Радиолокационные системы

32 лекции
4 лабораторные работы
Экзамен

Лектор: проф. каф. РТС
Владимир Григорьевич Андреев

Список рекомендуемой литературы

- 1. Васин В.В., Власов О.В., Григорин-Рябов В.В., Дудник П.И., Степанов Б.М. Радиолокационные устройства. Изд-во "Советское радио", 1970.
- 2. Дулевич В.Е. и др. Теоретические основы радиолокации. Изд-во "Советское радио", 1964.
- 3. Фалькович С.Е. Приём радиолокационных сигналов на фоне флуктуационных помех. Изд-во "Советское радио", 1961.
- 4. Бакулев П.А. Радиолокация движущихся целей. Изд-во "Советское радио", 1964.
- 5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Изд-во "Наука", 1969.
- 6.Гуткин Л.С. Теория оптимальных методов радиоприёма при флуктуационных помехах. Госэнергоиздат, 1961.
- 7.Левин Б.Р. Теория случайных процессов и её применение в радиотехнике. Изд-во "Советское радио", 1960.
- 8.Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов. Изд-во иностранной литературы, 1963.

Список рекомендуемой литературы

- 1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы.– М.: Радиотехника, 2004.– 319 с.– 621.396.96(021), Б198.– 65 экз.
- 2. Канащенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения.– М.: ИПРЖР, 2002.– 174 с.– 629.73, К191.– 12 экз.
- 3. Канащенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах; Ч.1.– М.: Радиотехника, 2004.– 309 с.– 621.396.96, О-931.– 5 экз.
- 4. Канащенков А.И., Меркулов В.И., Самарин О.Ф. Радиолокационное оборудование автоматизированных систем управления воздушным движением.– М.: Транспорт, 1995.– 34 с.– 621.396.96(021), Р154.– 2 экз.
- 5. Котоусов А.С. Теоретические основы радиосистем. Радиосвязь, радиолокация, радионавигация: Учеб. пособие.– М.: Радио и связь, 2002.– 224 с.– 21 экз.
- 6. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг. Задачи, методы, средства / Под ред. А.М. Рембовского. М: Горячая линия – Телеком, 2006. 492 с.
- 7. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов.– М.-С.Пб: Питер, 2006.– 750 с.

Общие сведения о радиолокации

Основные задачи радиолокации

Радиолокацией называется область радиотехники, использующая явления отражения и излучения электромагнитных волн различными объектами для обнаружения и измерения координат этих объектов. Радиотехнические устройства, предназначенные для решения указанных задач, называются радиолокационными станциями (РЛС).

С помощью радиолокационных средств решаются задачи:
- навигации,
- управления полётом и посадкой летательных аппаратов,
- проводкой кораблей,
- прогнозирования погоды,
- подповерхностного зондирования,
- экологического мониторинга,
- сопровождения объектов,
- дистанционного наведения,
- распознавания и т.д.

При решении задач радиолокационные станции обеспечивают:

- обнаружение объектов;
- определение их государственной принадлежности (опознавание);
- измерение координат объектов и определение их положения;
- определение параметров движения объектов, выявление их траекторий и предсказание их последующих положений;
- определение физических свойств и характеристик объектов.

Объектом радиолокационного наблюдения (целью) называется любое тело или группа тел с электрическими или магнитными свойствами, отличными от свойств среды, в которой распространяются радиоволны (активная локация).

Целью может быть также и тело, характеризующееся собственным излучением радиоволн (пассивная локация).

Радиолокационными целями являются самолёт, корабль, человек, грозовое облако, участок поверхности земли, специальный радиомаяк и т.п.

Физические основы обнаружения целей и определения их координат и скорости

При радиолокационном наблюдении информация о целях переносится радиолокационными сигналами. Радиолокационными сигналами называются электромагнитные колебания, параметры которых определенным образом связаны с целью.

Методы получения радиолокационных сигналов

1.Метод активной радиолокации является наиболее распространённым и основан на облучении цели электромагнитной энергией и приёме отражённых (рассеянных) целью радиоволн приёмным устройством РЛС.

2.Метод активного ответа – при этом при облучении цели электромагнитной энергией срабатывает установленный на цели ретранслятор (ответчик), который посылает вполне определённые радиосигналы; эти сигналы принимаются приёмником РЛС.

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

Измерение координат обнаруженных целей основано на определении значений параметров радиолокационных сигналов, несущих информацию об этих целях. При этом используются следующие физические свойства радиоволн:

- скорость распространения радиоволн в свободном пространстве (с) имеет конечное и приблизительно постоянное значение;

- траектории распространения радиоволн можно считать прямыми линиями;

- частота принимаемых электромагнитных колебаний отличается от частоты излучённых колебаний в том случае, если цель перемещается относительно РЛС (эффект Доплера).

Время распространения радиоволн от РЛС до цели и обратно t_D:

$$t_D = \frac{2D}{c}$$

Дальность цели по методу активной радиолокации:

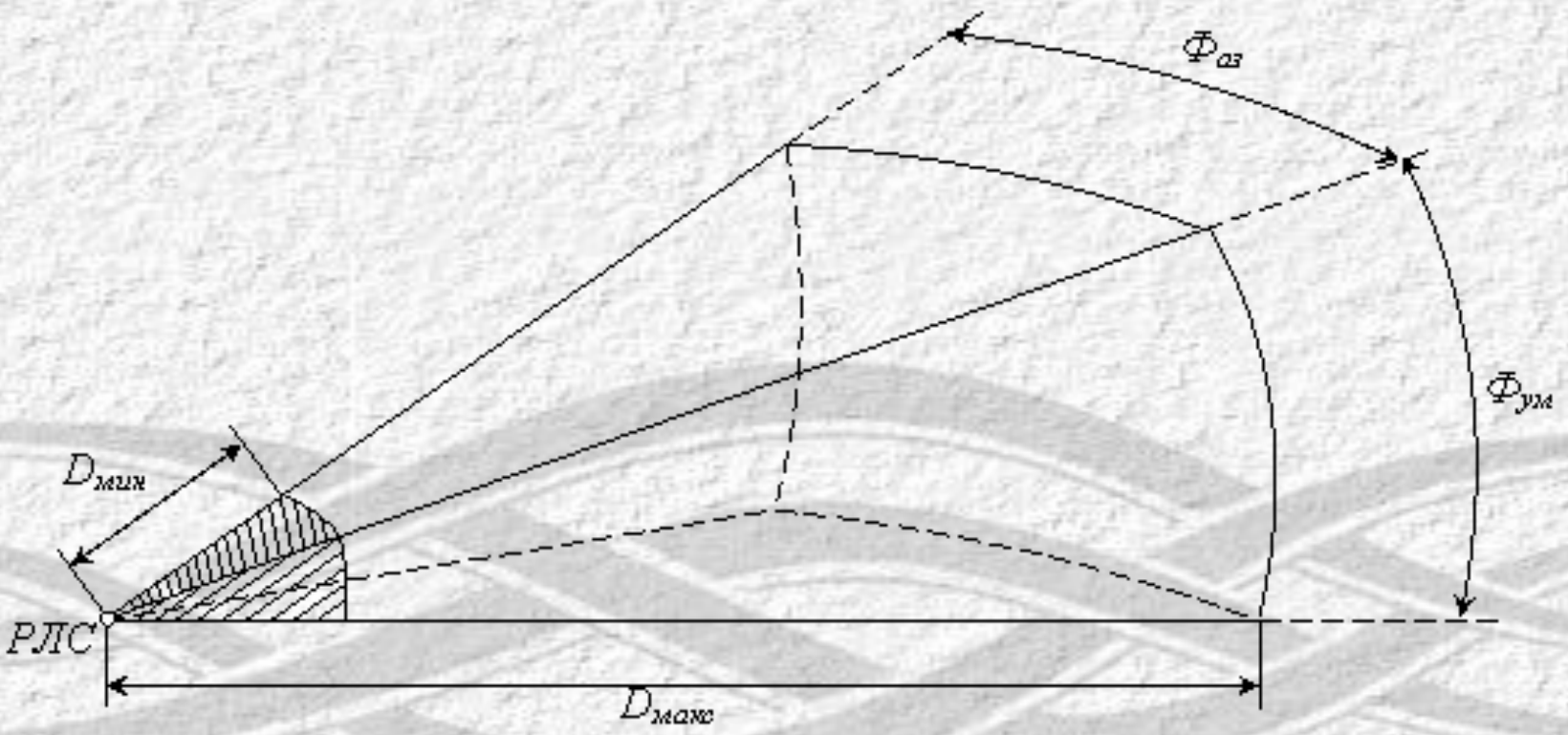
$$D = \frac{ct_D}{2}$$

Величину t_D называют временем запаздывания отражённого сигнала.

Тактические данные и технические характеристики РЛС

- При проектировании новых РЛС необходимо учитывать следующие тактические данные аппаратуры:
- - размеры области пространства, в пределах которой осуществляется наблюдение целей, - зону обзора;
- - время, требующееся для осмотра заданной области, или период обзора ***Тобз***;
- - измеряемые координаты;
- - точность измерения координат и скорости целей;
- - разрешающую способность;
- - эксплуатационную надёжность;
- - помехозащищённость.

Зона обзора ограничивается максимальной (***Dмакс***) и минимальной (***Dмин***) дальностью действия и секторами обзора в горизонтальной (***Фаз***) и вертикальной (***Фум***) плоскостях.



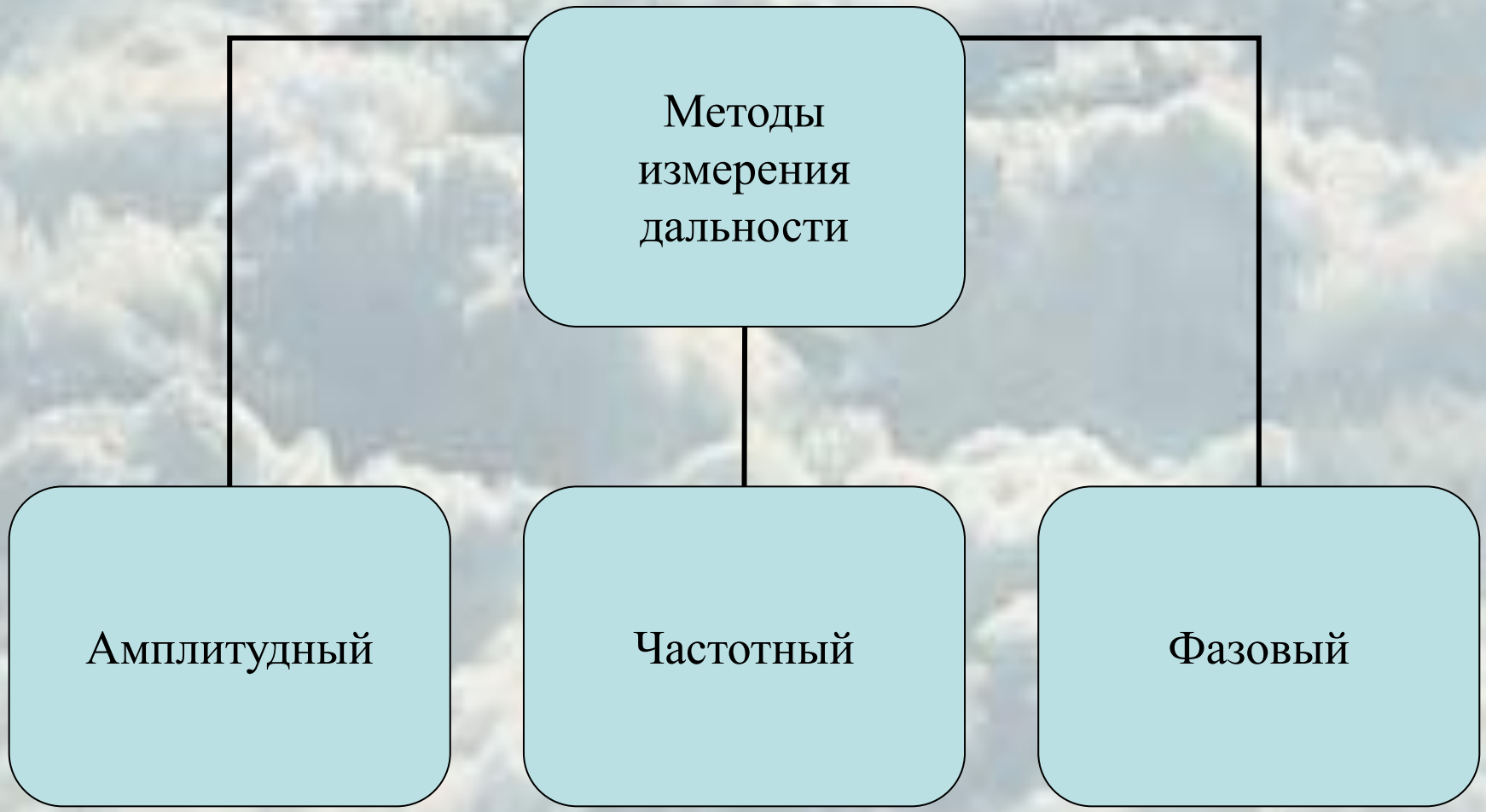
- Разрешающая способность РЛС характеризует возможность раздельного наблюдения целей, которые отличаются либо значением одной из координат, либо скоростью движения.
- ***Разрешающая способность по дальности δ(D)*** определяется минимальным расстоянием между двумя целями, имеющими одинаковые угловые координаты и скорости, при котором эти цели наблюдаются раздельно. Если расстояние между целями станет меньше ***δ(D)***, то РЛС будет воспринимать их как одну цель.
- ***Разрешающая способность по угловой координате δ(φ)*** определяется минимальным углом между направлениями на две цели, характеризующиеся одинаковыми дальностями и скоростями движения, при котором возможно раздельное наблюдение целей.
- ***Разрешающая способность по скорости δ(Vр)*** определяется минимальным различием скоростей двух целей, наблюдаемых раздельно, при условии равенства их дальностей и угловых координат.
- ***Эксплуатационной надёжностью РЛС*** называется её свойство выполнять заданные функции в течение определённого времени в допускаемых при эксплуатации условиях. Обычно эксплуатационную надёжность характеризуют вероятностью безотказной работы станции в течение заданного промежутка времени.

- Тактические данные РЛС определяются её *техническими характеристиками:*
- - принцип построения РЛС (метод получения радиолокационных сигналов, вид излучаемых колебаний, способ обработки сигналов в приёмнике);
- - несущая частота излучаемых колебаний ***f*** или длина волны λ;
- - закон модуляции излучаемых колебаний;
- - средняя ***Pср*** и пиковая ***Pи*** мощности излучения;
- - форма и ширина диаграммы направленности антенны $\theta_{аз}$, $\theta_{ум}$;
- - чувствительность приёмного устройства по мощности ($P_{пр\ мин}$) или энергией ($E_{пр\ мин}$);
- - тип выходного устройства.

Методы измерения координат и параметров движения радиолокационных целей

Методы измерения дальности в активных РЛС

Классификация методов измерения дальности по параметрам сигналов

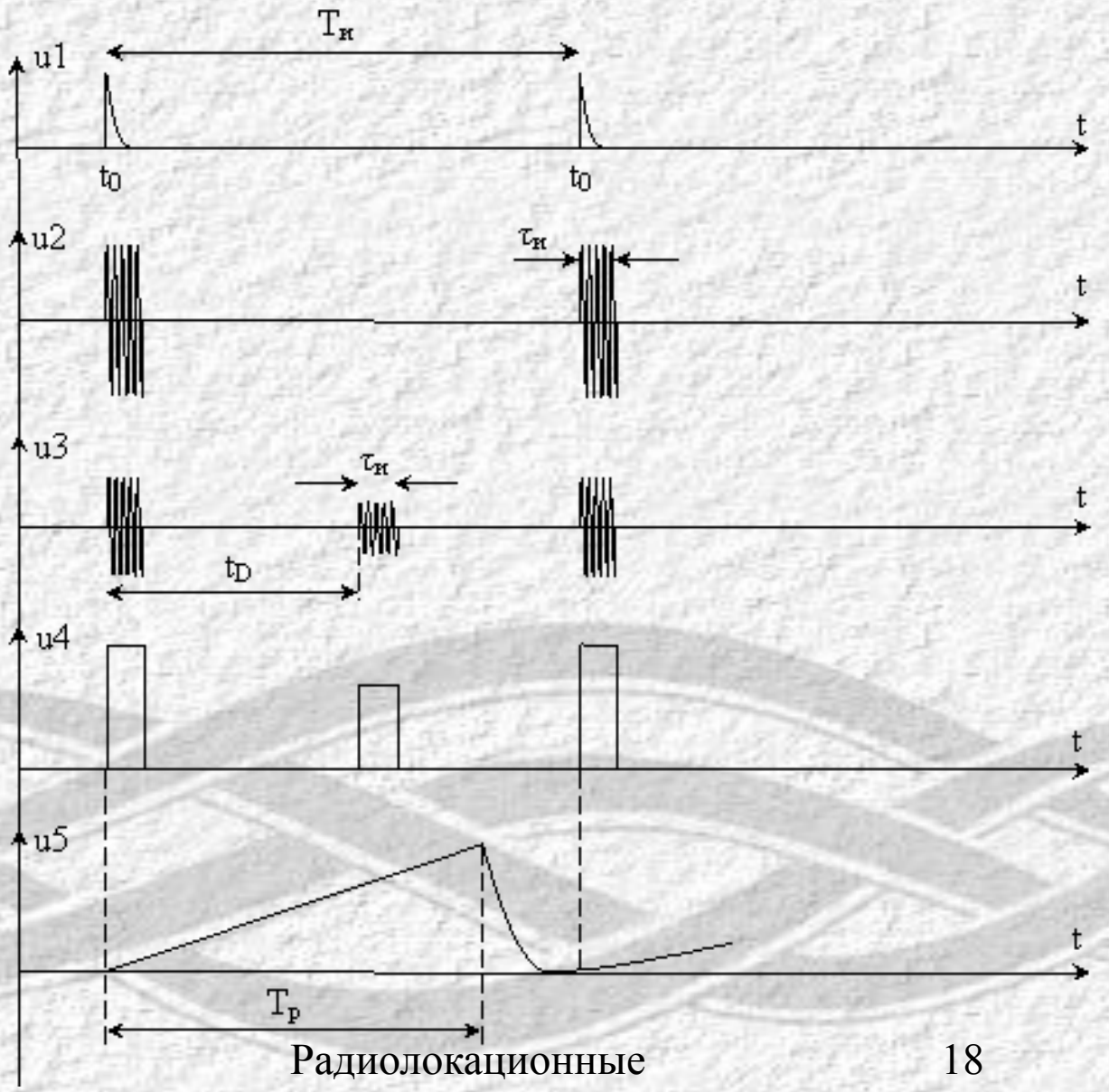


Амплитудный метод измерения дальности

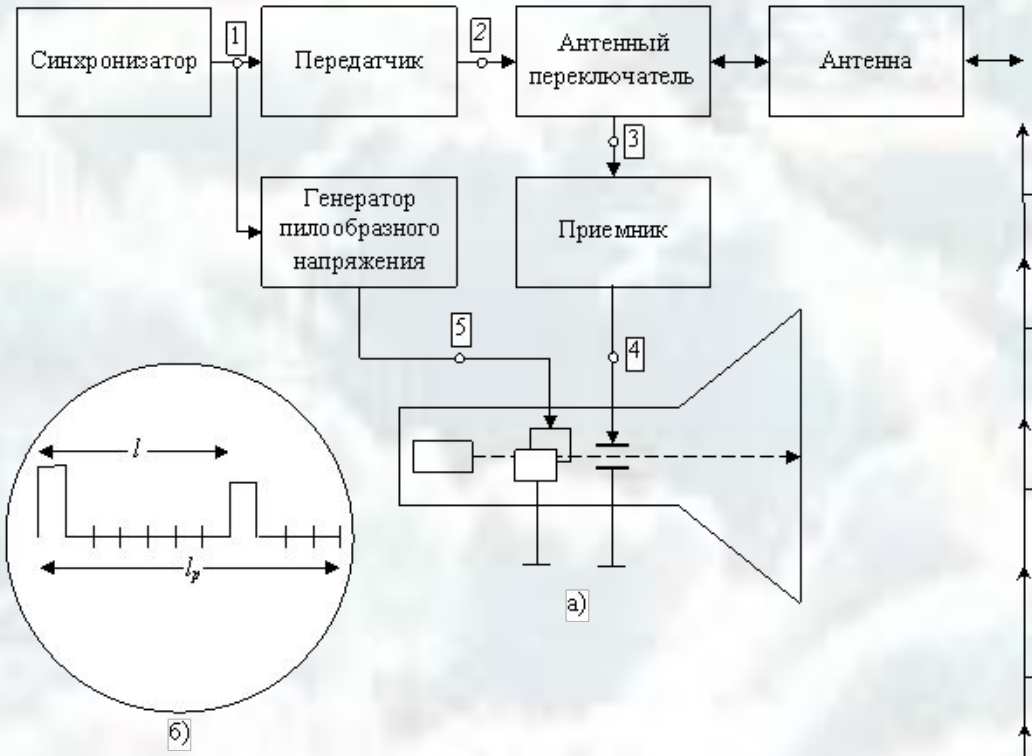
- Используется постоянство скорости распространения электромагнитной энергии.
- Определяется время запаздывания характерного изменения амплитуды принимаемого радиолокационного сигнала.
- Модуляция излучаемых колебаний обычно импульсная.

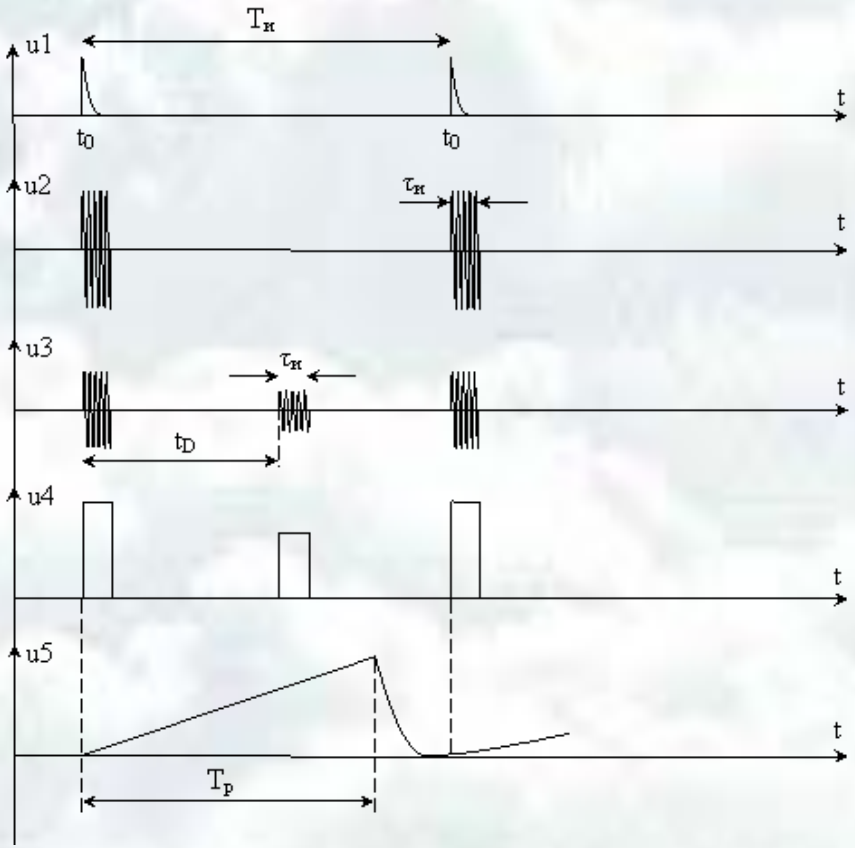
Функциональная схема импульсного измерителя дальности (*а*) изображение сигналов на экране электроннолучевого индикатора (*б*)

Эпюры напряжений в точках 1-5 схемы импульсного дальномера



Функциональная схема импульсного измерителя дальности (*а*) изображение сигналов на экране электроннолучевого индикатора (*б*) и эпюры напряжений в точках 1-5





Измерение дальности импульсным методом

- Пятно на экране воспроизводит огибающие излучённого и отражённого импульсов, расстояние между которыми l пропорционально дальности обнаруженной цели:

$$l = V_{П} t_D = V_{П} \frac{2D}{c},$$

где $V_{П}$ – скорость движения пятна по экрану индикатора, t_D.

- Измеряемая дальность:

$$D = \frac{c}{2V_{П}} l$$

Особенности импульсного метода

Достоинства импульсных дальномеров:

- возможность построения РЛС с одной антенной;
- простота индикаторного устройства;
- удобство одновременного измерения дальности многих целей;
- простота разделения излучаемых импульсов, длящихся очень малое время, и принимаемых сигналов.

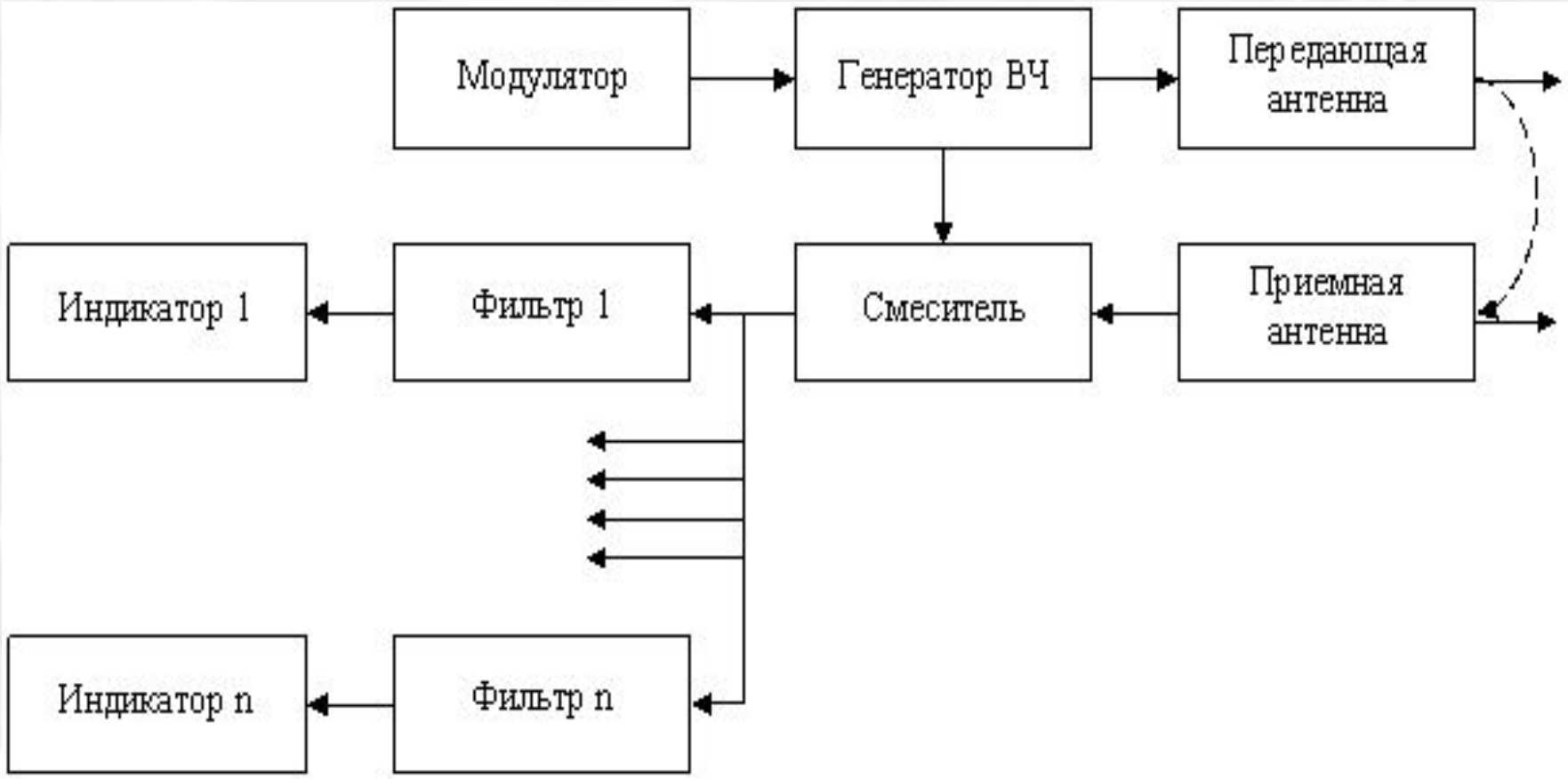
Недостатки импульсных дальномеров:

- необходимость использования больших импульсных мощностей передатчиков;
- невозможность измерения малых дальностей;
- большая слепая зона - минимальная дальность станции (определяющаяся длительностью излучаемых импульсов и временем протекания переходных процессов в антенном переключателе), которая составляет сотни или даже тысячи метров.

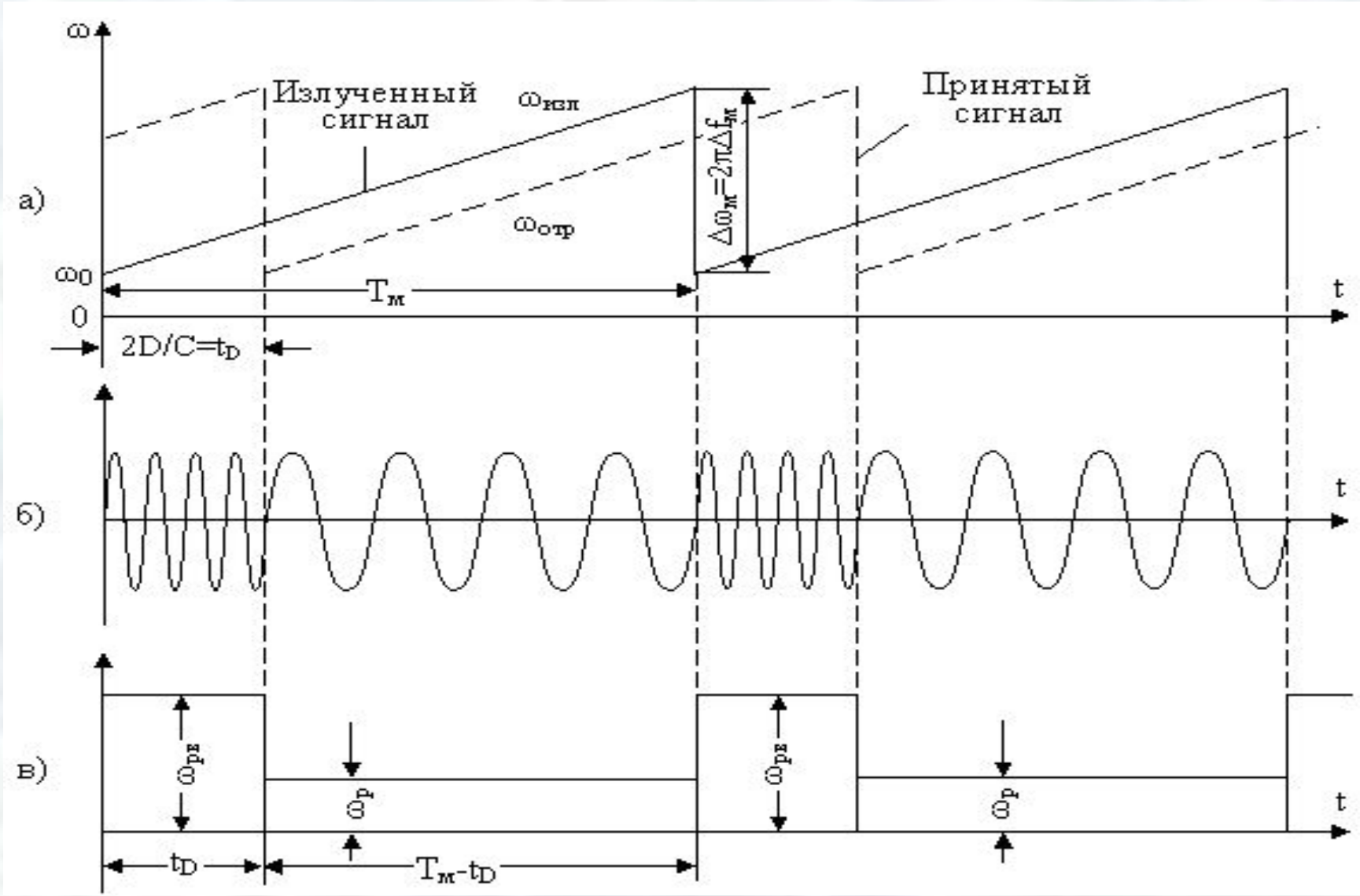
Частотный метод измерения дальности

- Используется постоянство скорости распространения электромагнитных волн.
- Используется частотная модуляции излучаемых непрерывных колебаний.
- Время запаздывания определяется путём измерения разности частот излучаемых колебаний и отражённого сигнала.

Функциональная схема частотного дальномера



Эпюры напряжений частотного дальномера



Фазовый метод измерения дальности

- Используется постоянство скорости распространения электромагнитных волн.
- Излучаются непрерывные синусоидальные колебания.
- Время запаздывания определяется путём измерения разности фаз сигналов.

Функциональная схема простейшего фазового дальномера

Принцип действия простейшего фазового дальномера

Генератор создаёт незатухающие колебания частоты ω_0, излучаемые в пространство. Фаза $\psi_{изл}$ излучённых колебаний:

$$\psi_{изл}=\omega_0 t+\psi_1,$$

где ψ_1 – начальное значение фазы.

Фаза $\psi_{пр}$ принимаемого сигнала:

$$\psi_{пр}=\omega_0(t-t_D)+\psi_{отр}+\psi_{РЛС}+\psi_1,$$

где $\psi_{отр}$ – фазовый сдвиг, связанный с радиоотражениями от цели;

$\psi_{РЛС}$ – фазовый сдвиг в цепях РЛС, $\psi_{РЛС}$=const.

Разность $\Delta\psi$ фаз пропорциональная дальности D до цели:

$$\Delta\psi = \psi_{изл} - \psi_{пр} = \omega_0 t_D - \psi_{отр} - \psi_{РЛС} <=>$$

$$<=> \Delta\psi = 4\pi D / \lambda - \psi_{отр} - \psi_{РЛС}.$$

Недостатки простейшего фазового дальномера

- мал диапазон $D_{\text{одн}}$ однозначного измерения дальности;
- неизвестна величина $\psi_{\text{отр}}$.

Неоднозначность измерений – фазовые сдвиги $\Delta\psi$ фиксируются только в пределах от 0 до 2π:

$$\Delta\psi \le 2\pi \Rightarrow$$

=> диапазон $D_{\text{одн}}$ однозначного измерения дальности не превышает половины длины волны:

$$D_{\text{одн}} \le \lambda/2.$$

Недостатки простейшего фазового дальномера устраняются при использовании более сложных схем усовершенствованных фазовых дальномеров, в которых применяется не менее двух частот.

Функциональная схема усовершенствованного фазового дальномера

Принцип действия усовершенствованного фазового дальномера

Модулятор создаёт синусоидальное напряжение $U_М(t)$:

$$U_М(t)=U_m\cos(\Omega t+\psi_0),$$

модулирующее по амплитуде колебания генератора высокой частоты:

$$U_Г(t)=U_0[1+m\cos(\Omega t+\psi_0)]\cos(\omega_0 t+\psi_1),$$

где m – коэффициент модуляции.

Фаза ψ огибающей принятых колебаний при $\psi_{отр}\to 0$ (т.к. $\Omega<<\omega$) зависит только от дальности до цели (ψ_0, $\psi_{РЛС}$ – известны):

$$\psi_{пр}=\Omega(t-t_D)+\psi_0+\psi_{РЛС}=\Omega(t-2D/c)+\psi_0+\psi_{РЛС}.$$

Разность $\Delta\psi$ фаз низкочастотных колебаний определяет D:

$$\Delta\psi=\psi_{изл}-\psi_{пр}=[\Omega(t)+\psi_0+\psi_{РЛС}]-\psi_{пр},$$

$$\Delta\psi=2\Omega D/c \Leftrightarrow D=\Delta\psi\, c/2\,\Omega.$$

Функциональная схема двухчастотного фазового дальномера

Принцип действия двухчастотного фазового дальномера

Напряжения на выходах 1-го и 2-го генераторов:

$$u_1(t) = U_1 \cos(\omega_1 t + \psi_{01}) \qquad u_2(t) = U_2 \cos(\omega_2 t + \psi_{02})$$

На выходе первого смесителя колебания первой разностной частоты:

$$u_{p1}(t) = U_{p1} \cos\left[(\omega_1 - \omega_2)t + \psi_{01} - \psi_{02}\right]$$

Без учёта фазовых сдвигов в цепях РЛС оба принятых сигнала на двух частотах:

$$u_{пр1} = U_{пр1} \cos\left[\omega_1 (t - t_D) + \psi_{01} + \psi_{отр1}\right]$$

$$u_{пр2} = U_{пр2} \cos\left[\omega_2 (t - t_D) + \psi_{02} + \psi_{отр2}\right]$$

Напряжение второй разностной частоты на выходе второго смесителя:

$$u_{p2}(t) = U_{p2} cos\left[(\omega_1 - \omega_2)t - (\omega_1 - \omega_2)t_D + (\psi_{01} - \psi_{02}) + (\psi_{отр1} - \psi_{отр2})\right]$$

При условии, что излучаемые частоты мало отличаются, т.е.

$$\left|\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}\right| \ll 1$$

то фазовые сдвиги при отражении от цели на обеих частотах можно считать одинаковыми:

$$\psi_{отр1} \approx \psi_{отр2.}$$

Измерение фазового сдвига $\Delta\psi$ связано с дальностью до цели:

$$D = \frac{c}{2(\omega_1 - \omega_2)}\Delta\psi$$

Малой разностью $(\omega_1 - \omega_2)$ обеспечивается большая однозначно измеряемая дальность R_{min}, а также исключается влияние на результат измерений фазового сдвига $\psi_{отр}$.

Особенности фазового метода

Достоинства фазовых дальномеров:

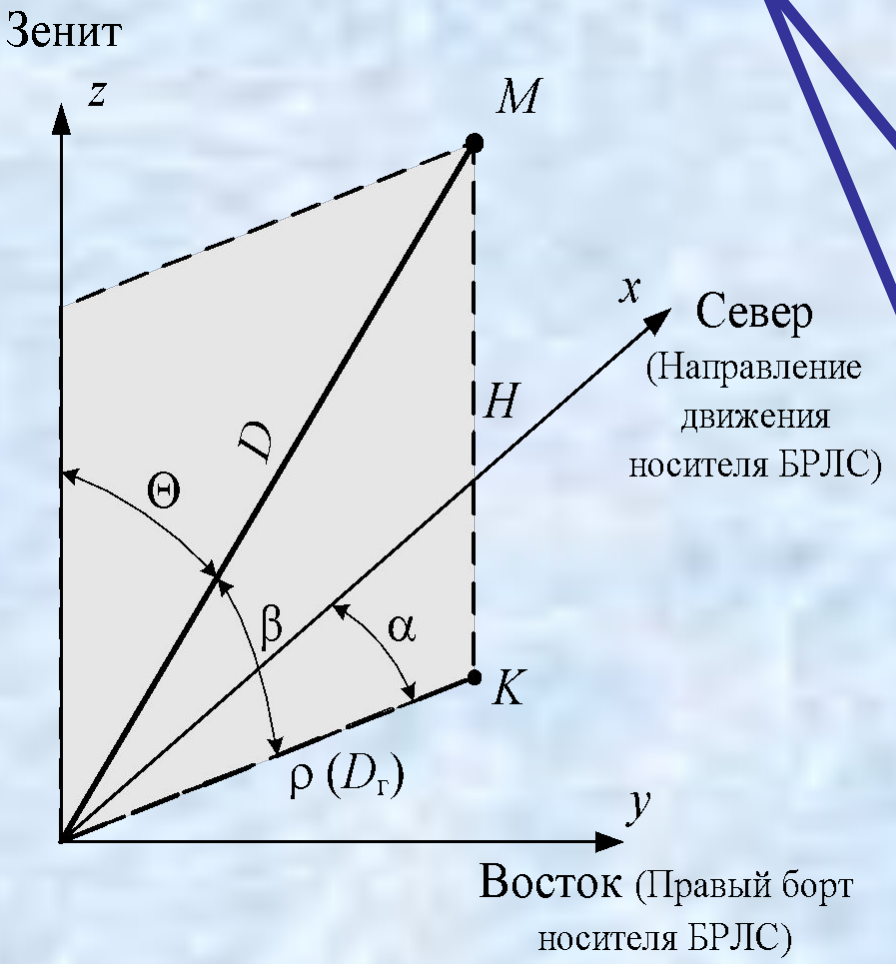
- малая пиковая мощность излучения, так как генерируются незатухающие колебания;
- точность измерения дальности практически не зависит от доплеровского сдвига частоты отражённого сигнала (в отличие от частотного метода);
- возможность измерения малых дальностей ($D_{min} \rightarrow 0$);
- простота измерительного устройства.

Недостатки фазовых дальномеров:

- отсутствует разрешение по дальности, так как при наличии одновременно двух целей их сигналы раздельно наблюдать нельзя;
- необходимы две антенны или сложная система развязки излучаемых и принимаемых колебаний;
- чувствительность приёмника ухудшается вследствие просачивания излучения передатчика.

Измерение угловых координат

Координаты объекта (цели)



Положение цели и РЛС:

O – расположение РЛС;

M – объект наблюдения (цель);

K – проекция M на плоскость xOy.

Погонные [м, мили]:

D – наклонная дальность;

$D_г$, ρ – горизонтальная дальность;

H – высота H (аппликата).

Угловые [рад, град., грады, тыс., румбы]:

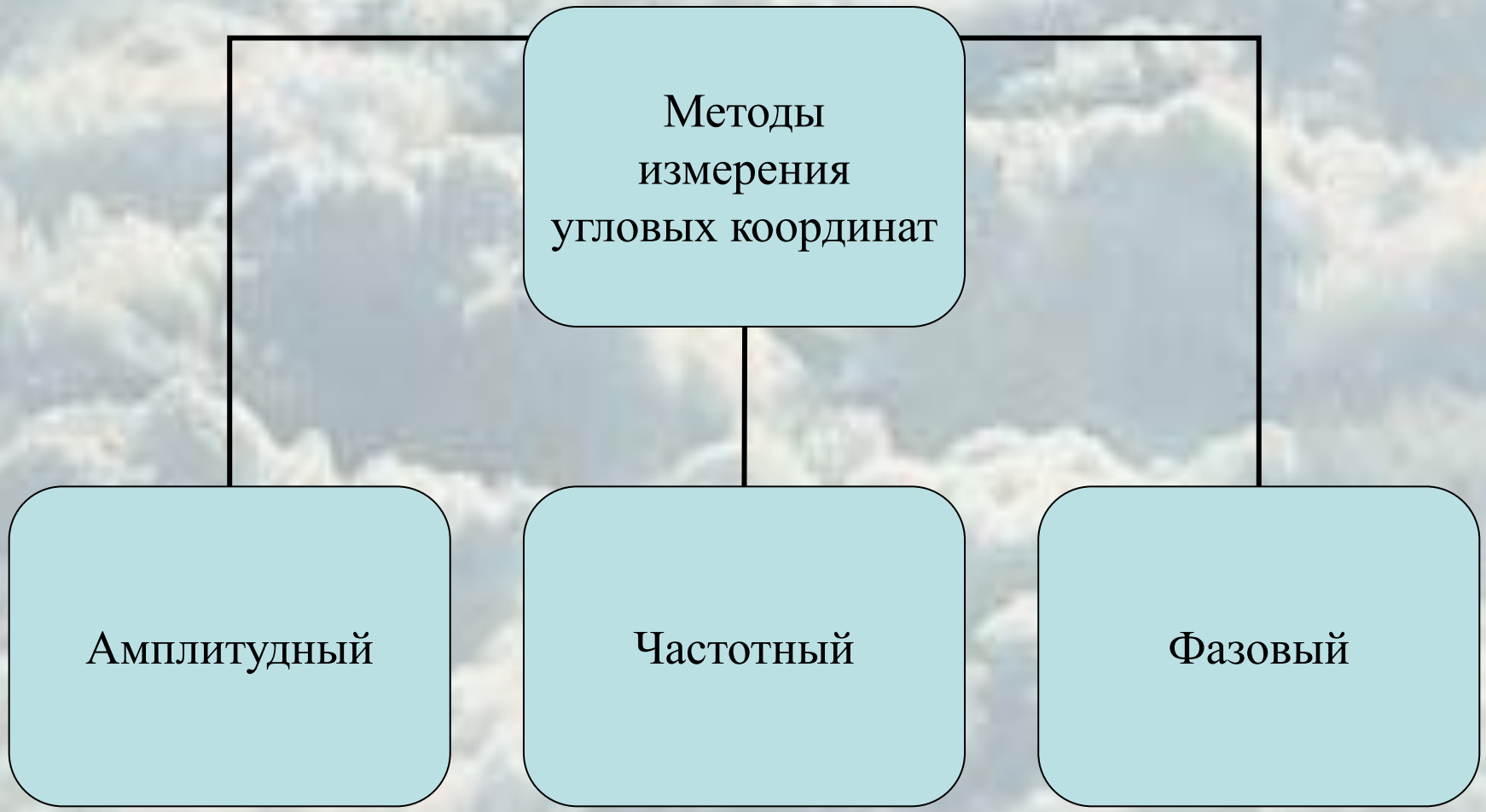
[OM[– линия (луч) визирования;

$\phi_{аз}$, α – азимут (долгота);

$\phi_{ум}$, β – угол места (угол);

Θ – полярное расстояние.

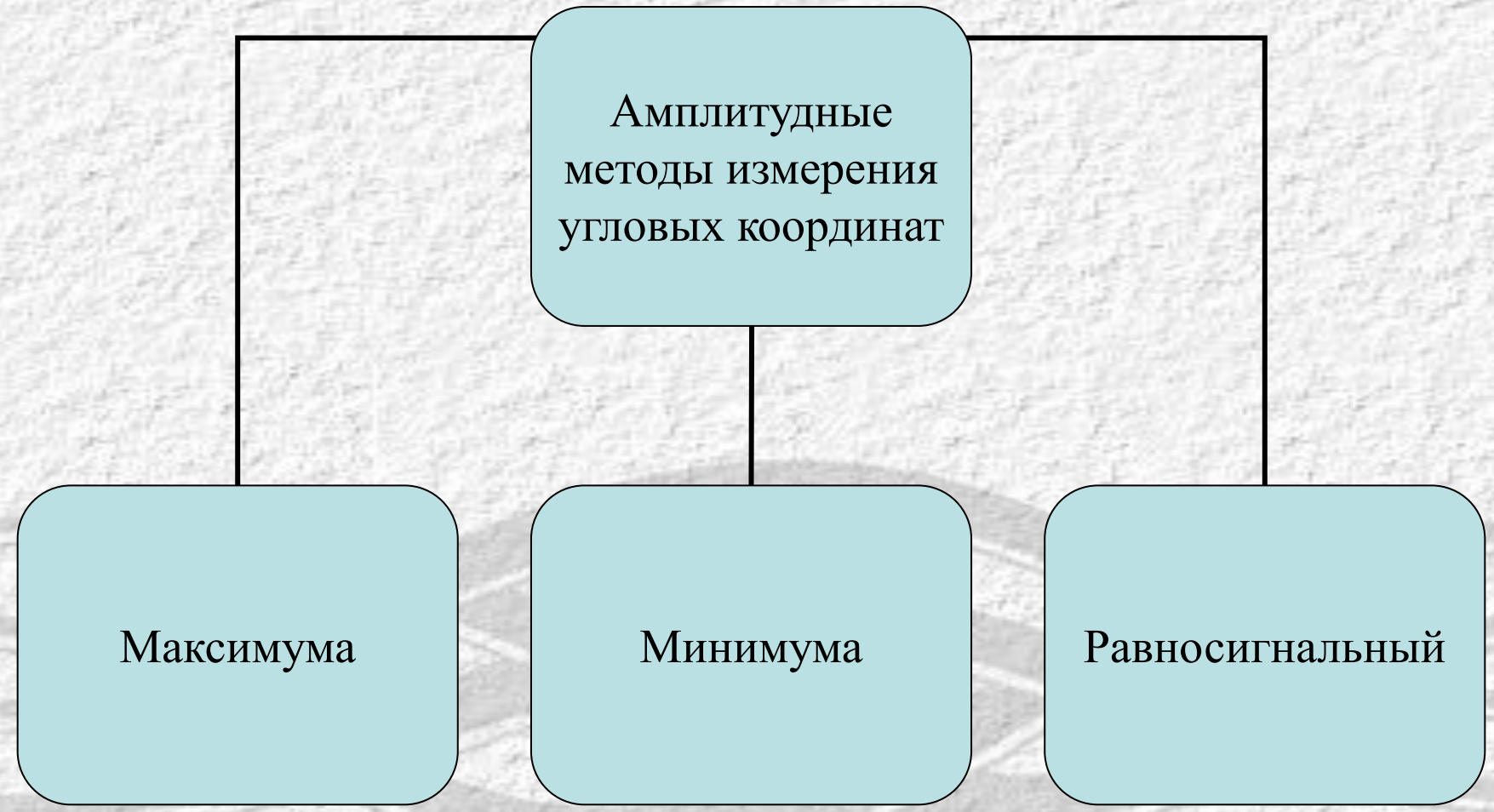
Классификация методов измерения угловых координат



Принципы измерения угловых координат

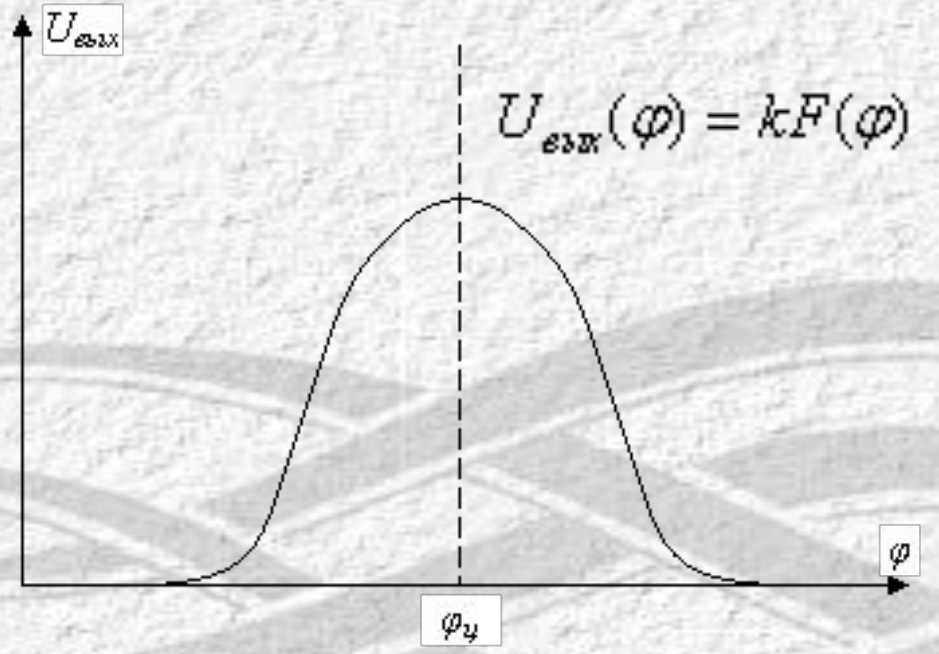
- Используется зависимость выходного напряжения $U_{вых}$ приёмника от направления φ прихода радиоволны $U_{вых}(\varphi)$.
- Зависимость $U_{вых}(\varphi)$ называется пеленгационной характеристикой.
- Время запаздывания не играет ключевой роли для измерения угловых координат.

Классификация амплитудных методов измерения угловых координат



Пеленгация (измерение угловой координаты) по методу максимума

Угловое положение антенны плавно изменяется, в течение некоторого времени принимаются сигналы от цели; отсчёт угловой координаты φ цели производится в тот момент, когда амплитуда $U_{вых}$ сигнала на выходе приёмника достигает наибольшего значения (максимума).



Пеленгационная характеристика

Пеленгационная характеристика повторяет конфигурацию диаграммы $F(\varphi)$ направленности антенны в рассматриваемой плоскости.

Амплитуда сигналов зависит от углового положения φ антенны по отношению к угловому положению $\varphi_ц$ цели.

Функциональная схема угломерного устройства

Точность измерения угловых координат методом максимума

Точность измерения угла характеризуется ***пеленгационной чувствительностью*** $S_п$, представляющей собой крутизну пеленгационной характеристики $U_{вых}(\varphi)$ вблизи направления на цель:

$$S_п = \left| \frac{dU_{вых}(\varphi)}{d\varphi} \right|_{\varphi \approx \varphi_ц}.$$

Измерительное устройство позволяет зафиксировать минимальное изменение выходного напряжения ΔU_{min}. Угловая ошибка $\Delta\phi$:

$$\Delta U_{min} = \Delta\varphi \left| \frac{dU_{вых}(\varphi)}{d\varphi} \right| \Rightarrow \Delta\varphi = \Delta U_{min} / S_п \Big|_{\varphi \approx \varphi_ц}.$$

При пеленгации по методу максимума для диаграмм направленности любого типа пеленгационная чувствительность очень мала и при точной настройке:

$$S_п = \left| \frac{dU_{вых}(\varphi)}{d\varphi} \right|_{\varphi = \varphi_ц} \to 0.$$

Особенности угломерного амплитудного метода максимума

Достоинства угломерного метода:

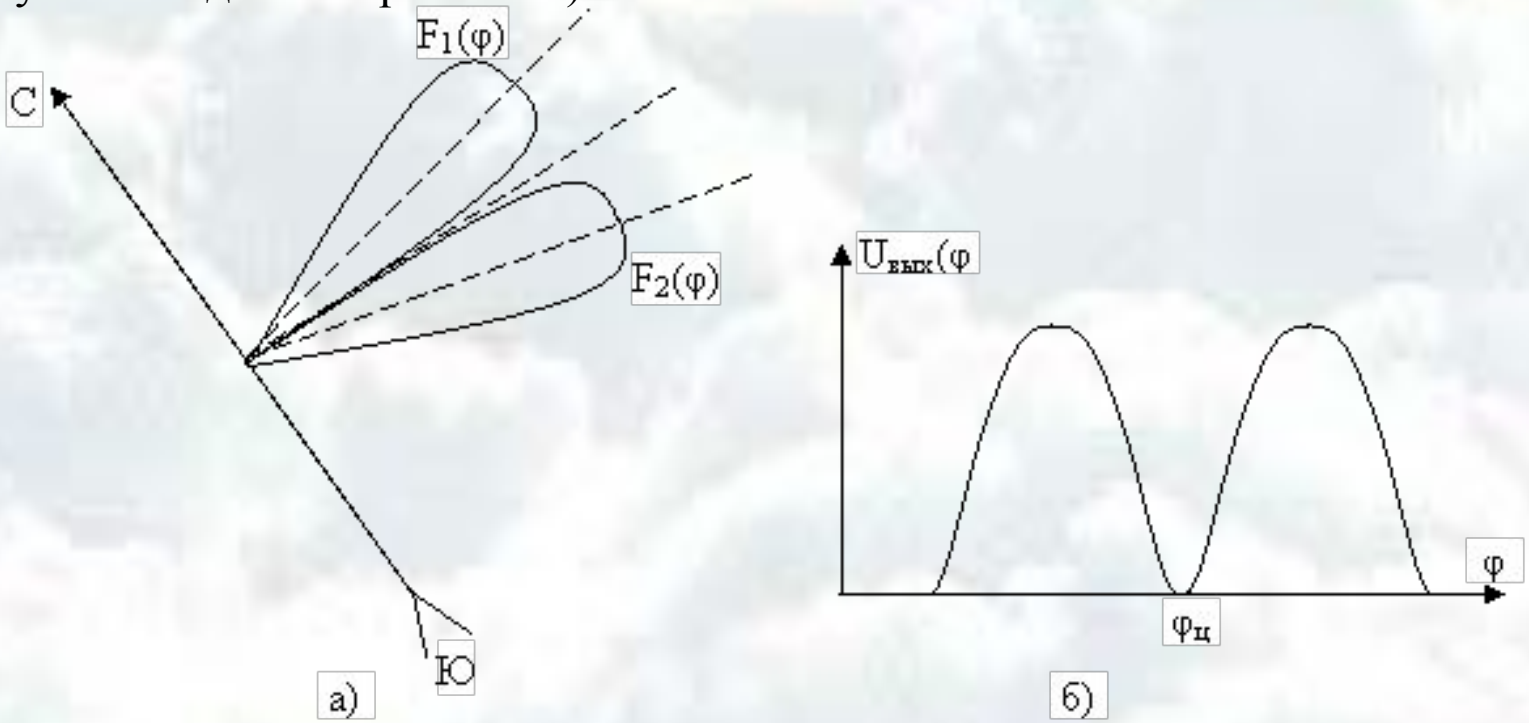
- получение наибольшей (при прочих равных условиях) амплитуды принимаемого сигнала в момент точного пеленга (максимум ДНА направлен на цель);
- отсутствие необходимости формирования нескольких лучей или быстрого сканирования;
- простота технической реализации.

Недостатки угломерного метода:

- низкая точность измерений угловой координаты;
- для обеспечения точности необходимо формировать узкий луч => громоздкость антенн или малая длина волны;
- периодический уход оси ДНА с направления на цель при работе с одной антенной (возможен срыв сопровождения цели).

Пеленгация (измерение угловой координаты) по методу минимума

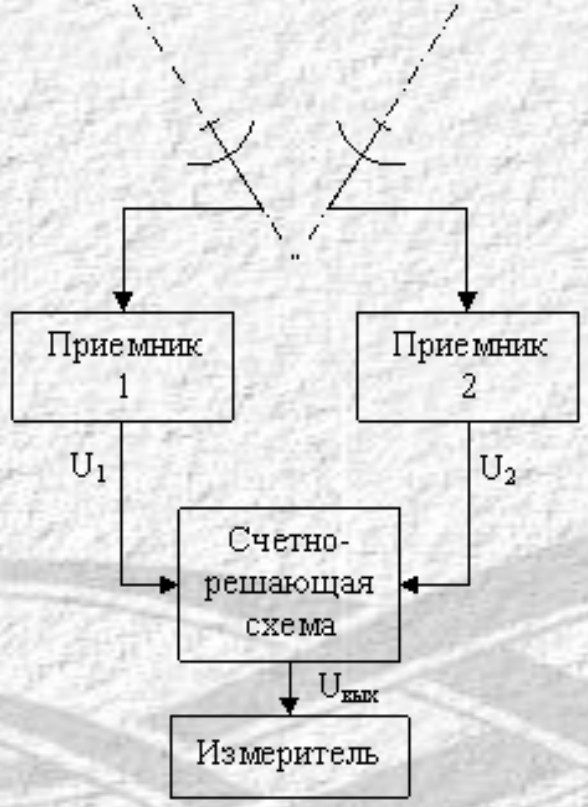
В отличие от метода максимума отсчёт угловой координаты φ производится в момент уменьшения до минимума выходного напряжения $U_{вых}$ приёмника. Диаграмма направленности антенны пеленгатора имеет в средней части провал до нуля (используются две антенны с ДНА $F_1(\varphi)$, $F_2(\varphi)$ или два смещенных облучателя одного отражателя).

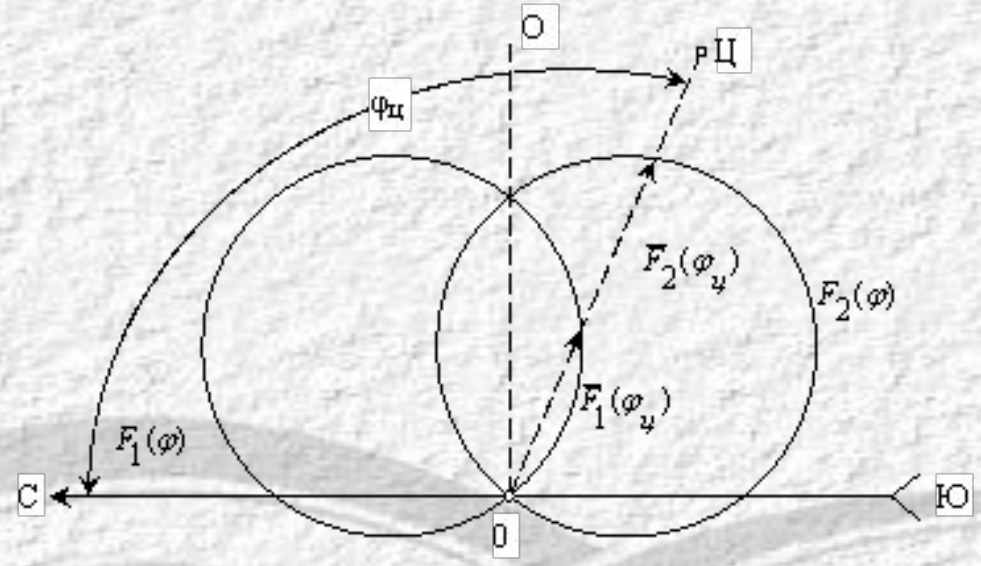


Диаграммы направленности (а) и пеленгационная характеристика (б)

Пеленгация (измерение угловой координаты) методом сравнения

Пеленг цели определяется по соотношению амплитуд сигналов, принятых одновременно двумя антеннами.



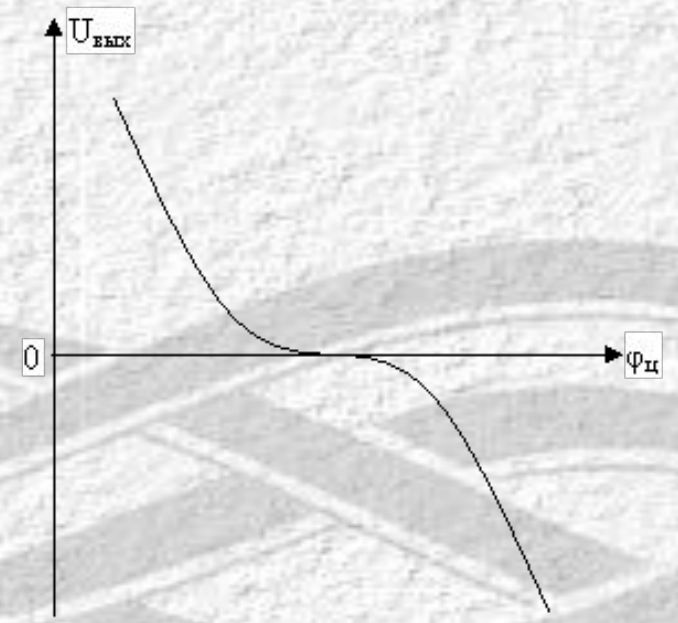


Структурная схема пеленгатора и диаграммы направленности, реализующего метод сравнения

Пеленгация (измерение угловой координаты) методом сравнения

Выходное напряжение зависит от абсолютных значений амплитуд сигналов и, следовательно, будет изменяться в зависимости от расстояния между РЛС и целью, отражающих свойств цели, поглощения в среде и т.д. Исключить влияние изменения амплитуд сигналов на результат измерений можно либо с помощью системы АРУ, управляющей усилением обоих приёмников, либо осуществляя деление одного сигнала на другой:

$$U_{вых}(\varphi) = \frac{k_1 F_1(\varphi_ц)}{k_2 F_2(\varphi_ц)}$$



Пеленгационная характеристика

Пеленгация (измерение угловой координаты) методом сравнения

Основное достоинство метода сравнения – возможность мгновенного определения направления на цель в пределах относительно широкого сектора при неподвижной антенной системе. Наиболее существенным недостатком является относительно низкая точность измерения, существенно меняющаяся в зависимости от вида и взаимного расположения диаграмм направленности антенн, а также от направления прихода волны.

Частным случаем метода сравнения является *равносигнальный метод* пеленгации. Он также основан на сравнении амплитуд сигналов, принимаемых двумя антеннами, но для отсчёта углового положения добиваются равенства сигналов. При пеленгации цели по равносигнальному методу антенное устройство поворачивают до тех пор, пока выходное напряжение не станет равным нулю. В этот момент угловая координата цели определяется по положению антенны.

Пеленгация равносигнальным методом

Равносигнальный метод характеризуется высокой точностью, так как при измерении используется небольшой участок диаграмм направленности (вблизи равносигнального направления ОО) с относительно большой крутизной.

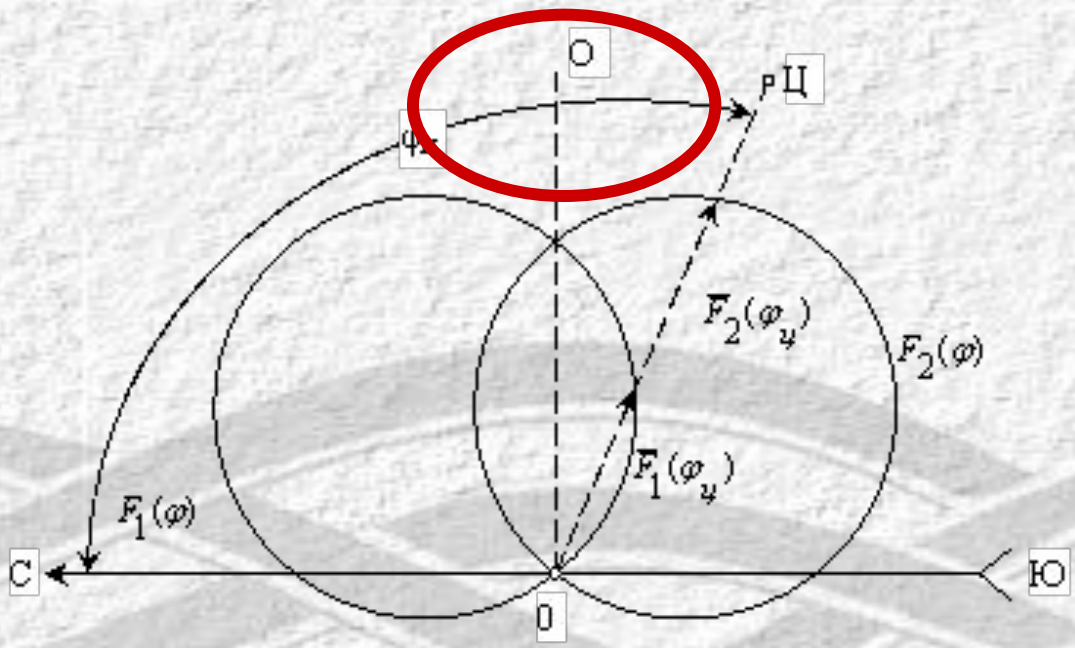


Диаграмма направленности и её рабочий участок

Пеленгация равносигнальным методом

Метод используют для автоматического слежения за целью по угловым координатам. Выходное напряжение $U_{вых}$ подводят к системе управления механизмом поворота антенны. В зависимости от знака рассогласования между равносигнальным направлением и направлением на цель механизм будет поворачивать антенну в ту или иную сторону, чтобы свести напряжение $U_{вых}$ к нулю; при этом равносигнальное направление антенны всё время будет оставаться направленным на цель.

Равносигнальный метод можно реализовать при использовании одной антенны, диаграмма направленности которой периодически изменяет своё положение в пространстве. В этом случае сравнению подлежат сигналы, принятые в различные моменты времени при разных положениях диаграммы направленности.

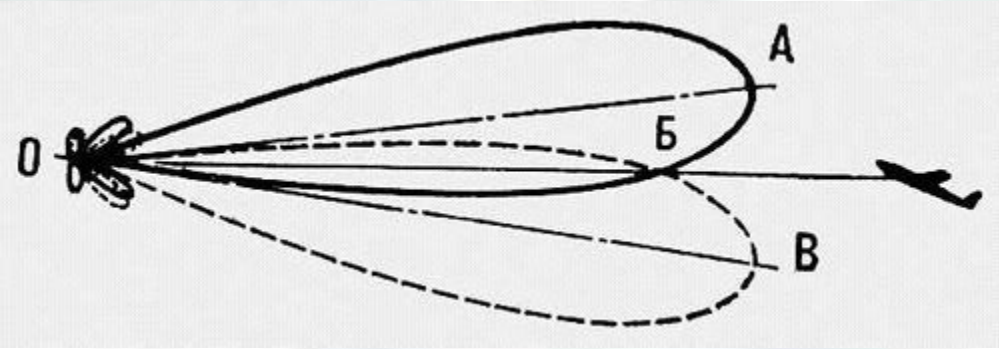


Схема пеленгации по методу сравнения: ОБ — равносигнальное направление; ОА и 0В — 2 положения максимума диаграммы направленности.

Фазовый метод измерения угловых координат

Основан на измерении разности фаз электромагнитных колебаний, принимаемых различными антеннами. В точках 1 и 2 расположены две приёмные антенны, расстояние между которыми (база) равно *d*.

Принятые антеннами сигналы подводятся к фазовому детектору. Выходное напряжение фазового детектора будет определяться только разностью фаз колебаний (можно считать амплитуды обоих колебаний на входе детектора одинаковыми):

$$U_{вых} = k \cos \Delta\psi$$

Фазовый метод измерения угловых координат

Если направление прихода радиоволны составляет угол φ с перпендикуляром к базе, то фазовый сдвиг высокочастотных колебаний в антеннах: $\Delta\psi = \frac{2\pi d}{\lambda}\sin\varphi$

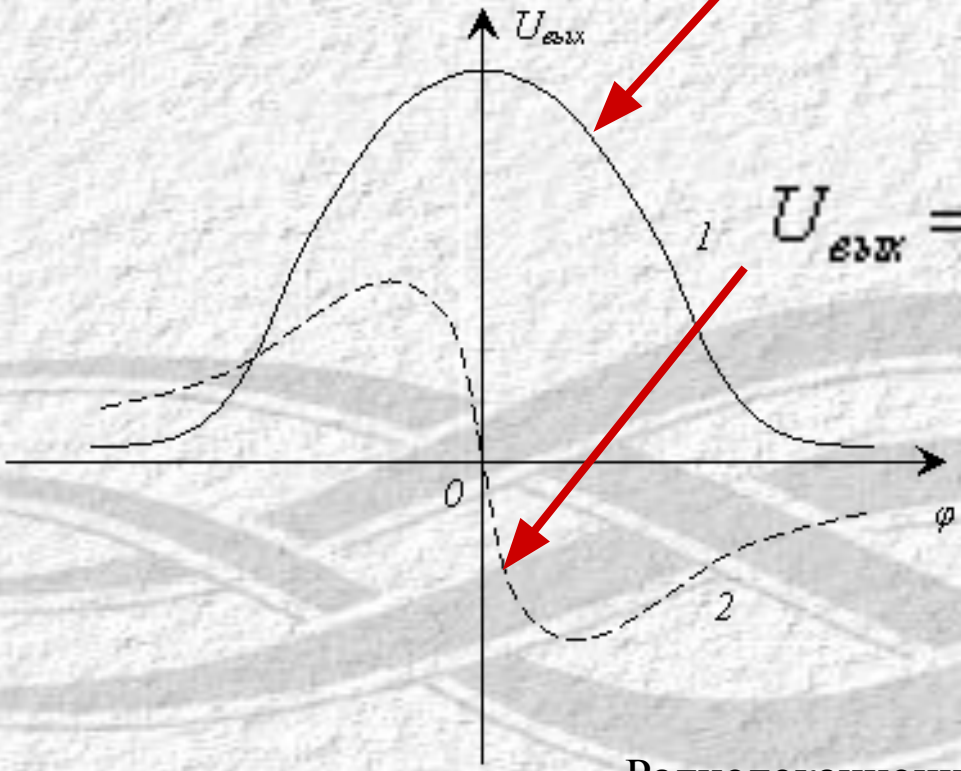
Пеленгационная характеристика

При малых значениях φ

$$\sin\varphi \approx \varphi \qquad \Delta\psi = \frac{2\pi d}{\lambda}\varphi$$

$$U_{вых}(\varphi) = k\cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\varphi\right)$$

$$U_{вых} = k\sin\Delta\psi = k\sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\varphi\right)$$



Особенности угломерного фазового метода

Достоинства угломерного метода:

- высокая точность измерения угла;
- удобство использования для автоматического слежения за целями по угловым координатам.

Недостатки угломерного метода:

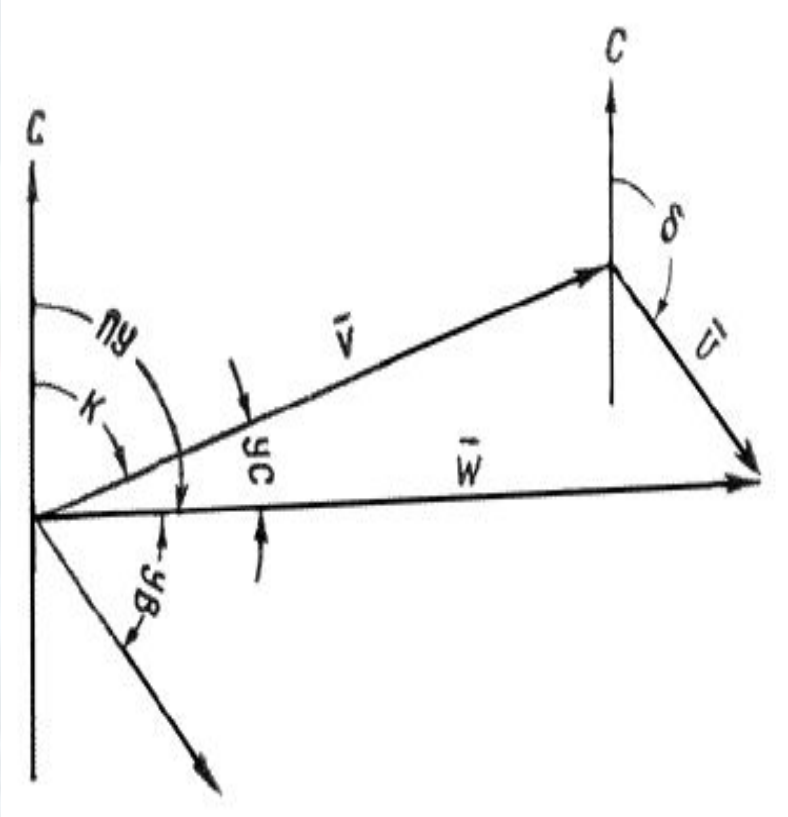
- отсутствие разрешения целей;
- многоантенность;
- неоднозначность угла:

$$\Delta\varphi_{одн} = \frac{\lambda}{d}$$

- для борьбы с неоднозначностью необходимы узкие диаграммы направленности.

Измерение радиальной скорости

Навигационный треугольник скоростей



Направление вектора путевой скорости определяется путевым углом, а его величина — путевой скоростью.

Воздушная скорость (V) — скорость движения самолета относительно воздуха.

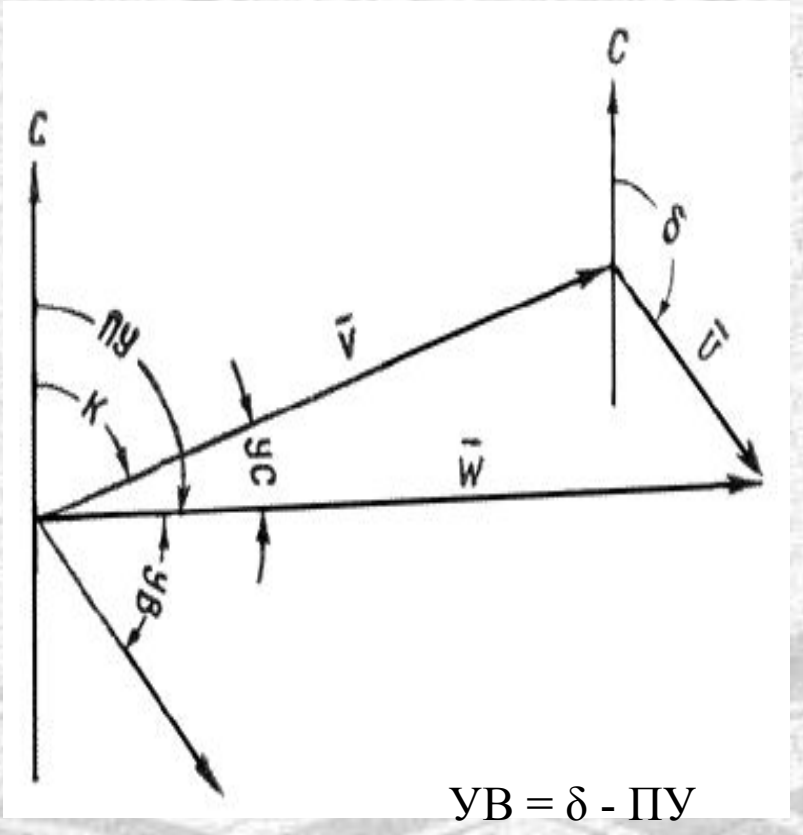
Курс (К) — угол между северным направлением меридиана и направлением продольной оси самолета (линией курса). Курс самолета может быть истинным (ИК), магнитным (МК) и компасным (КК) в зависимости от меридиана, относительно которого производится отсчет.

Путевая скорость (W) — скорость движения самолета относительно земной поверхности.

Путевой угол (ПУ) — угол, составленный северным направлением меридиана и линией пути самолета. Путевой угол может быть магнитным (МПУ), истинным (ИПУ) и компасным (КПУ). Кроме того, путевой угол может быть заданным или фактическим.

Измерение радиальной скорости

Навигационный треугольник скоростей



Скорость ветра (U) — скорость перемещения воздушных масс относительно земной поверхности.

Направление ветра (δ) — угол между северным направлением меридиана и горизонтальным направлением перемещения воздушных масс относительно земной поверхности.

Угол сноса (УС) — угол между векторами: воздушной скорости и путевой скорости.

Правый снос (+), когда самолет сносит относительно линии курса вправо, левый (-), когда самолет сносит относительно линии курса влево.

Угол ветра (УВ) — угол между линией пути самолета и направлением ветра.

$$УВ = \delta - ПУ$$

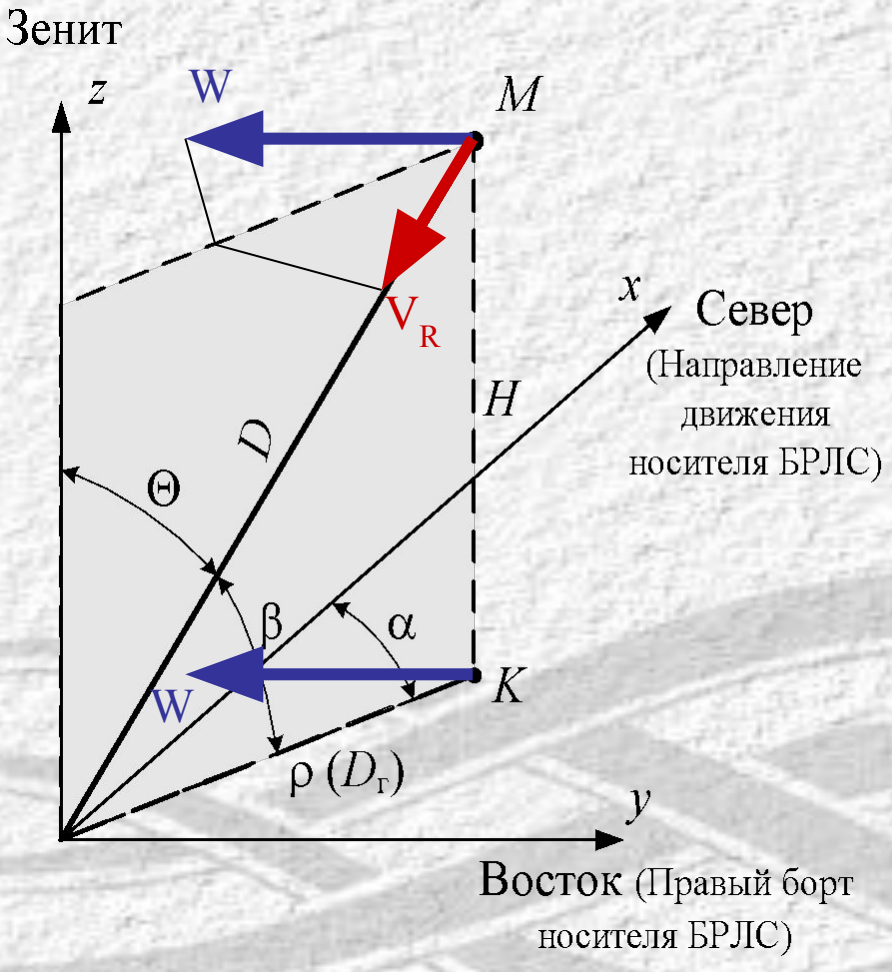
$$\sin УС = (U * \sin УВ) / V$$

$$К = ПУ - УС$$

$$W = V \cos УС + U \cos УВ$$

Измерение радиальной скорости

Скорости объекта (цели): путевая W и радиальная V_R



O – расположение РЛС;

M – объект наблюдения (цель);

K – проекция *M* на плоскость *xOy*.

D – наклонная дальность;

$D_г$, ρ – горизонтальная дальность;

H – высота *H* (аппликата).

[*OM*[– линия (луч) визирования;

$\phi_{аз}$, α – азимут (долгота);

$\phi_{ум}$, β – угол места (угол);

Θ – полярное расстояние.

Дальность действия радиолокационных станций

Дальность действия в свободном пространстве

Дальностью действия радиолокационной станции называется наибольшее расстояние между станцией и целью, на котором обнаружение цели производится с заданными вероятностями правильного обнаружения $W_{по}$ и ложной тревоги $W_{лт}$.

Дальность действия D_{max} обусловлена энергией сигнала от цели и заданными вероятностными характеристиками её обнаружения.

Пусть передающее устройство РЛС вырабатывает энергию излучения $E_{изл}$, максимальное значение коэффициента усиления передающей антенны по мощности равно $G_{0прд}$ и цель находится на расстоянии D от радиолокационной станции, то плотность потока энергии у цели:

$$\rho_ц = \frac{E_{изл}}{4\pi D^2} G_{опер}\,,\ 4\pi D^2$$ – поверхность сферы радиусом D.

$$E_{изл} = P_{изл}\tau_c$$

$P_{изл}$ – мощность излучения;
τ_c – время непрерывного облучения цели (при импульсной работе - длительность одного импульса).

Количество энергии, переизлучаемое целью, определяется средним значением эффективной отражающей площади цели $S_{эфф0}$

$$E_ц = \rho_ц S_{эфф0} = \frac{E_{изл} G_{0 пр д} S_{эфф0}}{4\pi D^2}$$

Плотность потока энергии у приёмной антенны:

$$\rho_ц = \frac{E_ц}{4\pi D^2} = \frac{E_{изл} G_{0 пр д} S_{эфф0}}{16\pi^2 D^4}$$

Энергия радиолокационного сигнала, поступающего из антенны в согласованный с ней приёмник:

$$E_c = \rho_{прм} S_{апрм} = \frac{E_{изл} G_{0 пр д} S_{эфф0} S_{апрм}}{16\pi^2 D^4} \quad (1)$$

$S_{а\ прм}$ – эффективная площадь приёмной антенны.

На максимальной дальности D_{max} обнаружения энергия E_c принимаемого сигнала равна пороговому значению, т.е. минимально необходимому для обнаружения с заданными вероятностями $W_{по}$ и $W_{лт}$.

$$E_c = E_{прмин} = k_p N_0 = k_p k_ш kT^0 \quad (2)$$

N_0 – спектральная плотность мощности шума, k_p – коэффициент различимости приемника, $k_ш$ – коэффициент шума приемника.

$$k_p = \frac{E_{прмин}}{N_0} = f(W_{по}; W_{лт}) \qquad N_0 = \frac{P_ш}{\Delta f} = k_ш kT^0$$

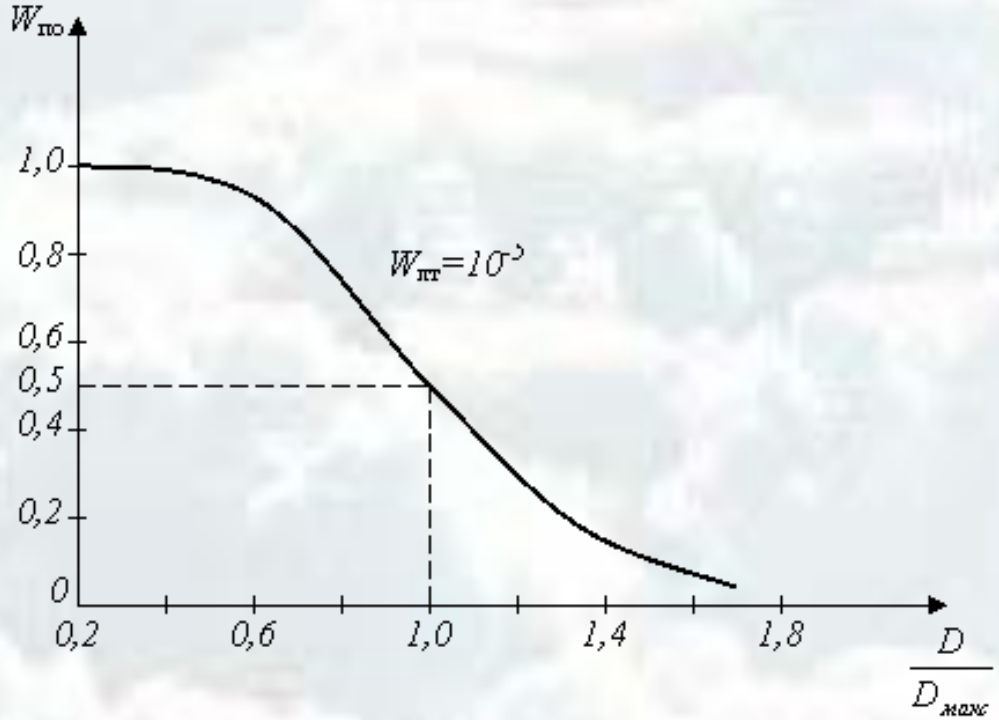
k – постоянная Больцмана, равная $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Вт·с/град;
T^0 – абсолютная температура, при которой определяется величина $k_ш$ (обычно 290^0 К).

Основное уравнение радиолокации:

(1)=(2) => $D=D_{max}$ =>

$$D_{макс} = \sqrt[4]{\frac{E_{изл} G_{0прд} S_{апрм} S_{эфф0}}{16\pi^2 k_p k_ш kT^0}}$$

Зависимость относительного изменения дальности обнаружения от значения вероятности правильного обнаружения



Пропорция зависимости:

$$D_{макс} = \sqrt[4]{\frac{E_{изл}}{E_{приним}}}$$

Если в РЛС для излучения и приёма используется одна и та же антенна:

$$D_{макс} = \sqrt[4]{\frac{E_{изл} S_a^2 S_{эфф0}}{4\pi k_р k_ш k T^\circ \lambda^2}} = \sqrt[4]{\frac{E_{изл} G_0^2 S_{эфф0} \lambda^2}{64\pi^3 k_р k_ш k T^\circ}}$$

Учет влияния помех на дальность обнаружения

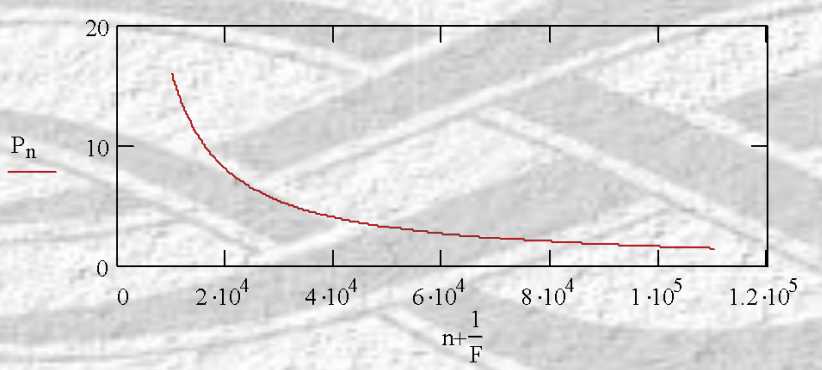
Известно соотношение для расчета отраженной мощности *P* на входе приемника РЛС:

$$P = \frac{P_p G^2 l_w^2 10^{-13} S}{(4\pi)^3 R^4} \qquad (1)$$

$F := 10^{-4}$ $n := 0 .. 10^5$

$\varepsilon := \frac{F}{4}$

$P_n := \frac{F \cdot (1 - F)}{\varepsilon^2 \cdot \left(\frac{1}{F} + n\right)}$



Учёт влияния помех на дальность действия РЛС

Известно соотношение для расчета отраженной мощности P на входе приемника РЛС [1]:

$$P = \frac{P_p G^2 l_w^2 10^{-13} S}{(4\pi)^3 R^4}, \qquad (1)$$

где P_p - мощность передатчика РЛС в кВт; G - коэффициент направленного действия антенны (предполагается наличие одной антенны для приема и передачи); l_w - длина волны в см; S - эффективная площадь рассеяния в м^2; R - дальность до рассеивающего объекта в км.

Выражение (1) приведем к виду:

$$P = \boldsymbol{P} S, \text{ где } \boldsymbol{P} = \frac{P_p G^2 l_w^2 10^{-13}}{(4\pi)^3 R^4}. \qquad (2)$$

Используя обозначение (2) компактно запишем выражения, характеризующие мощности сигнала P_t и помехи P_c на входе приемника РЛС:

$$P_t = \boldsymbol{P} S_t, \quad P_c = \boldsymbol{P} S_c,$$

где S_t, S_c- эффективные площади рассеяния цели и помехи (соответственно) в м^2.

Для обнаружения сигнала необходимо выполнение неравенства [1]

$$\frac{P_t}{(P_c + P_n)k_r} > q_s k_p, \qquad (3)$$

где P_n- мощность некоррелированного шума на входе приемника; k_r - коэффициент потерь приема; k_p - коэффициент потерь обработки; q_s - пороговое отношение сигнал/(помеха+шум).

В предположении линейного характера обработки сигнала параметр q_s имеет вид:

$$q_s = \left[\frac{\ln F}{\ln D} - 1\right] / \mu,$$

где F - вероятность ложной тревоги; D - вероятность правильного обнаружения; μ - коэффициент улучшения сигнал/(помеха + шум).

Тогда выражение (3) сводится к следующему неравенству:

$$\frac{P_t}{(P_c + P_n)} > \left[\frac{\ln F}{\ln D} - 1\right] k_r k_p / \mu. \qquad (4)$$

Обозначим пороговое отношение с учетом потерь через Q:

$$Q = \left[\frac{\ln F}{\ln D} - 1\right] k_r k_p,$$

затем преобразуем неравенство (4) к виду:

$$\frac{P_t}{(P_c + P_n)} > Q / \mu. \qquad (5)$$

Учёт влияния помех на дальность действия РЛС

Известно соотношение для расчета отраженной мощности P на входе приемника РЛС [1]:

$$P = \frac{P_p G^2 l_w^2 10^{-13} S}{(4\pi)^3 R^4}, \qquad (1)$$

где P_p - мощность передатчика РЛС в кВт; G - коэффициент направленного действия антенны (предполагается наличие одной антенны для приема и передачи); l_w - длина волны в см; S - эффективная площадь рассеяния в м^2; R - дальность до рассеивающего объекта в км.

Выражение (1) приведем к виду:

$$P = \boldsymbol{P} S, \text{ где } \boldsymbol{P} = \frac{P_p G^2 l_w^2 10^{-13}}{(4\pi)^3 R^4}. \qquad (2)$$

Используя обозначение (2) компактно запишем выражения, характеризующие мощности сигнала P_t и помехи P_c на входе приемника РЛС:

$$P_t = \boldsymbol{P} S_t, \quad P_c = \boldsymbol{P} S_c,$$

где S_t, S_c- эффективные площади рассеяния цели и помехи (соответственно) в м^2.

Для обнаружения сигнала необходимо выполнение неравенства [1]

$$\frac{P_t}{(P_c + P_n) k_r} > q_s k_p, \qquad (3)$$

где P_n- мощность некоррелированного шума на входе приемника; k_r - коэффициент потерь приема; k_p - коэффициент потерь обработки; q_s - пороговое отношение сигнал/(помеха+шум).

В предположении линейного характера флюктуаций сигнала параметр q_s имеет вид:

$$\left[\ln F \right]$$

Учёт влияния помех на дальность действия РЛС

Известно соотношение для расчета отраженной мощности P на входе приемника РЛС [1]:

$$P = \frac{P_p G^2 l_w^{\,2} 10^{-13} S}{(4\pi)^3 R^4}, \qquad (1)$$

где P_p - мощность передатчика РЛС в кВт; G - коэффициент направленного действия антенны (предполагается наличие одной антенны для приема и передачи); l_w - длина волны в см; S - эффективная площадь рассеяния в м^2; R - дальность до рассеивающего объекта в км.

Выражение (1) приведем к виду:

$$P = \mathbf{P}S, \text{ где } \mathbf{P} = \frac{P_p G^2 l_w^{\,2} 10^{-13}}{(4\pi)^3 R^4}. \qquad (2)$$

Используя обозначение (2) компактно запишем выражения, характеризующие мощности сигнала P_t и помехи P_c на входе приемника РЛС:

$$P_t = \mathbf{P} S_t, \quad P_c = \mathbf{P} S_c,$$

где S_t, S_c - эффективные площади рассеяния цели и помехи (соответственно) в м^2.

Для обнаружения сигнала необходимо выполнение неравенства [1]

$$\frac{P_t}{(P_c + P_n)k_r} > q_s k_p, \qquad (3)$$

где P_n - мощность некоррелированного шума на входе приемника; k_r - коэффициент потерь приема; k_p - коэффициент потерь обработки; q_s - пороговое отношение сигнал/(помеха+шум).

В предположении линейного характера обработки сигнала параметр q_s имеет вид:

Введем коэффициенты передачи сигнала k_t и помехи k_c по мощности. Тогда отношение P_c сигнал/(помеха + шум) по мощности на выходе можно представить в виде:

$$P_o = \frac{k_t P_t / P_n}{k_c P_c / P_n + 1}. \qquad (6)$$

Коэффициент улучшения μ представляет собой отношение P_o ко входной мощности сигнал/(помеха + шум), следовательно:

$$\mu = P_o / \frac{P_t}{(P_c + P_n)}. \qquad (7)$$

Для оптимальной, с точки зрения максимума коэффициента улучшения μ системы, осуществляющей когерентное накопление сигнала и подавление коррелированных помех до уровня шумов, коэффициенты k_t, k_c могут быть представлены следующими тождествами:

$$k_t = N; \qquad k_c = P_n / P_c,$$

где N - число импульсов в пачке. После подстановки (6) в (7) и (7) в (5) получим:

$$\frac{1}{Q} = \frac{k_c P_c / P_n + 1}{k_t P_t / P_n}.$$

С учетом равенства (2) произведем замену в последнем неравенстве для выражения входных мощностей P_t, P_c через эффективные площади рассеяния цели и помехи, а также энергетические параметры РЛС:

$$\frac{S_t k_t - S_c k_c Q}{QP} > 1/P.$$

Проведя необходимые преобразования, получим: