредственное измерение величины задержки не имеет смысла, т. к. $\tau_u \gg t_3$. Время запаздывания, а значит и дальность, могут быть определены в интервале времени $\tau_u - t_3$ (на рисунке 6 это участок измерения $\Delta f_{\text{дальн}}$) по разнице частот зондирующего и принятого сигналов

$$\Delta f_{\text{дальн}} = f_{\text{ЗС}} - f_{\text{Прин.С}},$$

где: $f_{\text{ЗС}} = f_n + \frac{\Delta f_{\delta} t}{\tau_u}$ - закон изменения частоты ЗС;

$f_{\text{Прин.С}} = f_n + \frac{\Delta f_{\delta} (t - t_3)}{\tau_u}$ - закон изменения частоты принятого сигнала;

$t_3 = \frac{2D_u}{c}$ - время запаздывания.

Частота $\Delta f_{\text{дальн}}$ прямо пропорциональна дальности:

$$\Delta f_{\text{дальн}} = f_{3C} - f_{\text{Прин.с}} = \left(f_{\text{н}} + \frac{\Delta f_{\text{д}} t}{\tau_u} \right) - \left(f_{\text{н}} + \frac{\Delta f_{\text{д}} \left(t - \frac{2D_{\text{ц}}}{c} \right)}{\tau_u} \right) =$$

$$= \frac{\Delta f_{\text{д}} \left(\frac{2D_{\text{ц}}}{c} \right)}{\tau_u} = \frac{2 \times \Delta f_{\text{д}} \times D_{\text{ц}}}{c \times \tau_u}. \quad (2)$$

Следовательно, можно в интервале времени $\tau_u - t_3$ непосредственно измерить $\Delta f_{\text{дальн}}$ и определить дальность до цели из соотношения

$$D_{\text{ц}} = \frac{\Delta f_{\text{дальн}} \times c \times \tau_u}{2 \times \Delta f_{\text{д}}}. \quad (3)$$

Реальная цель является подвижным объектом, следовательно, доплеровская добавка частоты принятого от нее сигнала не равна нулю $F_{\text{д}} \neq 0$. Поэтому процедура измерения дальности включает несколько последовательно выполняемых этапов:

- 1) измеряется $F_{\text{д}}$ (способы измерения $F_{\text{д}}$ рассмотрим в одном из следующих подвопросов);
- 2) определяется $\Delta f_{\text{дальн}} = (f_{3C} - f_{\text{Прин.с}}) - F_{\text{д}}$;
- 3) определяется дальность из соотношения (3).

Пример.

Дано: Зондирующий сигнал РЛС – прямоугольный радиоимпульс длительностью $\tau_u = 2\text{мс}$ с линейной частотной модуляцией, девиация частоты $\Delta f_{\text{д}} = 500\text{кГц}$. Расстояние до цели составляет $D_{\text{ц}} = 60\text{ км}$. Цель неподвижна ($F_{\text{д}} = 0$).

Определить: разницу частот $\Delta f_{\text{дальн}}$.

Решение:

1. Проверяем соотношение длительности импульса и времени запаздывания ($\tau_u \gg t_3$).

$$t_3 = \frac{2D_u}{c} = \frac{2 \times 6 \times 10^4}{3 \times 10^8} = 4 \times 10^{-4} \text{ сек.}$$

$$2 \times 10^{-3} \text{ сек} \gg 4 \times 10^{-4} \text{ сек.}$$

2. Используем ранее полученную формулу (2) для определения значения $\Delta f_{\text{дальн}}$:

$$\Delta f_{\text{дальн}} = f_{3C} - f_{\text{Прин.С}} = \frac{2 \times \Delta f_{\delta} \times D_u}{c \times \tau_u}.$$

Подставляем в формулу исходные данные:

$$\Delta f_{\text{дальн}} = \frac{2 \times 5 \times 10^5 \times 6 \times 10^4}{3 \times 10^8 \times 2 \times 10^{-3}} = \frac{6 \times 10^{10}}{6 \times 10^5} = 10^5 = 100 \text{ кГц.}$$

Вывод:

С учетом исходных данных (параметров зондирующего сигнала) величина $\Delta f_{\text{дальн}} = 100 \text{ кГц}$ соответствует дальности до цели $D_u = 60 \text{ км}$.

Рассмотрим аналогичную задачу, только в качестве неизвестного параметра определим дальность до цели D_u .

Дано: Зондирующий сигнал РЛС – прямоугольный радиоимпульс длительностью $\tau_u = 5 \text{ мс}$, девиацией частоты $\Delta f_{\delta} = 500 \text{ кГц}$. Цель неподвижна ($F_{\delta} = 0$). Разностная частота составляет $\Delta f_{\text{дальн}} = 50 \text{ кГц}$.

Определить: D_u

Решение:

1. Проверяем возможность применения частотного метода в заданных условиях.

Как следует из рисунка 6 условие $\tau_u \gg t_3$ равносильно условию $\Delta f_{\delta} \gg \Delta f_{\text{дальн}}$.

Очевидно, что это условие выполняется ($500 \text{ кГц} \gg 50 \text{ кГц}$).

2. Для решения используем формулу (3), из которой найдем значение дальности до цели D_u :

$$D_u = \frac{c \times \tau_u \times \Delta f_{\text{дальн}}}{2 \Delta f_{\delta}}.$$

Подставляем в формулу исходные данные:

$$D_{ц} = \frac{3 \times 10^8 \times 5 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^4}{2 \times 5 \times 10^5} = \frac{15 \times 10^9}{2 \times 10^5} = 7,5 \times 10^4 = 75 \text{ км.}$$

С учетом исходных данных (параметров зондирующего сигнала и величины $\Delta f_{\text{дальн}} = 50 \text{ кГц}$), дальность до цели составит $D_{ц} = 75 \text{ км}$.

Вывод:

а) При увеличении девиации частоты Δf_{∂} , значение $\Delta f_{\text{дальн}}$ тоже возрастет, т.е. $\Delta f_{\text{дальн}}$ прямо пропорциональна девиации частоты Δf_{∂} .

б) При увеличении длительности импульса $\Delta f_{\text{дальн}}$ уменьшается, т.е. $\Delta f_{\text{дальн}}$ обратно пропорциональна длительности импульса.

Для измерения дальности в **системах активной локации с активным ответом** необходимо иметь в виду, что кроме времени запаздывания, затрачиваемого на движение радиосигнала от РЛС к цели и обратно, появляется еще время срабатывания ответчика (ретранслятора) $t_{ср}$.

$$t_{пр} - t_{изл} = t_з + t_{ср}.$$

Это время необходимо ответчику на прием ЗС, его анализ, формирование и излучение в пространство ответного сигнала. Время срабатывания в реальных РЛ системах может составлять десятки микросекунд. Следует учесть, что в системах активной локации с активным ответом сигнал непосредственно отраженный от цели не используется, так как его мощность много меньше (в 1000 и более раз), чем мощность ответного сигнала.

Способ непосредственного измерения $t_з$ для использования в системах с активным ответом необходимо видоизменить. Главной проблемой является возможное несовпадение времен срабатывания $t_{ср}$ у различных ответчиков. Поэтому при проектировании системы вводится заранее известное единое фиксированное время срабатывания $t_{ср \text{ фикс}}$, которое конструктивно вносится во все ответчики (рисунок 7).

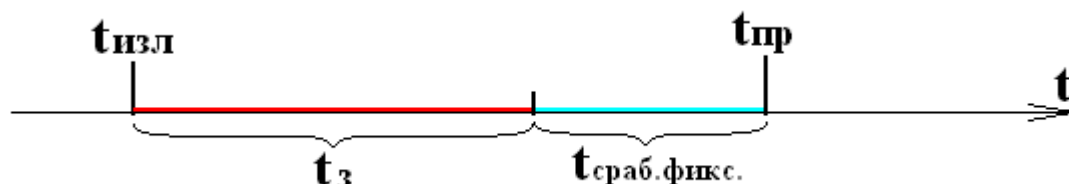


Рис.7. Принцип определения времени запаздывания в радиолокационных системах с активным ответом

Время запаздывания в этом случае определяется как

$$t_z = (t_{пр} - t_{изл}) - t_{ср.фикс.},$$

а дальность вычисляется из выражения (1).

В системах **пассивной радиолокации** осуществляется только прием сигнала, излучение ЗС не предусмотрено, поэтому способы измерения дальности, основанные на сравнении временных, частотных или иных параметров зондирующего и принятого сигналов неприменимы.

Определение дальности в системах пассивной локации основывается на различных вариантах триангуляционных (основанных на свойствах треугольников) измерений.

Для построения измерительного треугольника используются две точки приема – основная А и дополнительная Б, разнесенные на фиксированное расстояние d , называемое базой измерения, третьей вершиной треугольника является цель (рисунок 8).

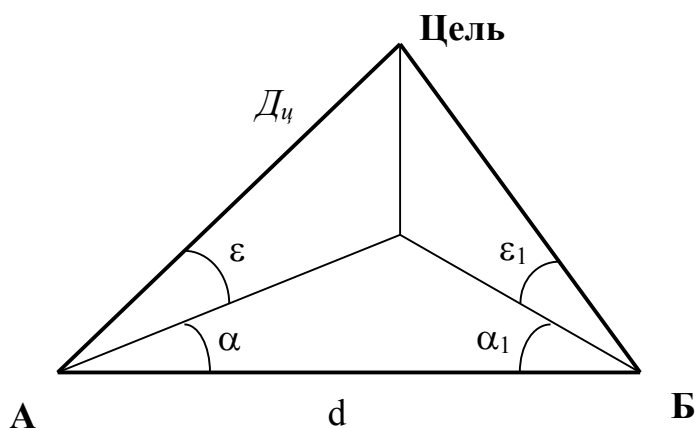


Рис.8. Принцип триангуляционного измерения дальности

Непосредственно измеряются углы ε , α , α_1 , а дальность находится из соотношения:

$$D_u = \frac{d}{\cos \varepsilon \times (\cos \alpha - \sin \alpha \times \operatorname{ctg} \alpha_1)}.$$

1.2 Способы измерения угловых координат

Угловые координаты цели определяются на основании свойства прямолинейности распространения электромагнитной волны. При этом за направление на цель принимается направление прихода отраженного от нее сигнала на антенную систему. Это направление описывается двумя угловыми координатами, измеряемыми во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Для измерения этих координат необходимо:

- задать начало координат. Как правило, точка начала координат выбирается в центре антенной системы РЛС (для наземных станций обнаружения и наведения ракет эта точка называется точкой стояния РЛС, а для зенитной управляемой ракеты (ЗУР) в полете эта точка совпадает с центром масс ракеты);

- задать ориентацию плоскостей. Для РЛС обнаружения одна плоскость является горизонтальной, а другая вертикальной, проходящей через точку стояния РЛС и цель. Для станции наведения ракет вместо горизонтальной плоскости используется наклонная плоскость, угол наклона которой определяется углом подъема нормали антенны к горизонту. Для ЗУР в полете используются плоскости курса и тангажа, которые будут рассмотрены при изучении ЗУР.

Принципы измерения углов не зависят от выбранной системы координат. Рассмотрим их на примере РЛС обнаружения, измеряющей азимут и угол места цели (пересчет координат из одной системы в другую осуществляется по известным справочным формулам).

Азимутом β называется угол в горизонтальной плоскости между направлением «РЛС-Север» и проекцией линии «РЛС-цель» на горизонтальную плоскость (рисунок 9а).

Углом места ε называется угол между направлением «РЛС-цель» и горизонтальной плоскостью (рисунок 9б).

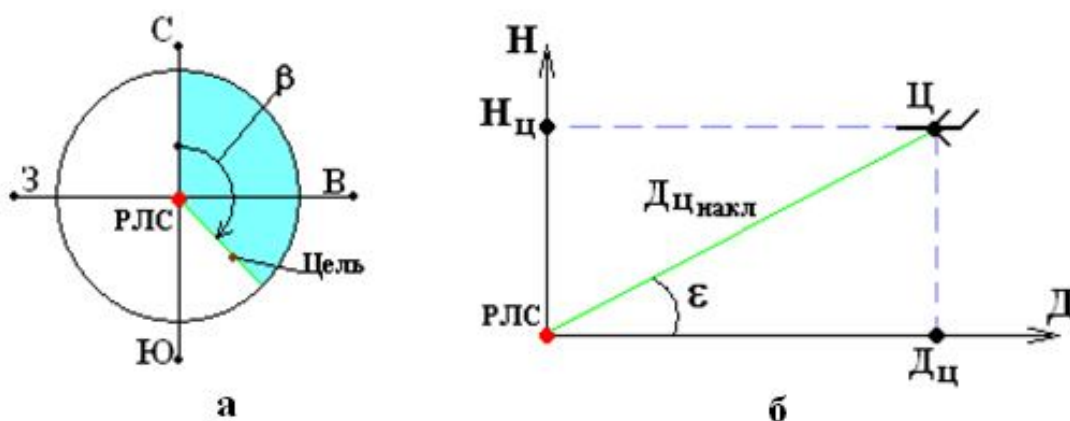


Рис.9. Виды координат в РЛС

Для измерения угловых координат необходимо сфокусировать мощность излучаемого зондирующего сигнала на цели и точно определить направление прихода отраженного от нее сигнала. Следовательно, в РЛС, измеряющих угловые координаты, приемная и передающая антенны должны иметь узкую направленность.

Количественной мерой направленных свойств антенны является ее коэффициент усиления G (рисунок 10).

Коэффициент усиления показывает, во сколько раз в заданном направлении мощность излучения направленной антенны $P_{изл2}$ превышает мощность излучения ненаправленной антенны $P_{изл1}$ при одинаковой мощности передатчика $P_{nep1}=P_{nep2}=const$.

$$G = \frac{P_{изл2}}{P_{изл1}}$$

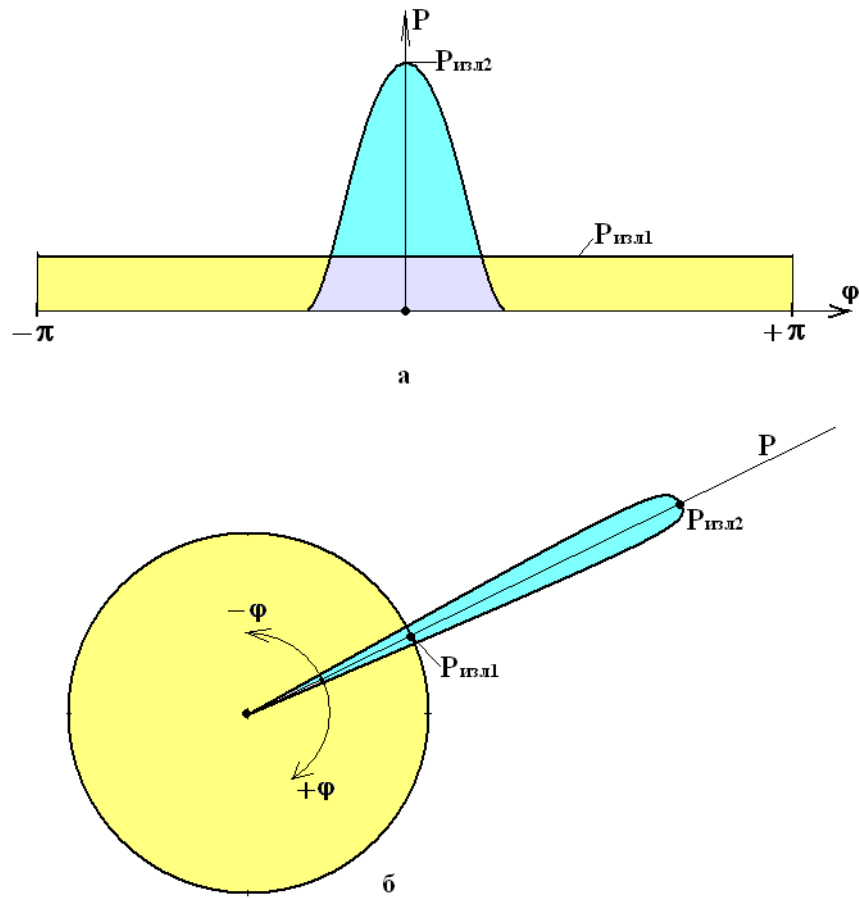


Рис.10. Излучение направленной и ненаправленной антенн в азимутальной плоскости

Для приемных антенн коэффициент усиления показывает во сколько раз мощность сигнала, принятого направленной антенной будет больше мощности сигнала, принятого ненаправленной антенной.

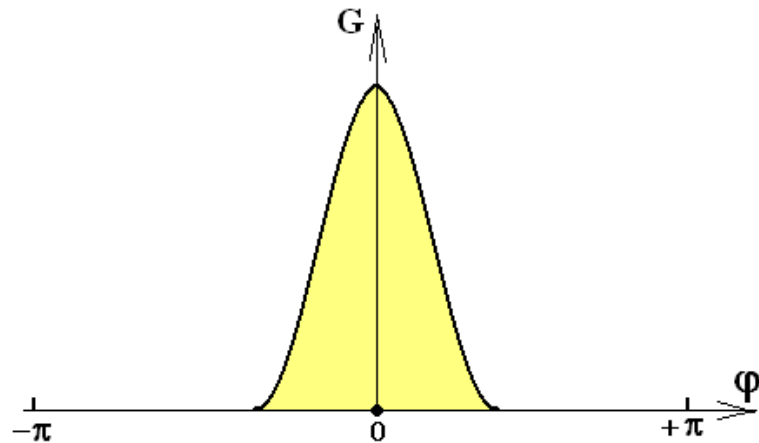


Рис.11. ДН - зависимость коэффициента усиления антенны от угла

Коэффициент усиления характеризует направленные свойства антенны в заданном направлении. Для полного описания направленных свойств антенны используется его зависимость от угла $G(\varphi)$ (рисунок 11), которую называют диаграммой направленности (ДН).

Диаграммы направленности позволяют описать свойства как передающих так и приемных антенн.

Простейшим методом измерения угловых координат является **метод максимума**. Он применяется в обзорных РЛС, где обеспечивается перемещение ДН по измеряемой координате с угловой скоростью $\omega_{\text{л}}$ (сканирование пространства по угловой координате). Угловое положение цели определяется по направлению ДН антенны в момент приема максимума отраженного сигнала.

Для определения методом максимума значения азимута β организуется круговое сканирование с заданной скоростью $\omega_{\text{л}}$. Измеряемым параметром является время от момента прохождения лучом направления на север ($t=0$) до момента получения максимума отраженного от цели сигнала $t_{\text{ц}}$.

Азимут цели рассчитывается из соотношения $\beta_{\text{ц}} = t_{\text{ц}} \times \omega_{\text{л}}$.

В этом случае точность измерения углового положения цели напрямую зависит от ширины ДН антенны. Чем уже ДН антенны, тем выше точность измерения угловых координат (рисунок 12).

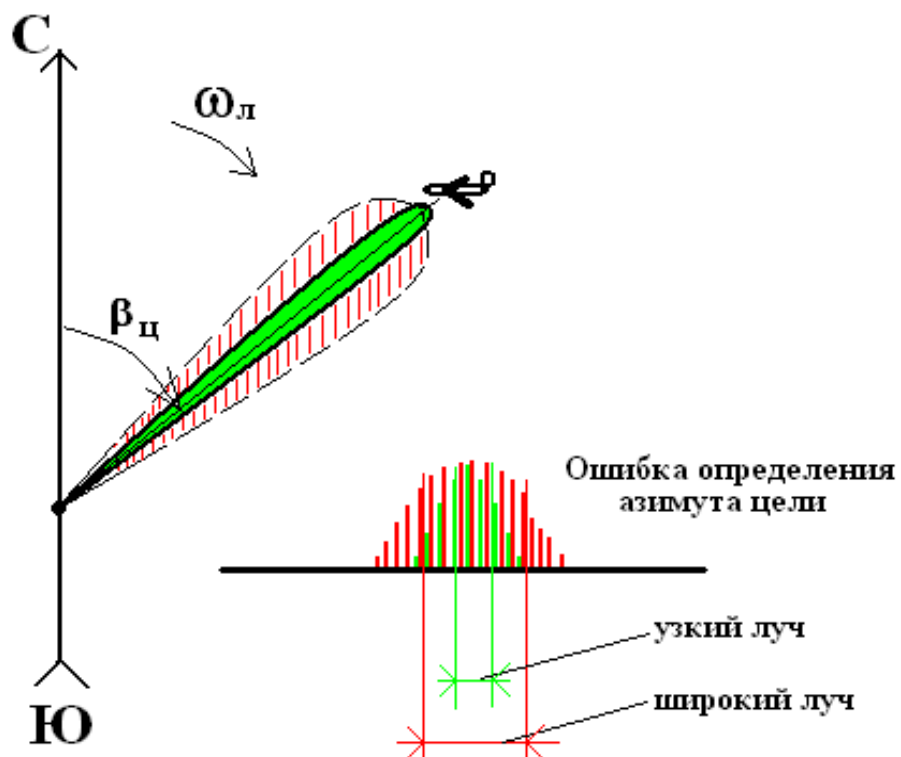


Рис.12. Метод максимума определения угловых координат

Недостатком метода максимума является низкая точность измерения углов, сравнимая с шириной ДН (практически достижимая минимальная ширина ДН составляет $0,7^\circ$).

Для повышения точности измерения применяются методы, основанные на **суммарно-разностной обработке** принимаемых сигналов.

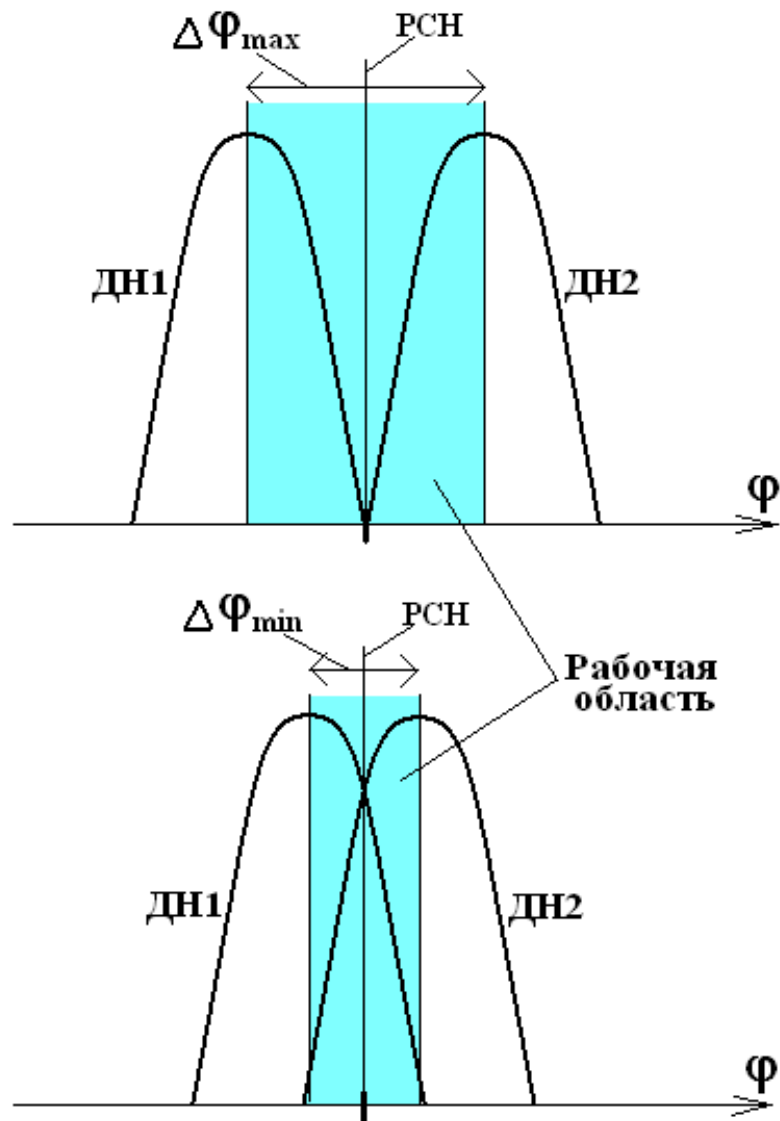


Рис.13. Парциальные ДН

Суммарно-разностная обработка требует использования нескольких ДН (по паре на каждую измеряемую угловую координату), разнесенных между собой. Такие ДН называются парциальными. Величина угла рассогласования $\Delta\phi$ находится в пределах от половины до полной ширины лепестка ДН (рисунок 13).

Сигнал, отраженный от цели, принимается обеими ДН. Направление пересечения ДН1 и ДН2 принято называть равносигнальным направлением (РСН). Суммарно-разностная обработка пары принятых сигналов позволяет зафиксировать факт совпадения РСН с направлением на цель, или измерить ошибку между ними. При совпадении РСН с направлением на цель амплитуды сигналов, принятых ДН1 (A_1) и ДН2 (A_2) равны между собой, а

их разность равна $A_1 - A_2 = 0$. Если разность не равна 0, то она пропорциональна ошибке между РСН и направлением на цель.

Поскольку при примерном совпадении направлений разность близка к 0, то для дальнейшей обработки принятого сигнала (измерение других координат и визуальное отображение сигнала) в РЛС необходимо использовать суммарный сигнал $A_1 + A_2 = A_{\Sigma}$.

Достоинством этих методов является высокая точность измерения (ошибки составляют единицы угловых минут), а недостатками являются сложность антенной системы и невозможность измерения угла, если ошибка между РСН и направлением на цель превышает рассогласование между ДН1 и ДН2 ($\Delta\varphi$), т.е. выходит за пределы рабочей области.

1.3 Способы измерения радиальной скорости

Эффект Доплера стоит в том, что если объект отражающий или излучающий сигнал движется, то неподвижный наблюдатель зафиксирует изменение частоты принимаемого сигнала. Если объект движется к наблюдателю – частота сигнала растет, если от наблюдателя – уменьшается.

Наглядной иллюстрацией влияния скорости объекта на частоту является звук тепловозного гудка, который слышат пассажиры на неподвижном перроне: у приближающегося тепловоза звук гудка кажется выше, у удаляющегося – ниже.

На основании эффекта Доплера определяется радиальная скорость цели V_r .

Непосредственно измеряется так называемая «доплеровская добавка частоты» $F_d = f_{\text{прин}} - f_{\text{изл}}$ как разность между частотами излученного ($f_{\text{изл}}$) и принятого от цели ($f_{\text{прин}}$) сигналов.

Радиальная составляющая скорости движения цели определяется в соответствии с выражением:

$$V_r = \frac{F_d \lambda}{2}, \quad (3)$$

где: λ –длина волны излученного РЛС сигнала.

F_d и V_r имеют положительные значения если цель приближается к РЛС, и отрицательные - если цель удаляется от РЛС.

Для измерения радиальной скорости как правило используются устройства, построенные на узкополосных частотных фильтрах. Под фильтром понимается устройство, на выход которого проходят только сигналы в пределах узкого заданного диапазона частот (так называемая полоса пропускания фильтра Δf_ϕ). Сигналы на всех других частотах на выход не проходят (подавляются). Для оценки радиальной скорости (например, в доплеровских РЛС обнаружения) как правило формируется набор фильтров, полосы пропускания которых равны Δf_ϕ , следуют одна за другой и перекрывают весь диапазон возможных доплеровских добавок.

Количество фильтров зависит от возможного диапазона скоростей цели или от диапазона скоростей, представляющих интерес для работы конкретной РЛС. Ширина полосы пропускания каждого фильтра согласуется с частотными характеристиками ЗС.

В этом случае, чтобы оценить радиальную скорость цели в соответствии с выражением 3 достаточно определить номер фильтра, на выход которого прошел сигнал «звонящий фильтр» (рисунок 14) и воспользоваться соотношением $F_d = F_{d \min} + n \times \Delta f_\phi$.

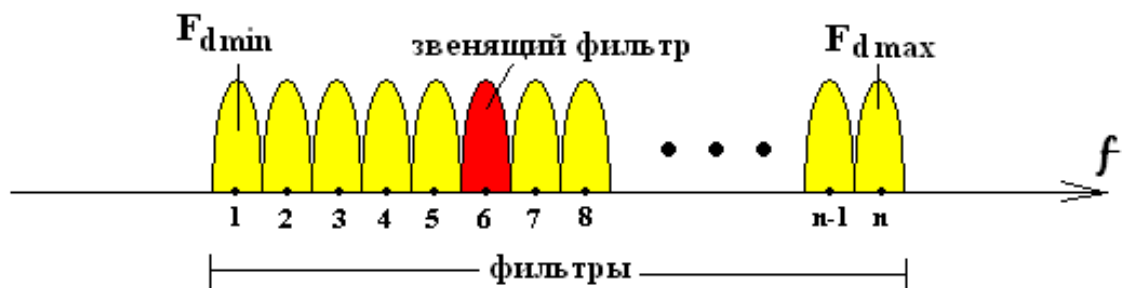


Рис.14. Распределение фильтров на частотной оси для определения F_d

Другими словами, скорость цели можно определить по порядковому номеру фильтра, на выходе которого появился сигнал. Если в такую систему добавить устройство последовательного опроса фильтров, то тогда появляется возможность визуального отображения принятого сигнала на экране индикатора. Примерная схема такого устройства представлена на рисунке 15.

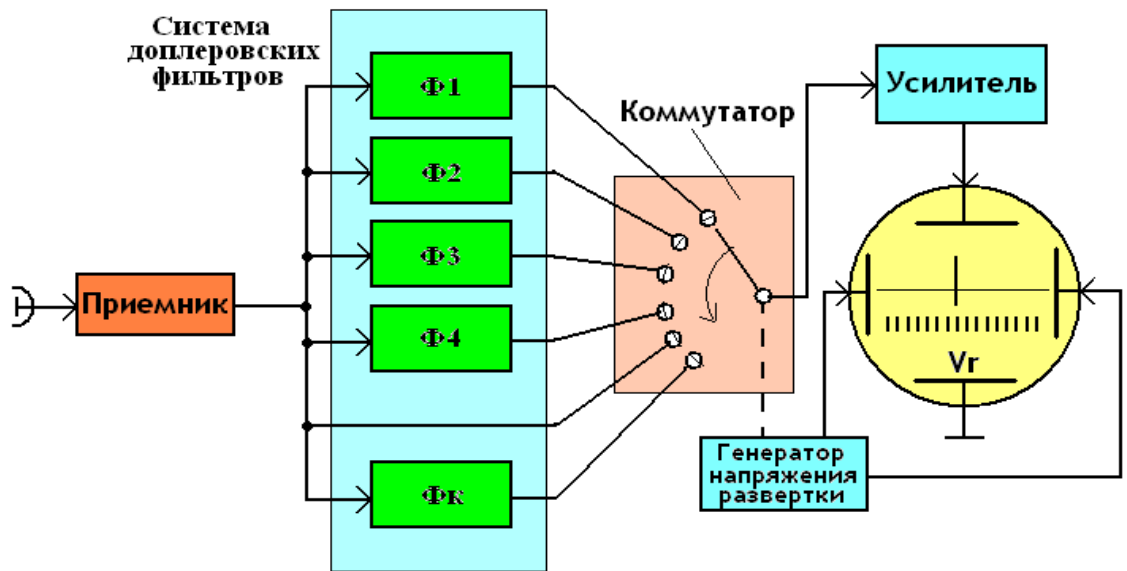


Рис.15. Схема измерителя скорости (вариант)

Поскольку нас в основном интересуют РЛС, используемые в системах противовоздушной обороны, то данная схема измерителя скорости позволяет определять момент пуска ракеты с обнаруженного воздушного объекта. Такая ракета будет обладать большей скоростью по сравнению с ее носителем и меньшей отражающей поверхностью. В этом случае на экране индикатора можно наблюдать эффект разделения одной отметки от цели на две различные отметки (рисунок 16).

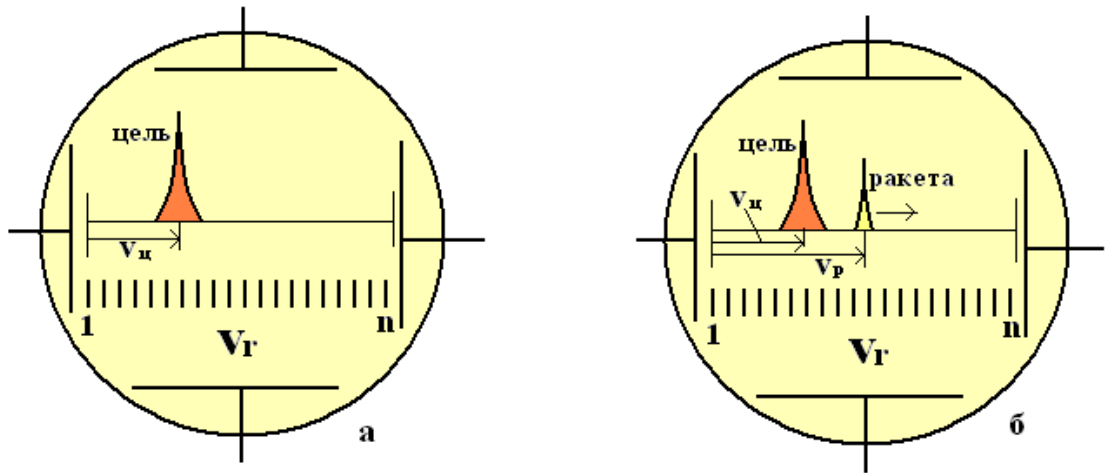


Рис.16. Индикатор скорости цели

На рисунке 16а мы видим сигнал цели и можем определить ее скорость по принятой градуировке, а на рисунке 16б мы видим ту же цель и еще одну отметку, которая отделяется от цели и движется в сторону увеличения скорости. Таким образом, можно однозначно разделить два объекта по скорости.

2. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РЛС

Способность РЛС определить, является ли цель одиночным или групповым объектом, называется разрешающей способностью.

Разрешающая способность РЛС – это минимально возможное смещение одной цели относительно другой цели хотя бы по одной координате (при одинаковых значениях всех других координат), при котором возможно раздельное их наблюдение и измерение координат и параметров движения целей.

Разрешающая способность зондирующих сигналов по дальности определяется временем, в пределах которого возможно слитное наблюдение сигнала и его сдвинутой по времени копии (рисунок 17).

Разрешающая способность по дальности ΔD определяется по формуле:

$$\Delta D = c \times \tau_w / 2$$

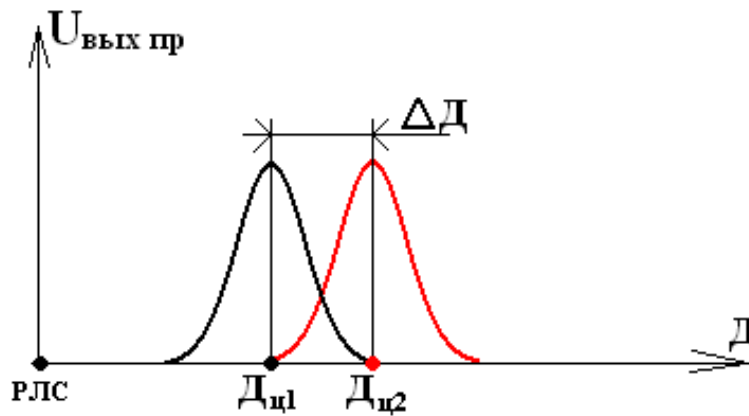


Рис.17. Разрешающая способность по дальности

В этом случае условие разрешения целей по дальности можно выразить как:

$$|D_{ц2} - D_{ц1}| \geq c \times \tau_n / 2$$

Разрешающая способность зондирующих сигналов по скорости целей (по частоте Доплера) ΔF_d определяется частотным сдвигом, в пределах которого возможно слитное наблюдение сигнала и его сдвинутой по частоте копии.

Разрешающая способность по радиальной скорости в РЛС, использующих фильтровой способ измерения V_r , определяется шириной полосы пропускания фильтров Δf_ϕ :

$$\Delta V_r = \lambda \times \Delta f_\phi / 2$$

Таким образом, условие разрешения целей по скорости можно записать как:

$$|V_{r2} - V_{r1}| \geq \lambda \times \Delta f_\phi / 2.$$

Зону обзора РЛС можно визуально разбить на элементарные объемы пространства по угловым координатам и дальности (рисунок 18).

Выделим в зоне обзора четыре соседних элементарных объема 1, 2, 3, 4, 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 $\Delta \beta$ и 1,4 - только по углу места на $\Delta \epsilon$, причем все цели наблюдаются раздельно. Будем сокращать каждую из величин ΔD , $\Delta \beta$, $\Delta \epsilon$ до тех пор, пока раздельное наблюдение целей станет невозможным. Тогда объем 1 и будет разрешаемым объемом и его элементами ΔD_{\min} , $\Delta \beta_{\min}$, $\Delta \epsilon_{\min}$ оценивается разрешающая способность станции по дальности, азимуту и по углу места.

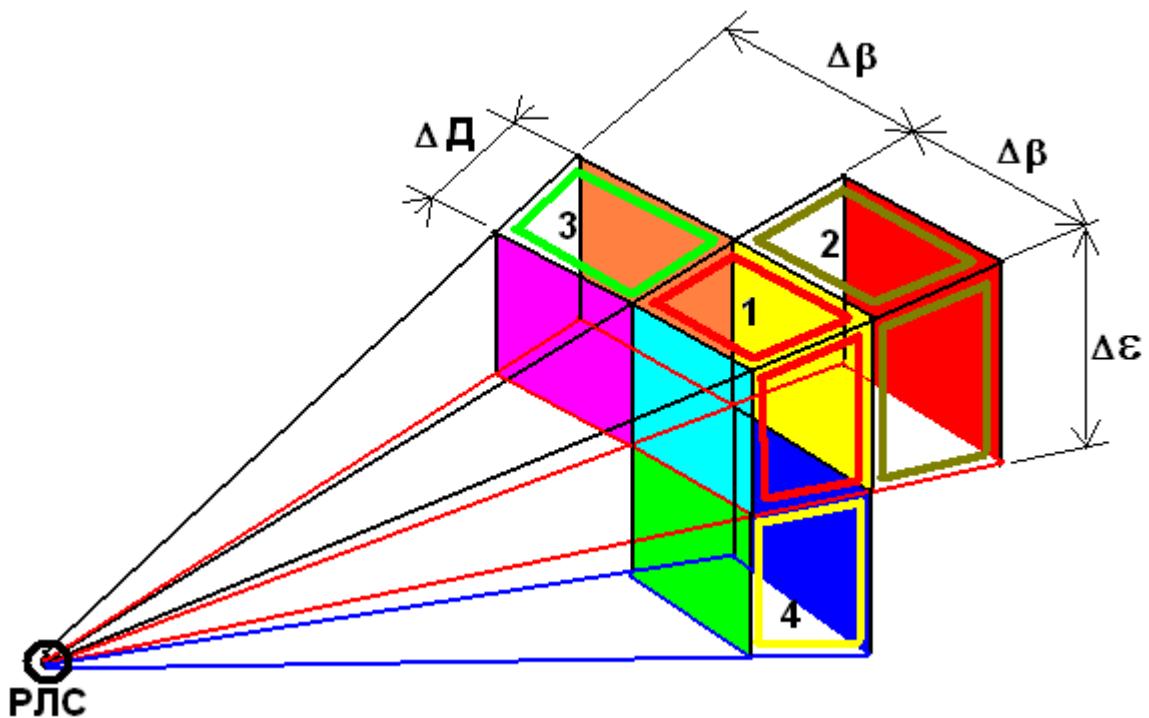


Рис.18. Элементарные объемы зоны обзора РЛС

Таким образом, **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 $\Delta \beta_{\min}$ 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 $\Delta \epsilon_{\min}$ двух целей с одинаковыми дальностью и азимутом, при которой эти цели, еще наблюдаются раздельно.

Разрешающая способность по скорости оценивается минимальной разностью радиальных скоростей ΔV_r двух целей с одинаковыми координатами D, β, ε , при которой эти цели еще наблюдаются раздельно.

Для принятия решения одиночная цель или групповая достаточно разрешения целей по одной координате.

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

ЗАДАНИЕ НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ РАБОТУ:

Повторить материал лекции. Изучить способы измерения координат.