

Использование эффекта Доплера в радиолокации

- Эффект Доплера (в радиолокации) – частота принимаемого РЛС отраженного сигнала зависит от радиальной скорости объекта.



- Формула для доплеровского смещения частоты

$$\Delta f_{\text{д}} = -f_0 \frac{2V \cos \alpha}{c}$$

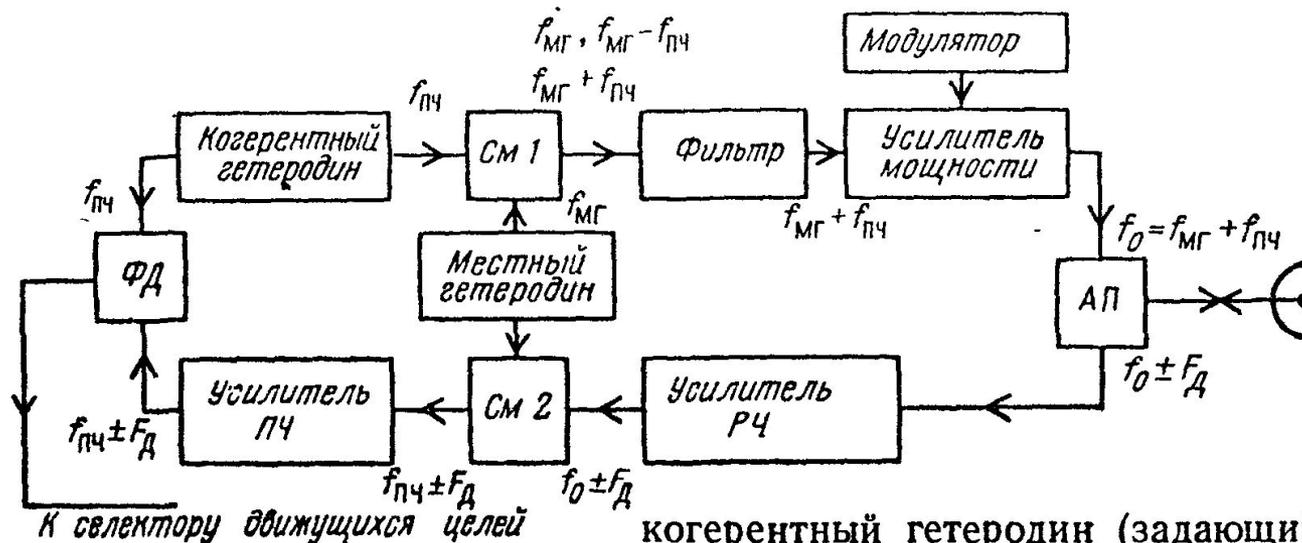
- Оценка величины доплеровского смещения частоты

$$\Delta f_{\text{д}} \approx f_0 \frac{2 \cdot 250 [\text{м/с}]}{3 \cdot 10^8 [\text{м/с}]} = 1,7 \cdot 10^{-6} f_0 \rightarrow \begin{array}{l} \text{проблемы при регистрации;} \\ \text{искажение спектра сигнала} \end{array}$$

Как используется эффект Доплера?

- Для измерения радиальной скорости цели (скорость можно измерить и косвенно: определив две дальности до цели в два момента времени или используя когерентно-импульсную РЛС с фазовым детектором на ПЧ - далее);
- Для выделения и подавления помех, отраженных неподвижными целями («селекция движущихся целей» – СДЦ);
- Для создания комплексных навигационных систем – доплеровский измеритель скорости и угла сноса (ДИСС).

Когерентно-импульсная РЛС с фазовым детектором на ПЧ



Эффект Доплера относительно слабый. Удобнее его выделить на $f_{ПЧ}$, а не на f_0 .

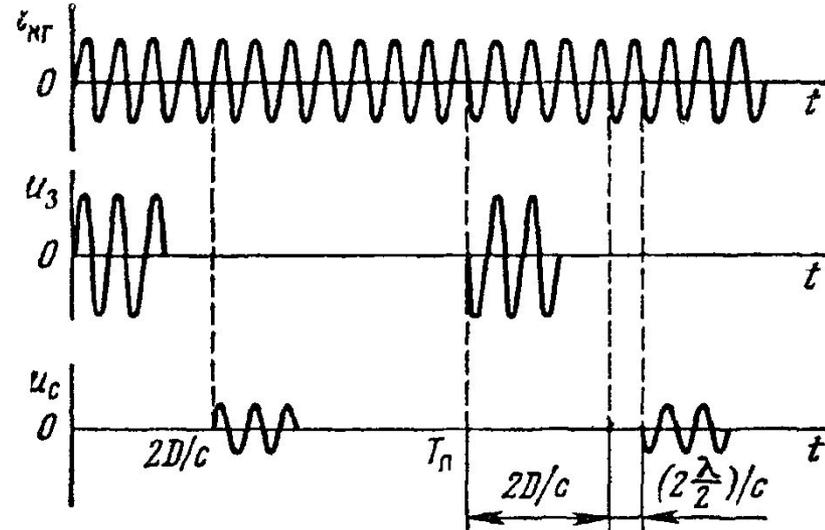
когерентный гетеродин (задающий генератор) работает на ПЧ $f_{ПЧ}$. Его колебания в первом смесителе смешиваются с колебаниями стабильного местного гетеродина, частота которого $f_{МГ}$ отличается от несущей частоты зондирующего сигнала на $f_{ПЧ}$. В результате смешения образуются комбинационные частоты. После фильтрации из них выделяются колебания, например $f_{МГ} + f_{ПЧ}$, которые воздействуют на усилитель мощности (мощный усилительный клистрон). Последний, кроме того, с помощью модулятора вырабатывает зондирующие радиоимпульсы. Отраженные импульсы, имеющие частоту $f_{МГ} + f_{ПЧ} \pm F_d$, усиливаются и попадают на второй смеситель, который с помощью местного гетеродина выделяет колебания $f_{ПЧ} \pm F_d$. Таким образом, на фазовый детектор подаются опорное напряжение когерентного гетеродина, имеющего частоту $f_{ПЧ}$, и отраженные импульсы с частотой $f_{ПЧ} \pm F_d$.

«Слепые» скорости

Эффект наблюдается в когерентно-импульсной РЛС (отсутствует в случае непрерывных колебаний).

На рисунке показаны зондирующие импульсы u_3 , сформированные из напряжения когерентного гетеродина, и отраженные импульсы u_c для случая, когда цель прошла расстояние $\lambda/2$ за время равное периоду повторения T_{Π} . Как видно фазовый сдвиг между напряжением когерентного гетеродина и обоими импульсами не изменяется. На выходе фазового детектора получим одинаковые видеоимпульсы, пульсация отсутствует, следовательно цель неподвижна.

$$\text{Слепые скорости: } v_{\text{сл}} = \frac{n\lambda/2}{T_{\Pi}} = n \frac{\lambda}{2} F_{\Pi} = \frac{cnF_{\Pi}}{2f_0}$$



Слепыми скоростям соответствуют доплеровские частоты $f_{\text{д сл}} = nF_{\Pi}$

Доплеровский измеритель скорости и угла сноса (ДИСС)

(это РНС!)

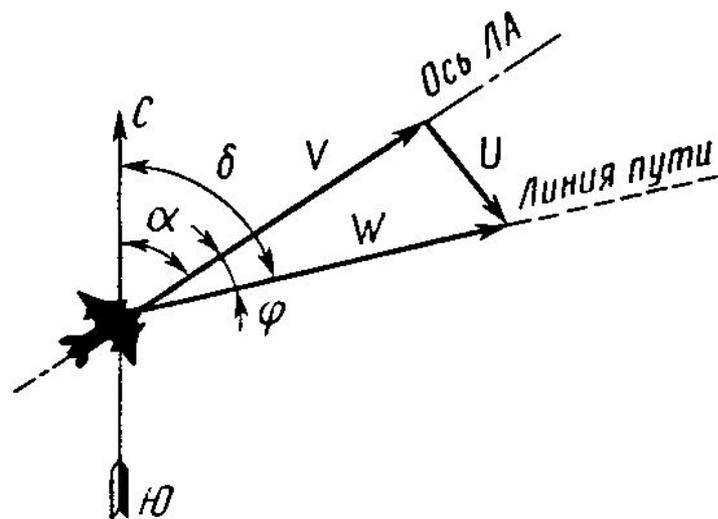
Рассмотрим горизонтальный полет:

W – путевая скорость;

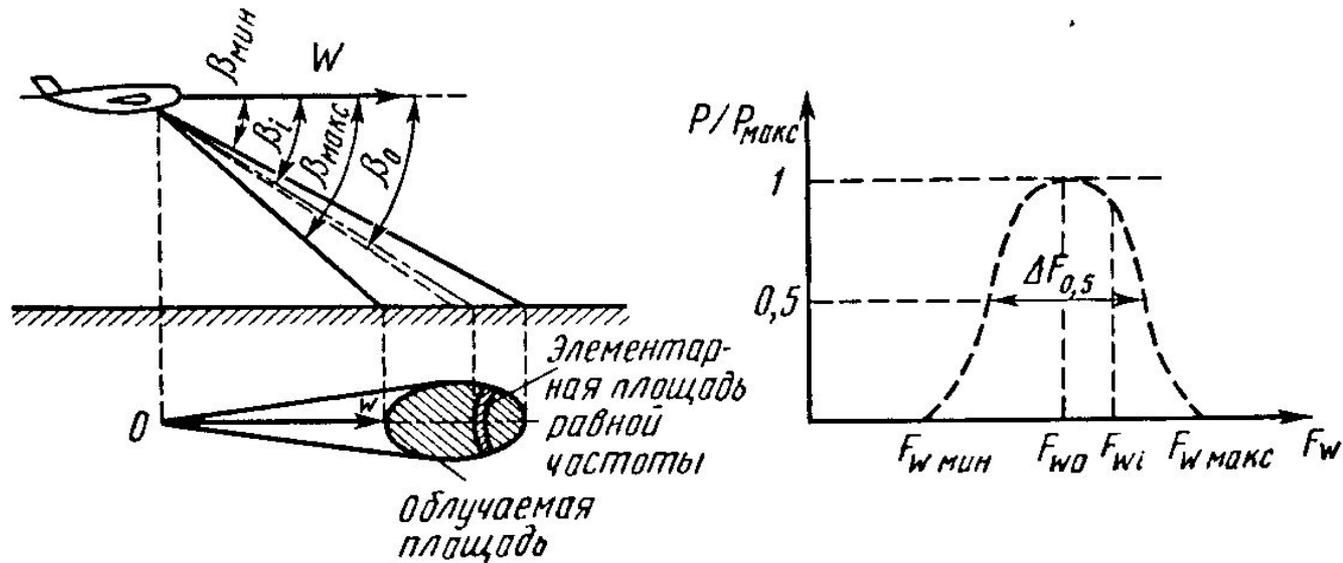
V – воздушная скорость;

U – скорость ветра;

φ – угол сноса



При горизонтальном полете ЛА для обеспечения достаточно большой проекции вектора скорости W на направление облучения и сохранения значительного отражения в направлении ДИСС применяют наклонное облучение земной поверхности



Для определения спектра частот отраженного сигнала вырежем из облучаемой площади элементарную полосу, все точки которой расположены на направлениях, составляющих угол β_i с вектором скорости W . Имея в виду, что каждой из N элементарных полосок соответствует доплеровский сдвиг частоты $F_{wi} = \frac{2W}{\lambda_{\text{н}}} \cos \beta_i$, для всей облучаемой площади спектр отраженного сигнала можно представить последовательностью частот

$$f_{\text{н}} + \frac{2W}{\lambda_{\text{н}}} \cos \beta_i.$$

Если отражающие свойства поверхности в пределах облучаемой площади одинаковы, то форма огибающей спектра определяется формой ДНА измерителя в вертикальной плоскости. Максимальную мощность в этом случае имеет сигнал на средней частоте спектра, соответствующей направлению β_0 (оси ДНА).

Ширина спектра сигнала по уровню половинной мощности:

$$\Delta F_{0,5} = \frac{2W}{\lambda_{\text{н}}} \left[\cos\left(\beta_0 - \frac{\beta_A}{2}\right) - \cos\left(\beta_0 + \frac{\beta_A}{2}\right) \right] = \frac{4W}{\lambda_{\text{н}}} \sin \beta_0 \sin \frac{\beta_A}{2},$$

где β_A — ширина ДНА в вертикальной плоскости.

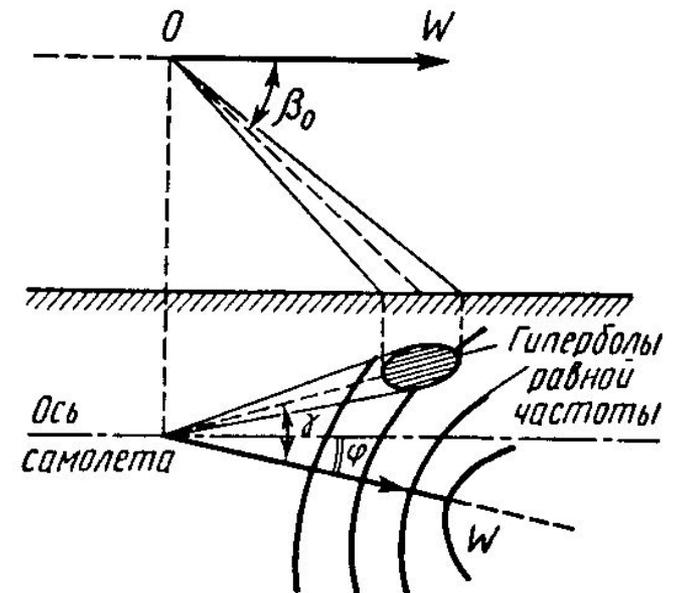
При достаточно узких ДНА, которые используют в ДИСС, можно принять $\sin \beta_A/2 \approx \beta_A/2$. При этом

$$\Delta F_{0,5} = \frac{2W}{\lambda_{\text{н}}} \beta_A \sin \beta_0.$$

Для измерения путевой скорости ЛА необходимо найти среднюю частоту доплеровского спектра F_{w0} . Если вектор W горизонтален и составляет с осью ДНА угол γ в горизонтальной и β_0 в вертикальной плоскости, то

$$F_{w0} = \frac{2W}{\lambda_{\text{н}}} \cos \beta_0 \cos \gamma.$$

При совмещении направления облучения в горизонтальной плоскости с вектором W угол $\gamma=0$ и приращение частоты достигает максимума:



$$F_{w\text{м}} = \frac{2W}{\lambda_{\text{н}}} \cos \beta_0$$

При известных λ_n и β_0 путевую скорость W можно определить непосредственным измерением F_{Wm} с помощью частотомера.

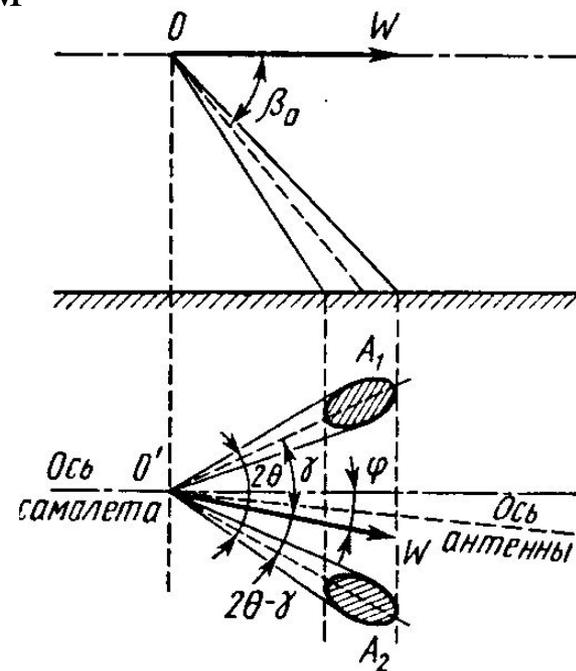
$$F_{Wm} = \frac{2W}{\lambda_n} \cos \beta_0$$

Угол сноса φ равен углу, составленному осью самолета и осью ДНА в момент ее совмещения с направлением вектора путевой скорости, т.е. при $F_w = F_{wm}$.

Однолучевая система не находит практического применения из-за низкой точности измерения.

Используются 3-4-х лучевые системы.

При измерении путевой скорости и угла сноса антенная система поворачивается до совмещения спектров сигналов на выходе каналов приемника, соответствующих двум лучам антенны. При этом ось симметрии лучей совмещена с вектором W , а угол между этой осью и осью самолета равен углу сноса φ . Из рисунка видно, что точность двухлучевой системы выше, чем однолучевой, так как при повороте антенны лучи пересекают линии равных частот под углом, близким к прямому, а это обеспечивает большую чувствительность системы.



Используются двусторонние системы с лучами, направленными вперед и назад.

ДИСС-7

- ДИСС-7 является доплеровским измерителем путевой скорости и угла сноса с непрерывным излучением сигнала, с несимметричной четырехлучевой антенной системой, устанавливаемый на самолетах третьего поколения.
- ДИСС-7 предназначен для непрерывного автоматического вычисления составляющих вектора полной путевой скорости, в самолетной системе координат XYZ.

Тактико-технические данные

- вид излучения: непрерывный;
- частота излучения $F_0 = 13325$ МГц;
- мощность передатчика не менее **2 Вт**;
- диапазон измеряемых доплеровских частот $1,5 \div 32$ кГц;
- частота коммутации лучей антенны $2,5 \pm 0,25$ Гц;
- время непрерывной работы **12 часов**;
- чувствительность приемника не хуже минус **113 дБ/мВт**;
- ошибка измерения средней путевой скорости не более **0,9%**;
- масса **29 кг**;
- габаритные размеры **666 x 406 x 231 мм**.

ДИСС-7



Антенна



Магнетрон



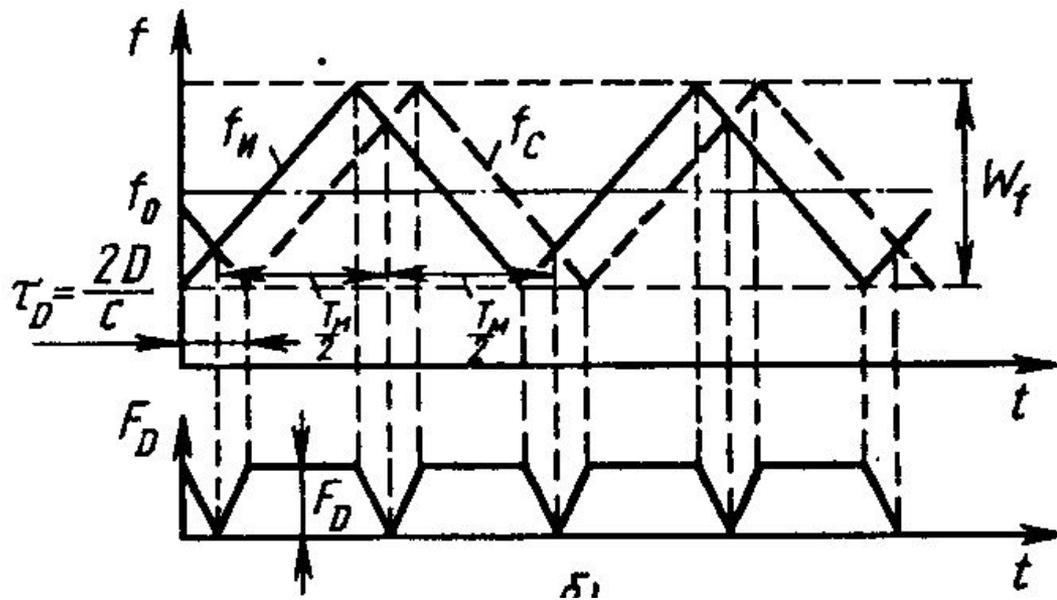
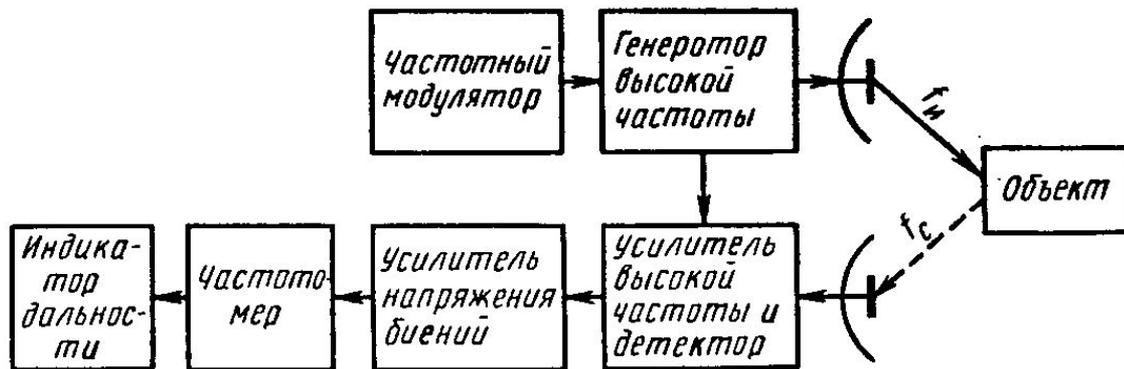
Радиовысотомер

- Использует частотный метод определения дальности.
- Использует непрерывное излучение. (Почему?)
- Возможно одновременное измерение скорости доплеровским методом.

Определение дальности частотным методом сводится к измерению изменения частоты излучаемых колебаний за время распространения сигнала до отражающего объекта и обратно. Если частота излучаемых колебаний f_n изменяется непрерывно по линейному закону со скоростью $\gamma = df_n/dt$, то приращение частоты излучаемых колебаний за время распространения сигнала $\tau_D = 2D/c$ составит $\Delta f_n = \gamma \tau_D$. Измеряя разность частот излучаемых и принимаемых колебаний $\Delta f_n = f_n - f_c = F_D$, определим дальность объекта:

$$D = \frac{c}{2\gamma} \Delta f_n = \frac{c}{2\gamma} F_D.$$

- Непрерывное изменение частоты по линейному закону невозможно. Поэтому приходится использовать периодическую модуляцию. Наиболее распространенный сигнал – симметричный ЛЧМ-сигнал.



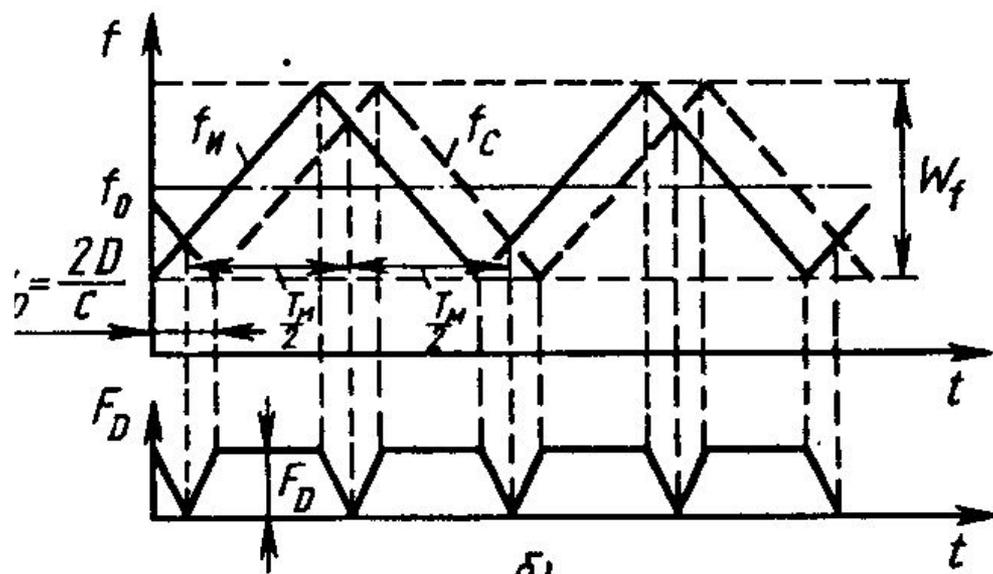
f_0 – средняя частота;
 T_M – период модуляции;
 W_f – девиация частоты;
 F_D – разностная частота биений.

При выполнении условия $F_D \gg F_M = 1/T_M$ можно записать:

$$f_n = f_0 + \gamma t = f_0 + \frac{2W_f}{T_M} t;$$

$$f_c = f_0 + \gamma(t - \tau_D) = f_0 + \frac{2W_f}{T_M} \left(1 - \frac{2D}{c}\right);$$

$$F_D = f_n - f_c = \frac{4W_f}{cT_M} D.$$



Выражение для F_D не учитывает провалы кривой $F_D(t)$ при $f_n = f_c$. Фактически частотомер фиксирует среднюю частоту биений за период модуляции:

$$F_{D\text{ср}} = \frac{4W_f}{cT_M} D \left(\frac{T_M - \tau_D}{T_M} \right).$$

При выполнении условия $\tau_D \ll T_M$ $F_{D\text{ср}} \approx F_D$. Следовательно,

$$D = \frac{cF_{D\text{ср}}}{4W_f F_M} \approx \frac{c}{4W_f} \frac{F_D}{F_M}.$$

Обычно в частотных системах измерения дальности одного объекта в качестве частотомера используют счетчик импульсов, который фиксирует число биений за период модуляции:

$$n_D = F_D T_m = \frac{4W_f}{c} D.$$

Дискретность отсчета ΔD , соответствующая изменению числа биений n_D на единицу, может быть найдена из соотношения

$$n_D \pm 1 = \frac{4W_f}{c} (D \pm \Delta D).$$

Отсюда

$$\Delta D = c/(4W_f) = \lambda_w/4,$$

где $\lambda_w = c/W_f$ — модуляционная длина волны.

Малогабаритный авиационный радиовысотомер А-037



Диапазон частот, ГГц	4,2...4,4
Диапазон измерения высоты, м	0...750
Погрешность измерения высоты в диапазоне углов крена и тангажа $\pm 40^\circ$, м	$\pm 6\%$
Среднее время наработки на отказ, ч	3000
Масса, кг: Приемопередатчик / индикатор / антенна	2,7 / 1,1 / 2*0,2

Радионавигационные системы

Радионавигационный параметр (РНП) – параметр сигнала, несущий информацию о параметре (координате или скорости) объекта.

- В угломерной РНС (в пеленгаторе) РНП – это угол между направлением на объект и опорным направлением (пеленг).
- В РНС измерения скорости РНП – это доплеровское смещение частоты принимаемых колебаний относительно частоты опорных колебаний.
- В дальномерных и разностно-дальномерных системах РНП – это временной, частотный или фазовый сдвиг колебаний принимаемого сигнала относительно опорного, формируемого в системе.

Соответственно применяемому РНП различают импульсные, частотные и фазовые системы.

Линия (поверхность) положения

- Линия (поверхность) положения – геометрическое место точек, отвечающих результатам измерения РНП.
- Ошибку определения линии (поверхности) положения оценивают отрезком нормали l между линиями (поверхностями) положения, соответствующими истинному и измеренному значениям РНП.
- Уравнение РНП p в декартовой системе координат можно записать в виде $p = p(x, y)$ на плоскости и $p = p(x, y, z)$ в пространстве. Эти уравнения соответствуют двумерному и трехмерному скалярным полям параметра p .
- Рассмотрим плоскую задачу. В пределах рабочих зон РНС функция $p(x, y)$ непрерывна и дифференцируема, поэтому изменение скалярного поля РНП можно описать его градиентом $\text{grad } p$, т. е. вектором, показывающим направление наискорейшего роста параметра p .

- Если l – единичный вектор, направленный вдоль нормали к линии положения в сторону роста p , то скалярное произведение $l \text{ grad } p = \partial p / \partial l$.
- Модуль градиента $g = |\text{grad } p| = | \partial p / \partial l |$ позволяет связать ошибку измерения РНП Δp с погрешностью фиксации линий положения Δl :

$$\Delta l = \Delta p / g.$$

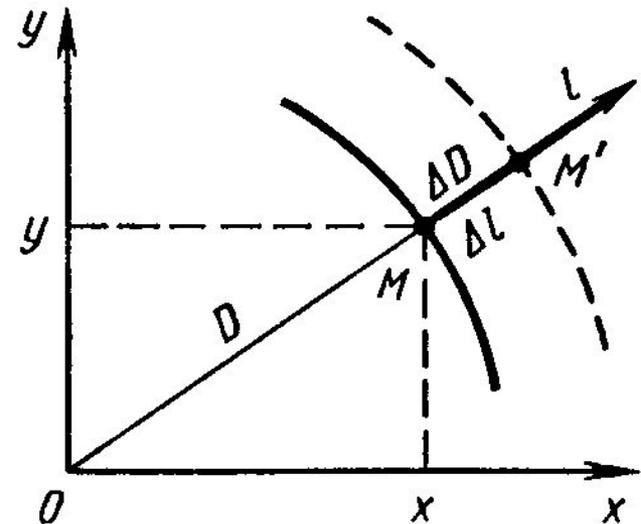
- Следовательно, точность определения линий положения увеличивается с ростом точности измерения значения РНП и с ростом модуля градиента поля РНП.
- Если функция $p(x, y)$ задана аналитически, то:

$$g = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2}.$$

- Воспользовавшись приведенными соотношениями, можно оценить ошибку определения линий положения для дальномерного, угломерного и разностно-дальномерного методов местоопределения.

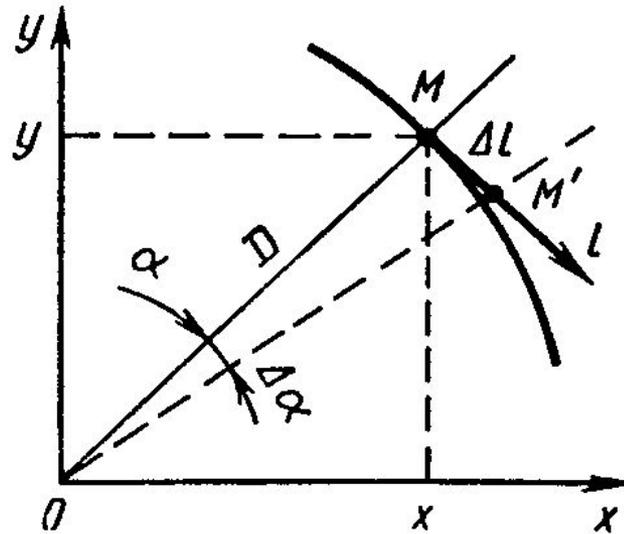
Дальномерная РНС

- В дальномерной РНС измеряется время задержки сигнала τ_D .
- Это время связано с РНП D формулой:
 - $D = c\tau_D$ для беззапросного дальномера;
 - $D = c\tau_D / 2$ для дальномера с запросом, активной РЛС с активным или пассивным ответом и радиовысотомера.
- Линии положения – окружности радиуса D при расположении ответчика в точке O , а объекта с запросчиком – в точке M .
- $D = \sqrt{x^2 + y^2}$,
- $p = \tau_D = 2D/c = (2/c) \sqrt{x^2 + y^2}$,
 $|\text{grad } p| = 2/c$ и $\Delta l = \Delta p c / 2$
- $\sigma_l = \sigma_D = c \sigma_\tau / 2$



Угломерная РНС

- В угломерной РНС измеряемым РНП является угол α .
- Пусть этот угол измерен со случайной ошибкой $\Delta\alpha$, имеющей нормальное распределение $(0, \sigma_\alpha)$, причем $\Delta\alpha \ll 1$.
- Тогда ошибка определения местоположения характеризуется величиной $\sigma_l = D\sigma_\alpha$



Разностно-дальномерная РНС

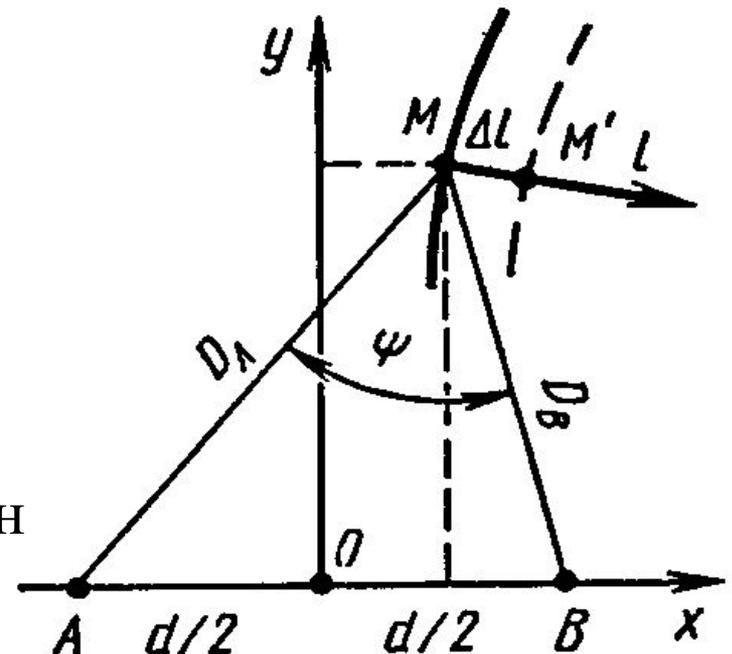
- В разностно-дальномерных РНС измеряемым параметром является разность расстояний $D_A - D_B$ объекта (точка M) от двух передающих станций A и B (ведущей и ведомой) при расстоянии между ними (базе) d .
- Здесь линия положения – гипербола, а ψ — угол, под которым из точки объекта M видна база.

$$\sigma_l = \frac{\sigma_{Dp}}{2 \sin \psi/2}$$

$$\sigma_{Dp} = c\sigma_\tau$$

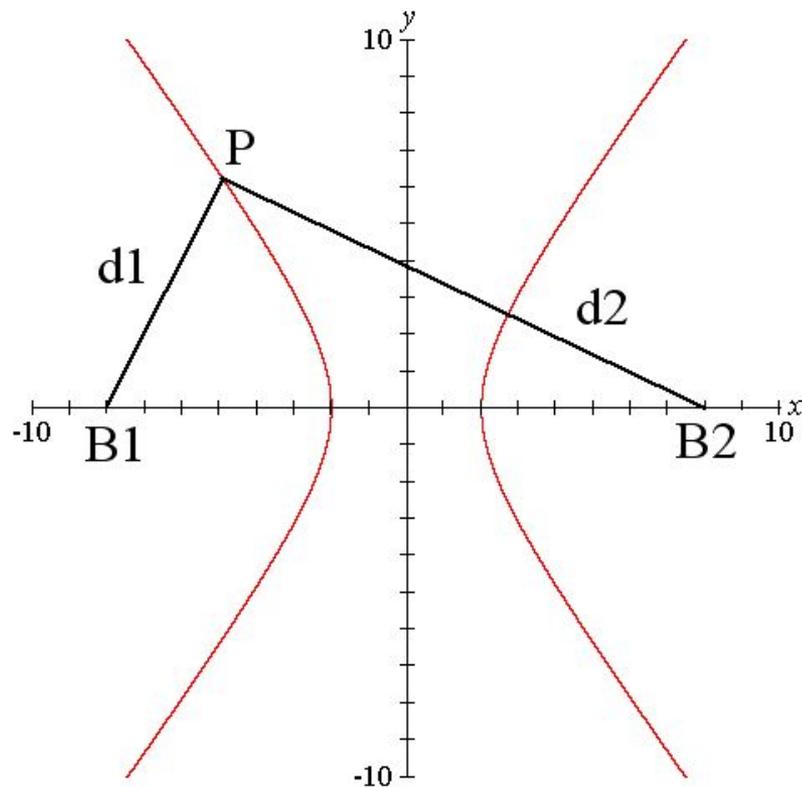
$$\sigma_l = \frac{c\sigma_\tau}{2 \sin \psi/2}$$

В рабочей зоне системы угол ψ должен быть по возможности большим



Справка

- Гипербола – геометрическое место точек P для которых абсолютное значение разности расстояний от P до двух выделенных точек $B1$ и $B2$ (называемых фокусами) постоянно.

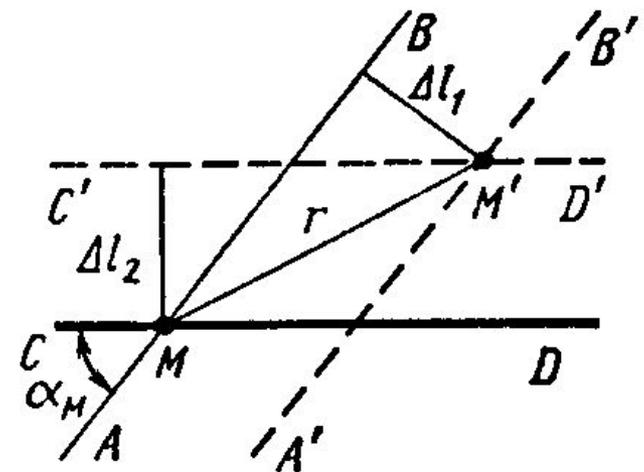


$$|d1 - d2| = 2a$$

Определение координат объекта позиционным методом

- Местоположение объекта при позиционным методое – точка пересечения по крайней мере двух линий положения.
- Ошибка определения линий положения приводит к ошибке нахождения координат объекта.
- Если объект M находится на значительном расстоянии от наземных станций, то погрешности Δl_1 и Δl_2 определения линий положения AB и CD считают малыми по сравнению с расстояниями от объекта до станций, а линии положения AB' и CD' , полученные в результате измерения, – параллельными линиям AB и CD .
- Точка M' , соответствующая оценке положения объекта, оказывается на расстоянии r от точки M , отражающей истинное положение объекта.

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{l1}^2 + \sigma_{l2}^2}}{\sin \alpha_M}$$



Рабочие зоны РНС

- Рабочая зона (область) РНС – часть пространства (поверхности), в пределах которой обеспечивается нахождение координат объекта с ошибкой, не превышающей максимально допустимую σ_m . При этом принимаемый сигнал должен превышать пороговое значение $P_{с\ мин}$, соответствующее максимальной дальности действия системы.
- Таким образом, границы рабочей зоны определяются равенствами $D = D_{\max}$ и $\sigma_r = \sigma_{r\ m}$, где σ_r – среднеквадратическое значение радиальной погрешности.
- Обычно границы рабочей зоны РНС рассчитывают из условия заданной точности местоопределения $\sigma_r \leq \sigma_{r\ m}$.

Рабочие зоны дальномерной РНС

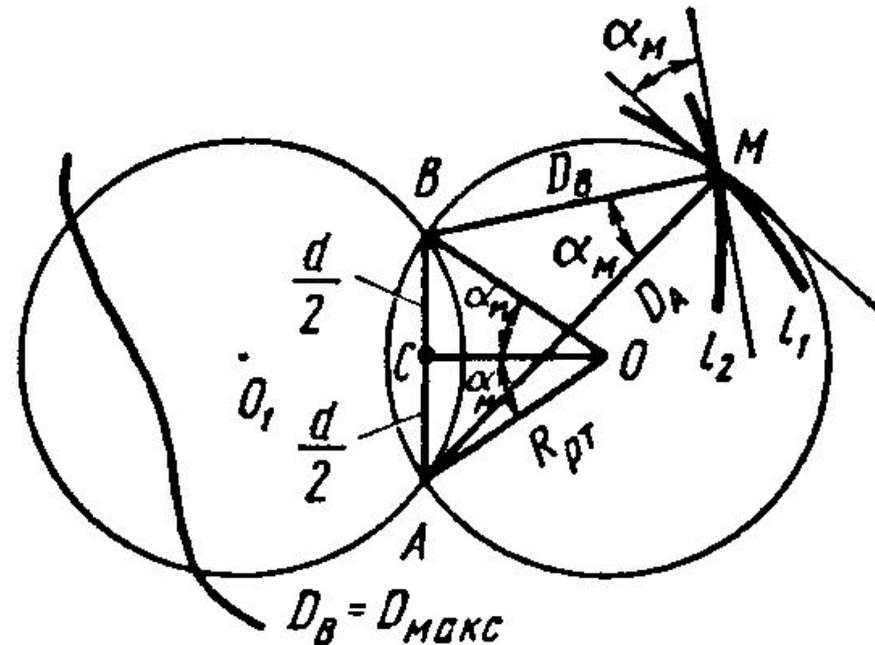
- Запросчик расположен на борту объекта в точке M и работает с двумя наземными ответчиками в точках A и B на расстоянии d между ними.

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{i1}^2 + \sigma_{i2}^2}}{\sin \alpha_M} = \frac{\sqrt{2}\sigma_D}{\sin \alpha_M} = \frac{\sqrt{2}c\sigma_r}{2\sin \alpha_M},$$

- Можно построить кривую равной точности $\sigma_r = \sigma_{rm}$, ограничивающую рабочую зону РНС. Для этого нужно вычислить угол α_M из условия

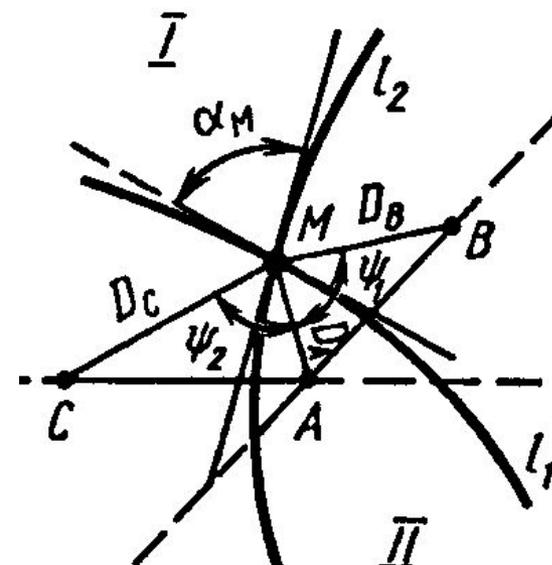
$$\sin \alpha_M = \frac{\sqrt{2}\sigma_D}{\sigma_{rm}} = \text{const.}$$

- Следовательно, кривая равной точности есть линия, все точки которой являются вершинами угла $\alpha_M = \text{const}$, т. е. окружность, проходящая через точки A и B ; отрезок d есть хорда этой окружности.



Рабочие зоны разностно-дальномерной РНС

Для определения местоположения объекта M в разностно-дальномерной системе используют по крайней мере две пары станций AB и AC с пересекающимися под углом α_M линиями положения (гиперболами). Если ошибки измерения времени задержки по первой и второй парам равны соответственно $\sigma_{\tau 1}$ и $\sigma_{\tau 2}$, а базовые углы первой и второй пар – ψ_1 и ψ_2 , то:



$$\sigma_{l1} = \frac{c\sigma_{\tau 1}}{2\sin \psi_1/2}; \quad \sigma_{l2} = \frac{c\sigma_{\tau 2}}{2\sin \psi_2/2}$$

Если эти ошибки независимы и $\sigma_{\tau 1} = \sigma_{\tau 2}$, то с учетом $\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{l1}^2 + \sigma_{l2}^2}}{\sin \alpha_M}$

$$\sigma_r = \frac{c\sigma_{\tau} \sqrt{\sin^2 \psi_1/2 + \sin^2 \psi_2/2}}{2\sin \alpha_M (\sin \psi_1/2) (\sin \psi_2/2)}$$

Для основных областей рабочей зоны I и II $\alpha_M = (\psi_1 + \psi_2)/2$ и $\sigma_r = K_p c\sigma_{\tau}$

$$K_p = \frac{\sqrt{\sin^2 \psi_1/2 + \sin^2 \psi_2/2}}{2\sin \frac{\psi_1 + \psi_2}{2} (\sin \psi_1/2) (\sin \psi_2/2)}$$

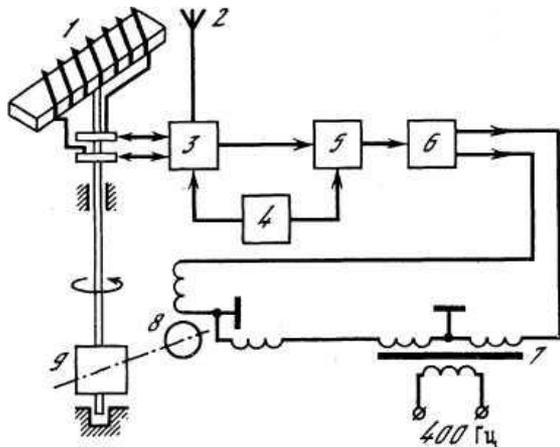
табулированный коэффициент, на основе которого строят линию, ограничивающую рабочую зону системы в соответствии с уравнением $K_p = \sigma_{r m} / c\sigma_{\tau}$.

Рабочая зона разностно-дальномерной системы имеет сложную конфигурацию, определяемую размещением станций.

Примеры простейших угломерных РНС

Автоматический радиокompас

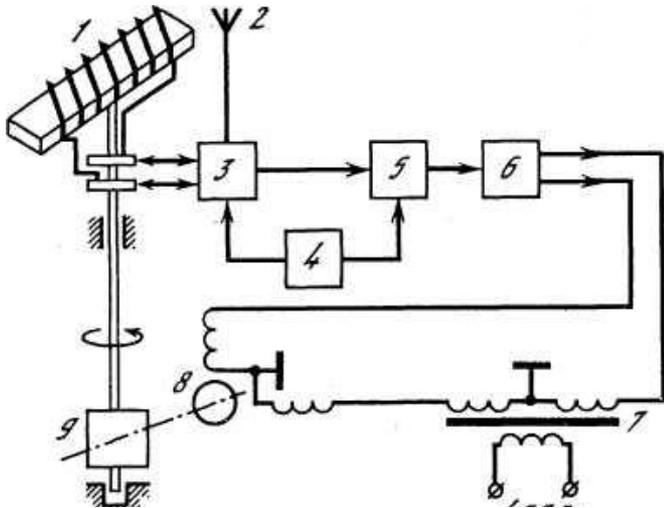
- Начало работ по созданию автоматических радиокompасов в СССР относится к 1940 г. Автоматический радиокompас АРК-5 с внутрифюзеляжной рамкой был разработан в 1944-1946 гг. и получил широкое применение. К 1947 г. он был освоен в производстве и внедрен в эксплуатацию.



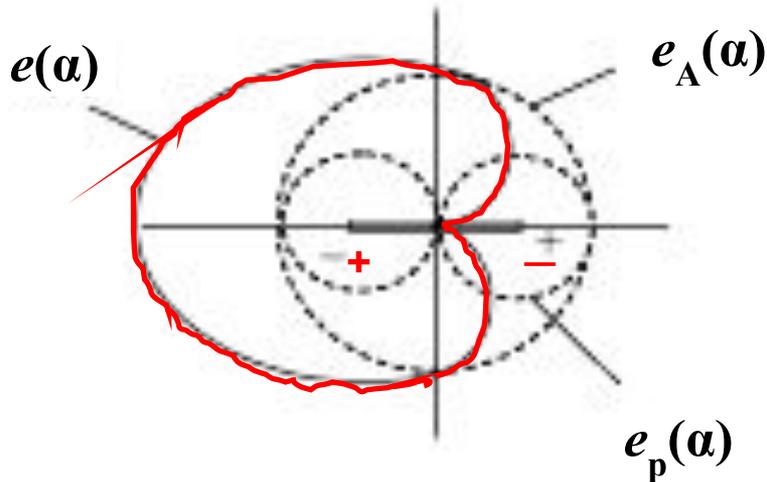
- 1 – внутрифюзеляжная рамка,
- 2 – ненаправленная антенна,
- 3 – приемник,
- 4 – звуковой генератор,
- 5 – синхронный детектор,
- 6 – усилитель,
- 7 – сетевой трансформатор,
- 8 – асинхронный двигатель,
- 9 – механизм поворота.

- Начиная с 1953 г. в СССР создается ряд автоматических радиокompасов и автоматических пеленгаторов с применением следящего привода. Они совершенствуются до настоящего времени, в основном за счет использования новой элементной базы.

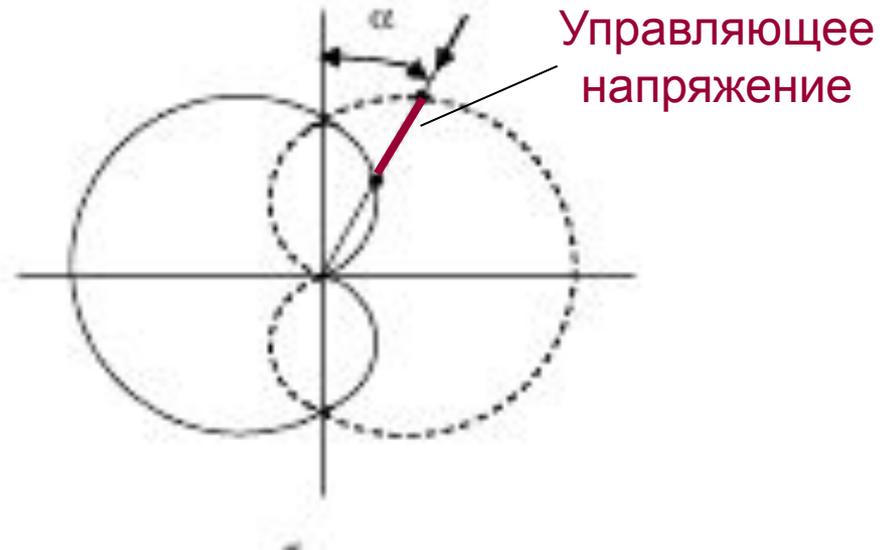
Автоматический радиокомпас



- 1 – внутрифюзеляжная рамка,
- 2 – ненаправленная антенна,
- 3 – приемник,
- 4 – звуковой генератор,
- 5 – синхронный детектор,
- 6 – усилитель,
- 7 – сетевой трансформатор,
- 8 – асинхронный двигатель,
- 9 – механизм поворота.



Образование ДН в виде кардиоиды



Переключение диаграммы

Автоматический радиокompас **АРК-9** входит в состав радионавигационного оборудования самолётов **Ан-2, Як-18Т, Як-40**, вертолётов **Ка-26, Ми-2, Ми-8** и предназначен для автоматического определения курсовых углов радиостанций, самолетовождения по приводным и вещательным радиостанциям.

Диапазон рабочих частот – от 150 до 1300 кГц.

Дальность действия при высоте полета 1000 м – 160 км (при $P_{\text{прд}} = 500 \text{ Вт}$).

В состав комплекта радиокompаса АРК-9 входят:

приёмник; блок питания; один или два пульта дистанционного управления; один или два переключателя волн; внутрифюзеляжная рамочная антенна с блоком автоматического вращения рамки; антенный усилитель; антенный фильтр.



Предусмотрена возможность настройки радиокompаса на две рабочие частоты (переключатель фиксированной настройки и ручка точной подстройки). АРК-9 позволяет прослушивать как модулированные, так и немодулированные сигналы приводных радиостанций (переключатель "ТЛФ - ТЛГ" на пульте управления радиокompасом).

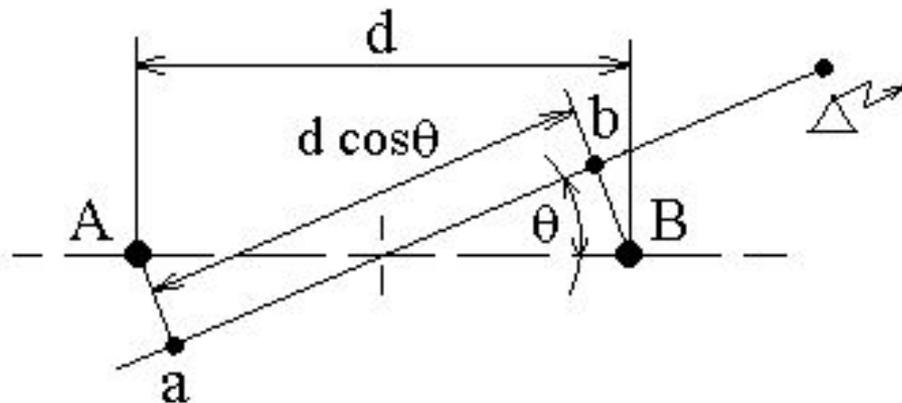
Ка-50 Чёрная Акула



Пульт управления АРК-22 (в центре)

Фазовый радиопеленгатор

- Простейшим и методически важным способом реализации фазового метода радиопеленгации является использование двух вертикальных ненаправленных антенн А и В, разнесенных на расстояние d (база пеленгатора)



Разность хода (длина отрезка ab) до антенн А и В для радиоволны, пришедшей под углом θ , равна $\Delta r = d \cos \theta$.

Разность фаз ЭДС, наводимых в антеннах, составит

$$\phi_A - \phi_B = \Delta\phi = 2\pi d \cos \theta / \lambda .$$

Фазовый детектор с характеристикой

$$U_{\text{ВЫХ}} = \sin \Delta\phi$$

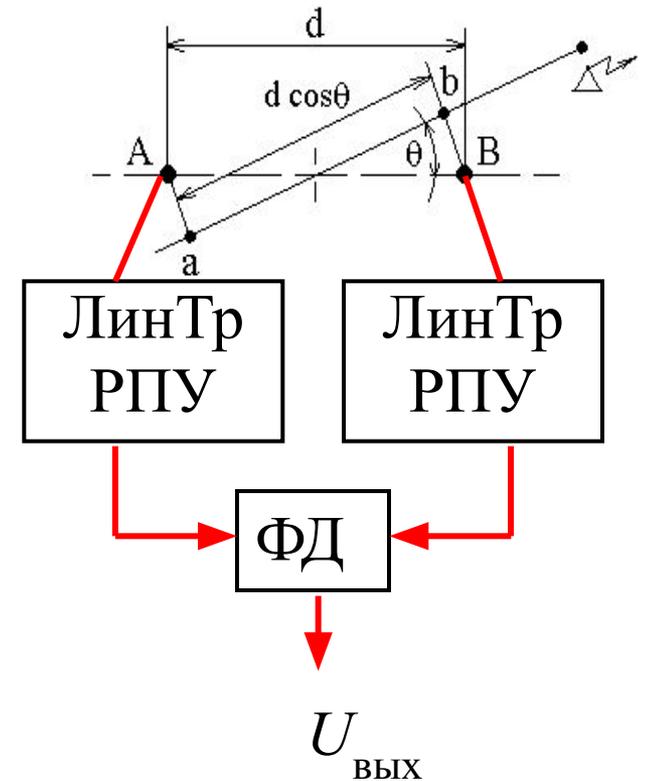
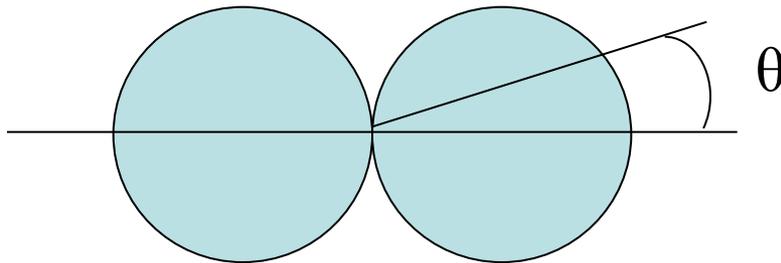
$$U_{\text{ВЫХ}} = \sin (2\pi d \cos\theta / \lambda)$$

Как выбрать базу d ?

При $d > \lambda/2$ появляется неоднозначность.

Величина $\cos\theta$ слабо изменяется при $\theta \approx 0$ (зона низкой чувствительности).

При $\theta \approx \pi/2$ можно использовать большую базу и повысить точность.



Фазовые РНС

- Принцип действия фазовых радионавигационных систем (ФРНС), так же как и импульсных РНС, основан на измерении дальностей или разностей дальностей до нескольких радиомаяков (РМ).
- Наиболее широкое распространение получили ФРНС без ответчика.
- Опорные РМ излучают колебания, **когерентность** которых поддерживается специальной системой **синхронизации**. На борту потребителя производится прием и **идентификация** сигналов нескольких РМ.
- Аналогом времени задержки сигнала является фаза сигнала.
- Для определения координат потребителя в ФРНС могут быть использованы дальномерные, квазидальномерные и разностно-дальномерные измерения.

- При *дальномерных* измерениях бортовая шкала времени совмещена со шкалой времени опорных РМ.
На объекте может быть сформирован когерентный опорный сигнал.
Результат измерения разности фаз между опорным и принятым от РМ сигналами пересчитывается в дальность до РМ.
- При *квазидальномерных* измерениях имеется постоянное, но априори неизвестное расхождение шкал времени, которое измеряется в процессе навигационных определений. **Как измеряется?**
- При *разностно-дальномерных* измерениях расхождение шкал времени также неизменно в течение радионавигационного сеанса и компенсируется в РНП, определяемом как разность фазовых запаздываний сигналов.

- Принципиальное отличие ФРНС от импульсных РНС заключается в том, что определение дальности или разности дальностей производится на основе измерений фазы принятых сигналов РМ.
- Показания бортового фазометра $\Delta\varphi_{\phi}$ однозначно связаны с оценкой РНП лишь в том случае, когда сдвиг фаз между подаваемыми на него колебаниями $\Delta\varphi < 2\pi$. При невыполнении этого условия разность фаз $\Delta\varphi$ включает неизвестное число n полных фазовых циклов, т. е. представляет собой сумму:

$$\Delta\varphi = 2\pi n + \Delta\varphi_{\phi}$$

- Дальность до РМ равна

$$D = \lambda n + \lambda (\Delta\varphi_{\phi}/2\pi)$$

- Измерение РНП фазовым методом неоднозначно.

- Одному и тому же значению $\Delta\varphi_\phi$ отвечает семейство линий положения. Выносится решение о том, что потребитель находится на одной из таких линий положения, но на какой именно - неизвестно.
- Неопределенность выбора истинной линии положения возрастает с повышением частоты сигнального колебания f_0 , в то время как среднеквадратическая ошибка измерения РНП, обусловленная шумовой помехой уменьшается.
- Для одновременного удовлетворения требований к точности и однозначности измерений в ФРНС применяют *методы устранения многозначности фазового отсчета*.

Методы устранения многозначности фазового отсчета

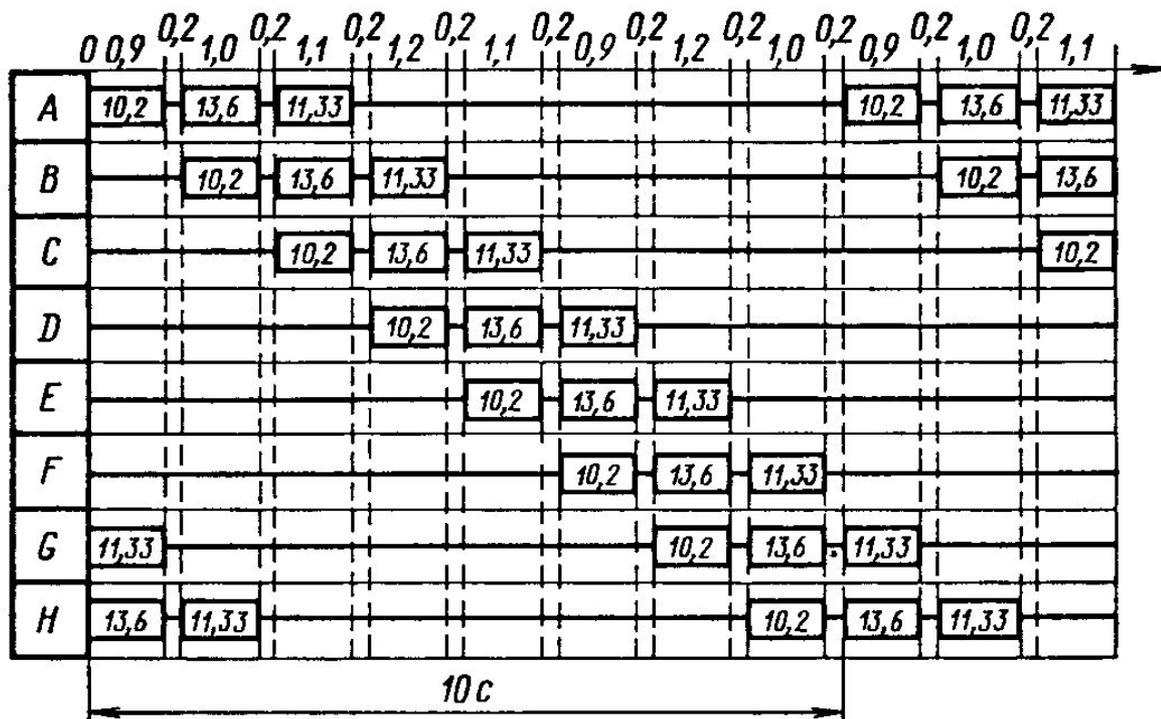
- В простейших ФРНС многозначность фазовых измерений устраняется путем *непрерывного подсчета* целого числа полных фазовых циклов в показаниях фазометра при перемещении потребителя от точки с известными координатами. Однако этот метод ненадежен, так как даже кратковременный сбой в синхронизаторе бортового измерителя приводит к потере фазовых соотношений.
- Наибольшее распространение получил *многошкальный метод* устранения многозначности. Для его реализации нужно, чтобы сигналы излучались на нескольких частотах, находящихся между собой в определенном целочисленном соотношении.
- Используют также метод устранения многозначности, основанный на привлечении информации о функции, модулирующей несущие колебания по амплитуде.

Это может быть гармоническая модулирующая функция или функция в виде видеоимпульса определенной формы. Необходимым условием при этом является поддержание строгого синхронизма между модулирующей функцией и фазой несущего колебания.

Многочастотные фазовые РНС

- Классическим примером многочастотных ФРНС являются СДВ-системы, работающие в диапазоне частот (10...15 кГц), что соответствует длине волны 30...20 км.
- Можно оценить потенциальную точность
- Если частоту увеличить, то точность станет выше, но возрастает затухание радиоволн при распространении вдоль поверхности Земли.
- **«Омега»** — первая глобальная радионавигационная система для воздушных судов, поддерживалась США и ещё 6 другими странами. «Омега» была разработана ВМС США для нужд военной авиации. Разработка началась в 1968 и планировалось глобальное покрытие океанов с помощью 8 передатчиков, с точностью определения местоположения равной 4 милям. Изначально система использовалась атомными бомбардировщиками в приполярных районах. Позже было обнаружено, что она может использоваться и подводными лодками. Выведена из эксплуатации в 1998 г.
- Для определения РНП используют основную частоту.
- Реализован многошкальный метод устранения многозначности. Опорные РМ излучают последовательно во времени основную частоту и дополнительные частоты.
- В рассматриваемых многочастотных ФРНС осуществляют частотно-временное разделение сигналов.

Диаграмма излучения сигналов ФРНС «Омега»

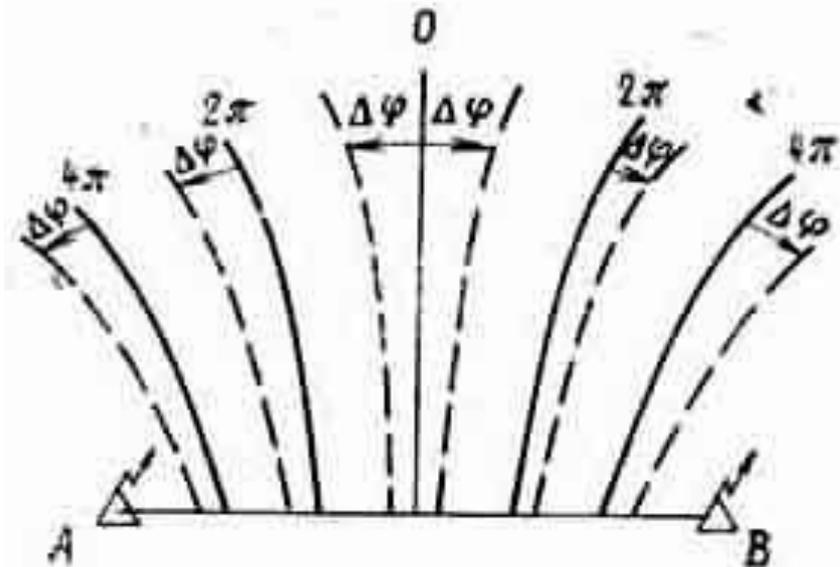


- Наземные опорные РМ синхронизованно излучают импульсные радиосигналы большой длительности (0,9...1,2 с) на частотах 10,2; 13,6; 11,33 кГц.
- Период излучаемых сигналов 10 с.

- Сигналы частотой 10,2 кГц применяют для формирования шкалы высокой точности.
- Для создания грубой шкалы используются биения колебаний на частотах 13,6 и 10,2 кГц.
- Для создания сверхгрубой шкалы используются биения на частотах 11,33 и 10,2 кГц.
- Предполагается, что с точностью до сверхгрубой шкалы (ОЦЕНИТЬ!) местоположение потребителя априори известно.

Устранение многозначности

- В многочастотных ФРНС отдают предпочтение *разностно-дальномерным измерениям*, что экономически выгодно, так как не требует размещения на борту потребителя дорогостоящего эталона частоты.
- Устранение многозначности заключается в установлении целого числа циклов в фазовом сдвиге $\Delta\varphi$, который и определяет оценку РНП.



- Полоса на поверхности земли, в которой обеспечивается однозначность отсчета называется «дорожкой».

Устранение многозначности

- Колебания дополнительных частот $f_1 = 11,33$ кГц и $f_2 = 13,6$ кГц позволяют получить биения с колебанием основной частоты $f_0 = 10,2$ кГц. Длина волны примерно 30 км
- Частоты биений $F_{10} = f_1 - f_0 = 1,13$ кГц и $F_{20} = f_2 - f_0 = 3,4$ кГц. «Длины волн» соответственно 265 км и 88 км.
- Колебания частот F_{10} и F_{20} используются для устранения многозначности результатов измерения на частоте f_0 .
- Устранение многозначности может быть осуществлено отдельно по линиям положения с помощью многоступенчатого алгоритма [XX]. При этом измерения производятся на частотах F_{10} (сверхгрубая шкала – 132 км), F_{20} (грубая шкала – 44 км) и f_0 (точная шкала – 14,7 км).
- Коэффициент сопряжения шкал $k = F_{20} / F_{10} = f_0 / F_{10} = 3$.
- Последовательное уточнение результатов отсчета РНП от шкалы к шкале позволяет получить однозначный отсчет по точной шкале.

- Применение многоступенчатого алгоритма дает правильное однозначное решение при условиях:
 - ошибка сверхгрубой шкалы не выходит за пределы грубой шкалы,
 - ошибка грубой шкалы – за пределы точной шкалы.
- При действии помех это условие может быть нарушено, что приводит к принятию ошибочного решения.
- Наибольший вклад в ошибку местоопределения вносит изменчивость фазовой скорости распространения радиоволн на трассе РМ – потребитель. Дополнительный фазовый сдвиг может быть представлен как сумма регулярной и случайной составляющих.
- Регулярная составляющая фазового сдвига зависит от времени года и суток, типа подстилающей поверхности. Она рассчитывается для различных районов Земного шара и учитывается при измерениях.
- Случайная составляющая полностью входит в результирующую ошибку местоопределения. Поэтому осуществляются специальные меры (дифференциальный режим, комплексирование).

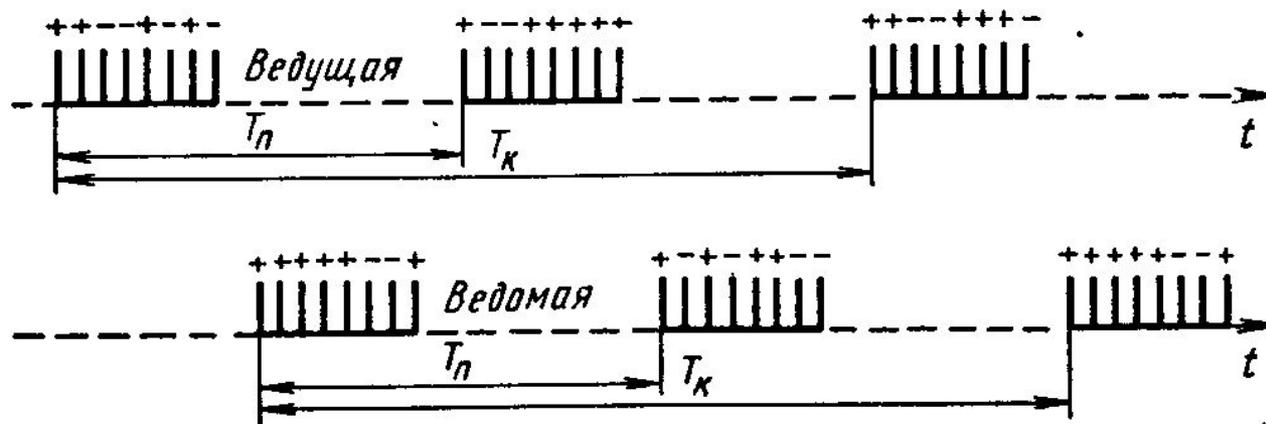
- **ФРНС «Альфа»** (также известная как **РСДН-20**) – советская система дальней радионавигации, предназначенная для определения координат самолётов, кораблей и подводных лодок (в подводном положении). Дальность действия – **10 тыс. км** от ведущей станции. Точность местоопределения **2,5...7 км**. Введена в эксплуатацию в 1972 году.
- Система разрабатывалась параллельно и работает по тем же принципам, что и «*Omega*».
- Система «Альфа» состоит из 3 передатчиков, которые расположены в районе Новосибирска, Краснодара, Комсомольска-на-Амуре. Эти передатчики излучают последовательности сигналов длительностью 3,6 с на частотах 11,905 кГц, 12,649 кГц и 14,881 кГц.
- Точность местоопределения – не хуже 2 миль, однако в высоких широтах и в полярных районах, где могут возникать внезапные фазовые аномалии, точность снижается до 7 миль.
- Мачты антенн, используемые для системы навигации «Альфа» должно быть очень высоки.

Импульсно-фазовые РНС

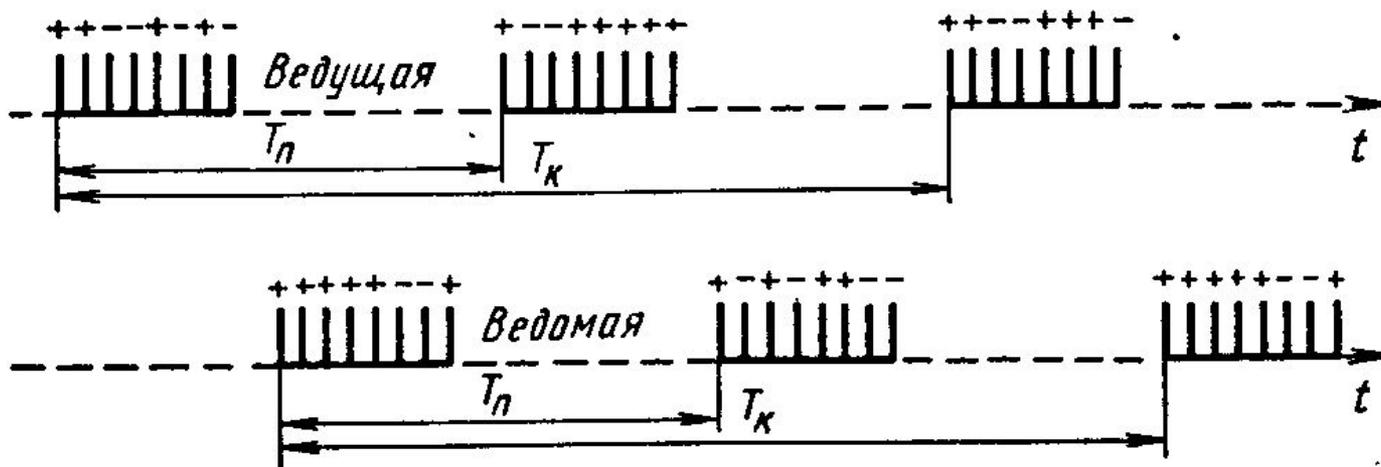
- Импульсно-фазовые радионавигационные системы (ИФРНС) длинноволнового диапазона (порядка 100 кГц) обеспечивают дальность действия 1800 ... 2000 км.
- Опорные РМ ИФРНС объединены в группы (цепочки) из 3 - 6 наземных станций. В каждой цепочке одна из станций является ведущей, остальные – ведомыми.
- Для определения координат потребителей используются, как правило, разностно-дальномерные измерения.
- Измерение РНП производится импульсно-фазовым методом:
 - грубое измерение разности дальностей основано на оценке интервала времени между огибающими импульсов ведущей и ведомых станций,
 - точное — на оценке разности фаз несущих колебаний тех же импульсов.
- В ИФРНС сочетаются положительные качества фазовых и импульсных систем — высокая точность и однозначность измерений.

Импульсно-фазовые РНС

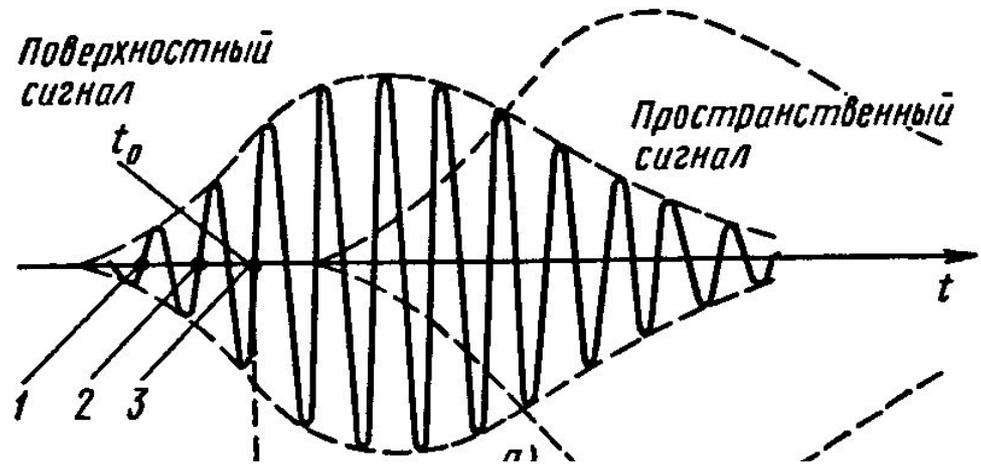
- Ведущая станция излучает 8-ми импульсные пачки фазоманипулированных радиоимпульсов. Временной интервал между импульсами пачки равен 1000 мкс.
- Частота повторения пачек (10 ... 25 Гц) одинакова для всех станций одной цепочки и отличается от частоты повторения пачек других цепочек, что позволяет в месте приема идентифицировать сигналы различных цепочек.
- Ведомые станции синхронизируются сигналами ведущей станции и излучают радиоимпульсы такой же формы, но с некоторой фиксированной задержкой во времени.



- Введение задержки обеспечивает временное разделение сигналов ведущей и ведомых станций.
- Законы фазовой манипуляции радиоимпульсов ведомых станций и ведущей станции различны, что позволяет идентифицировать сигналы в месте приема.
- Фазы радиоимпульсов, отмеченных знаками «+» и «-», отличаются друг от друга на 180° . Полный период T_K фазового кода соответствует двум пачкам радиоимпульсов и равен удвоенному периоду повторения T_{II} 8-ми импульсных пачек.



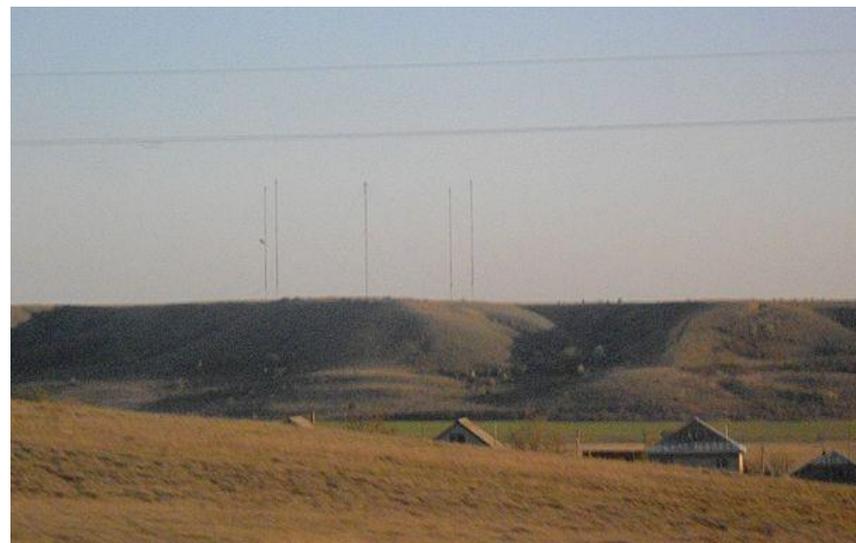
- Радиоимпульсы имеют медленно нарастающий фронт длительностью около 80 мкс.



- В место приема наряду с поверхностной приходит еще и пространственная волна, время запаздывания которой зависит от состояния ионосферы и электропроводности подстилающей поверхности на трассе распространения. Поэтому на вход приемника поступает не только поверхностный, но и пространственный сигнал, запаздывающий относительно первого на 35...50 мкс.
- В режиме точных измерений пространственный сигнал не может использоваться из-за нестабильности его параметров, поэтому измерение РНП производится по свободному от влияния пространственного сигнала участку фронта сигнала поверхностной волны.

- **«Чайка»** — ИФ РНС длинноволнового диапазона, предназначенная для определения координат самолётов и кораблей с ошибкой 50...100 м. Система была разработана в 1958 г. по заказу ВВС СССР и является российским аналогом американской системы Loran-C.
- Существует 5 цепочек «Чайки»:
 - GRI 8000 — Европейская цепь (1969)
 - GRI 7950 — Восточная цепь (1986)
 - GRI 5980 — Российско-Американская цепь в Беринговом море (1995-2010)
 - GRI 5960 — Северная цепь (1996)
 - GRI 4970 — Северозападная цепь

GRI 8000



№	Город	Задержка излучения, мкс	Кодовая задержка	Мощность, кВт
М	Карачев (44 км от Брянска)			450
1	Петрозаводск	13217.21	10000	700
2	Слоним (Белоруссия)	27125.00	25000	450
3	Симферополь (Украина)	53070.25	55000	550
4	Сызрань	67941.60	65000	700

LORAN (LOng RAnge Navigation) — РНС наземного базирования. Система LORAN широко использовалась кораблями ВМС США и Великобритании в годы Второй мировой войны.



**Передатчик LORAN в заливе
Кембридж, Канада (189 м)**

Импульсно-фазовая разностно-дальномерная система LORAN-C работает на частоте 100 кГц. На этих частотах поглощение радиоволн в ионосфере может быть значительным, особенно при больших углах падения.

Система LORAN-C основана на измерении задержки импульсов, принимаемых от цепочки передающих станций. В каждой цепочке одна из станций является ведущей, а остальные – ведомые. Все они точно синхронизируются.

Приемник измеряет время прихода импульсов с точностью 0,1 мкс, и, если используется земная волна, местоположение может определяться с точностью 150 м на расстояниях до 1500 км (на море).

На расстояниях свыше 2000 км ионосферная волна преобладает и точность будет зависеть от состояния ионосферы. Испытания показали, что в отдельных случаях могут возникнуть ошибки в несколько километров.

Навигационная система LORAN-C имеет в мире 34 цепи, охватывающие территорию США, Северной Европы и прилегающих морских районов в северном полушарии.

В ноябре 2009 года береговая охрана США объявила, что LORAN-C не требуется для морской навигации. Береговая охрана США прекратила передачу всех сигналов LORAN-C 8 февраля 2010 года.

Это прекращение не затронуло участие США в российско-американской или канадской сети Canadian LORAN-C. Участие США в этих сетях продолжилось временно в соответствии с международными соглашениями.

Пользователям системы LORAN-C было рекомендовано для навигации использовать систему GPS.

С 1 августа 2010 года была прекращена работа американских станций LORAN-C в составе российско-американской цепи, а с 3 августа 2010 года и в составе американо-канадской цепи. Таким образом в настоящее время работа LORAN-C на территории США полностью завершена.

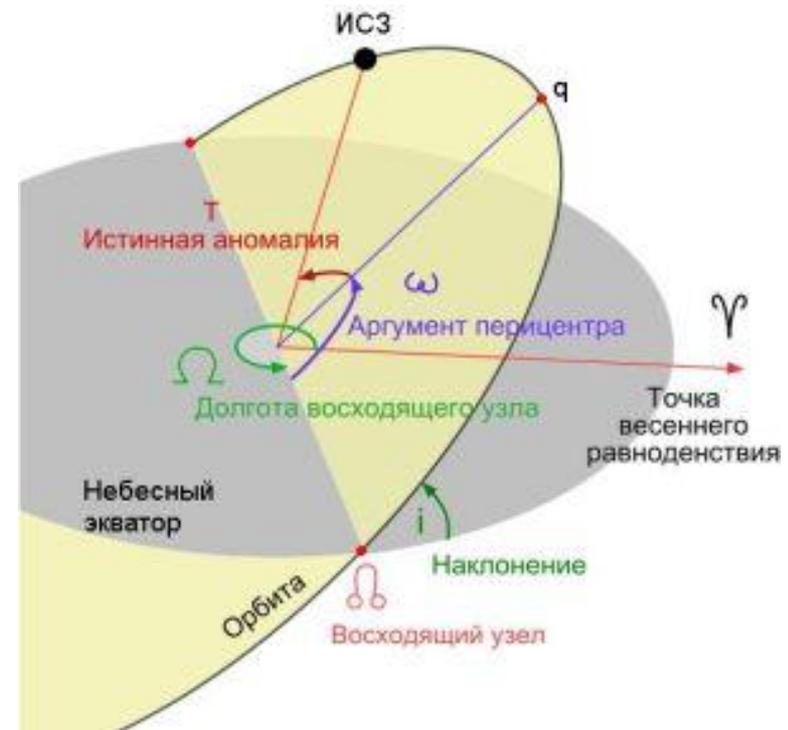
Спутниковые РНС

- РМ располагается на ИСЗ
- ИСЗ – подвижный РМ (недостаток!). Положение РМ при решении радионавигационной задачи должно быть известно, следовательно необходимо обеспечить наличие информации о текущем положении ИСЗ
- ИСЗ – подвижный РМ (достоинство!). Последовательные положения ИСЗ на орбите можно представить как несколько отдельных РМ. Следовательно, определение местоположения возможно с помощью единственного ИСЗ.

Выбор орбиты для ИСЗ при построении СРНС

- Параметры орбит и виды орбит

- Большая полуось " a ".
- Эксцентриситет " e ".
- Наклонение орбиты " i " к экваториальной плоскости Земли.
- Аргумент перигея (АП) ω - угол, отсчитываемый в плоскости орбиты ИСЗ от восходящего узла орбиты до точки перигея (точка, где расстояние между ИСЗ и центром Земли наименьшее).
- Долгота восходящего узла (ДВУ) Ω - угол, отсчитываемый в плоскости земного экватора от восходящего узла до точки весеннего равноденствия.
- Средняя аномалия (СА) M_0 - угол, отсчитываемый в плоскости орбиты ИСЗ от перигея до ИСЗ на орбите.



Выбор орбиты для ИСЗ при построении СРНС

- Выбор точки запуска
- При выборе орбиты для СРНС основными параметрами являются высота и наклонение:
- Высота орбиты определяет
 - радиус зоны видимости ($h \uparrow$),
 - время сеанса обсервации ($h \uparrow$),
 - ошибку разностно-дальномерного способа определения местоположения ($h \downarrow$)
- Наклонение орбиты определяет границы зоны действия СРНС по широте места

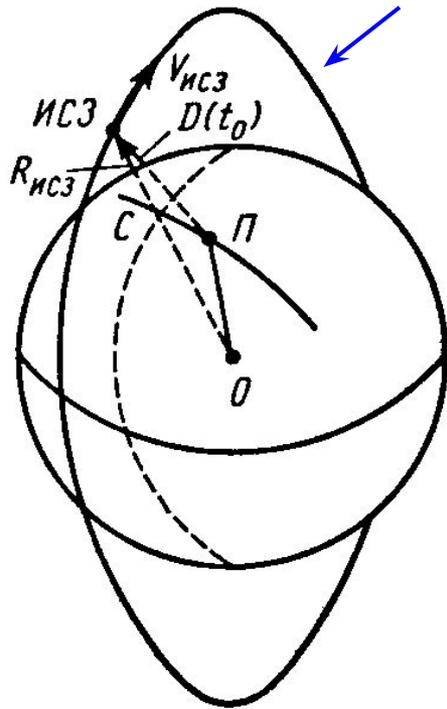
СРНС первого поколения

- В 1957 г. под руководством академика В.А. Котельникова экспериментально подтверждена возможность определения параметров движения ИСЗ по результатам измерений доплеровского сдвига частоты сигнала, излучаемого с ИСЗ, в точке приема с известными координатами.
- Тогда может быть решена и обратная задача – определение координат точки приема по измеренному доплеровскому сдвигу частоты сигнала, излучаемого с ИСЗ, параметры движения которого известны.

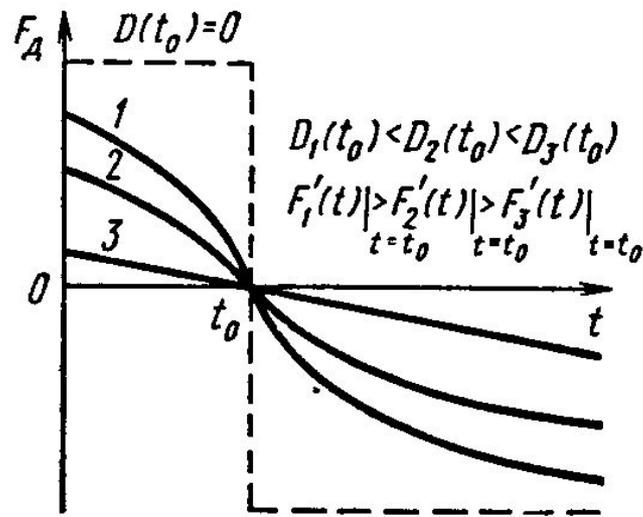
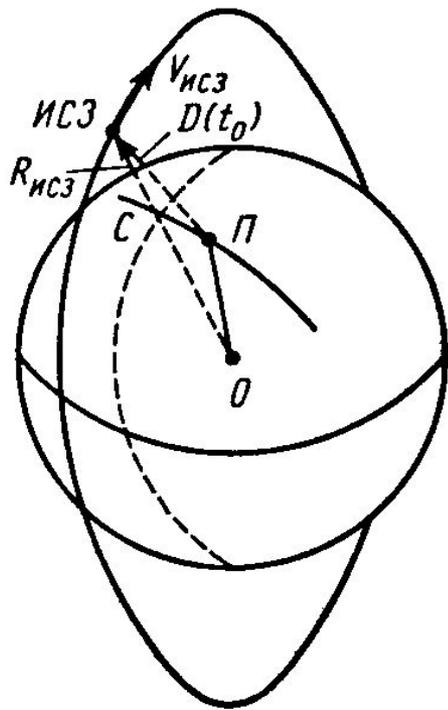
СРНС первого поколения

- Следовательно ИСЗ можно использовать в качестве РМ, координаты которого хотя и изменяются, но заранее известны для любого момента времени.
- Эта идея была реализована в СРНС **первого поколения** на базе **низкоорбитальных ИСЗ**.
- Для навигационных определений достаточно было **только одного ИСЗ**, оказывающегося в зоне радиовидимости наблюдателя.

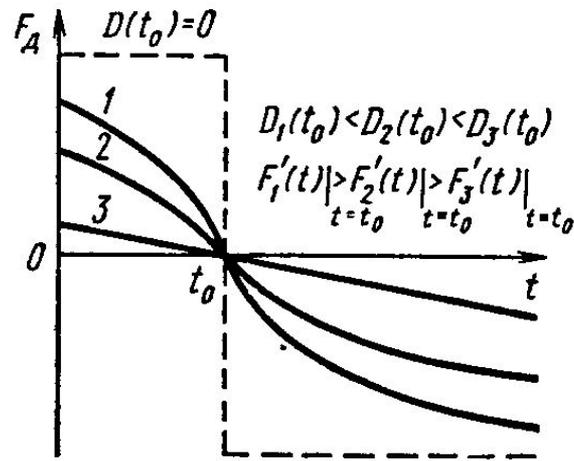
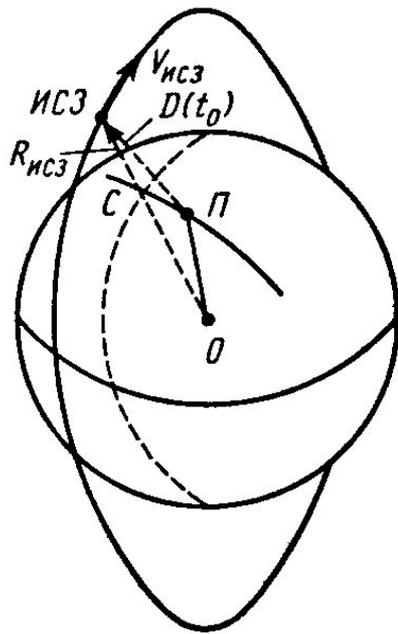
Круговая орбита высотой h



- ИСЗ вращается с известной постоянной скоростью $V_{ИСЗ}$, по окружности радиусом $R_{ИСЗ} = R_3 + h$ в плоскости, проходящей через центр Земли.
 - Положение ИСЗ в каждый момент времени известно.
 - Наблюдатель (потребитель) неподвижен и находится на поверхности Земли в некоторой точке П.
-
- ИСЗ излучает гармонические колебания частотой f_0 .
 - Наблюдатель имеет возможность сравнивать частоту принимаемого от ИСЗ колебания $f_{пр}(t)$ с частотой **бортового эталона**. Бортовой эталон имеет частоту колебаний f_0 .



- Измеряя разность частот $f_{\text{пр}}(t) - f_0 = F_D(t)$ можно построить график функции $F_D(t)$.
- В момент изменения знака доплеровской частоты $t = t_0$, наблюдатель может утверждать, что находится в плоскости, нормальной к вектору скорости ИСЗ (на траверзе ИСЗ).
- Зная координаты ИСЗ в момент времени t_0 и направление его движения, можно построить поверхность положения в виде плоскости, а также линию положения на поверхности Земли (линия СП).



- Для определения местонахождения наблюдателя, можно использовать зависимость крутизны кривой $F_D(t)$ в момент t_0 (кривые 1, 2 и 3) от расстояния между ИСЗ и точкой приема П.
- Крутизна изменения $F_D(t)$ в окрестности точки t_0 однозначно связана с наклонной дальностью $D(t_0)$.
- Определив $D(t_0)$, строят поверхность положения в виде сферы с центром в точке нахождения ИСЗ в момент t_0 .
- Местоположение потребителя соответствует точке пересечения этой сферы с линией положения СП.
- Рассмотренный метод определения координат называют *дифференциальным доплеровским (траверсным)*.

Интегральный доплеровский метод спутниковой радионавигации

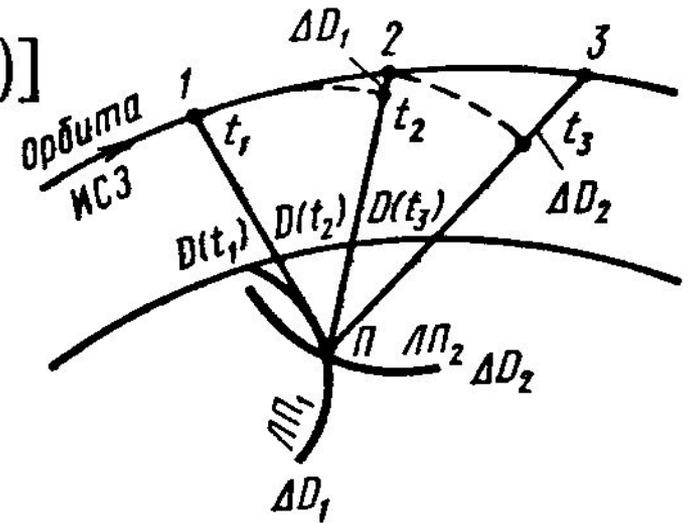
- Точность дифференциального метода определяется точностью измерения мгновенного значения доплеровской частоты, которая может быть ограничена по «геометрическим причинам» и по «энергетическим причинам».
- Энергетические параметры РНС определяют качество радионавигационных измерений. А в СРНС существуют проблемы с энергетикой радиолинии ИСЗ-потребитель.
- Помехоустойчивость радионавигационного канала тем выше, чем большая часть энергии излученного сигнала используется для измерения РНП.
- В связи с этим получил распространение метод радионавигационных измерений, основанный на **интегрировании доплеровской частоты**.

Пусть в точке приема вычисляют интеграл

$$\int_{t_1}^{t_2} F_D(t) dt = -\frac{f_0}{c} \int_{t_1}^{t_2} V_p(t) dt = \frac{f_0}{c} [D(t_2) - D(t_1)]$$

где $V_p(t)$ – радиальная скорость ИСЗ относительно потребителя. Тогда

$$\Delta D = D(t_2) - D(t_1) = \frac{c}{f_0} \int_{t_1}^{t_2} F_D(t) dt.$$



Интеграл от доплеровской частоты в пределах от t_1 до t_2 однозначно определяет разность дальностей ΔD_{12} до ИСЗ, т. е. дает значение навигационного параметра в разностно-дальномерной РНС с опорными станциями, координаты которых определяются положением ИСЗ в моменты времени t_1 и t_2 . Получаем поверхность положения в виде гиперboloида.

Повторив операцию в пределах от t_2 до t_3 получим второй гиперboloид. Положение наблюдателя характеризуется точкой пересечения этих гиперboloидов с земной поверхностью. Возникающая при этом неоднозначность решения устраняется, как и в наземных РНС, с помощью априорных данных.

Выводы по СРНС первого поколения

- Основным условием реализации алгоритмов СРНС первого поколения является точная привязка результатов измерения РНП к единой шкале времени.
- Для этого потребитель должен иметь высокостабильный эталон частоты, обеспечивающий формирование бортовой шкалы времени. Коррекцию бортовой шкалы времени осуществляют с помощью специальных меток времени в принимаемом радиосигнале.
- Кроме того, для вычисления текущих пространственных координат ИСЗ на борту потребителя необходимо иметь эфемеридную информацию.
- Эфемеридную информацию в форме параметров орбиты ИСЗ либо его геоцентрических координат передают с борта ИСЗ с помощью модуляции (фазовой или частотной) непрерывной несущей, используемой для интегральных доплеровских измерений.

Сведения о СРНС первого поколения

- Первая отечественная низкоорбитальная РНС «Цикада» - начало работ в 1963 году. В 1967 году на орбиту был выведен первый отечественный навигационный спутник «Космос-192».
- В 1964 году в США создается доплеровская СРНС система первого поколения «Transit». Основное назначение - навигационное обеспечение пуска с подводных лодок баллистических ракет Поларис. Отцом системы считается директор Лаборатории прикладной физики Р. Кершнер. Для коммерческого использования система становится доступной в 1967 г.
- В состав СРНС «Транзит» (США) входят 5 или 6 ИСЗ, наземный комплекс контроля и парк бортовой аппаратуры потребителей. В зоне радиовидимости расположен только один ИСЗ.

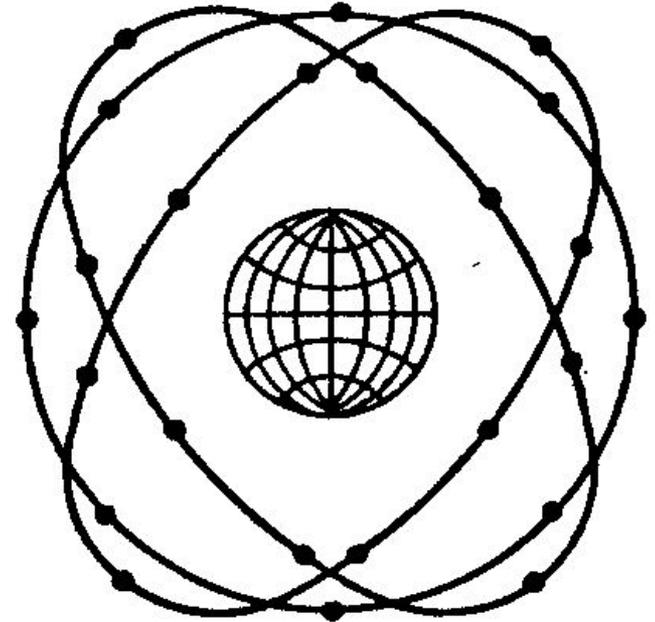
Сведения о СРНС первого поколения

- ИСЗ расположены на круговых полярных орбитах высотой около 1100 км и имеют период обращения около 107 мин.
- При таких параметрах орбит радиус зоны радиовидимости, достигает 2000 км, а время сеанса от 10 до 16 мин. Учитывая, что период передачи навигационной информации (эфemerидная информация, метки времени, служебная информация) равен 2 мин, за один пролет ИСЗ можно получить 5 ... 8 поверхностей положения, тогда как достаточное для местоопределения число равно 3.
- Избыточные поверхности положения могут быть использованы для статистического сглаживания получаемых оценок координат.

- В СРНС «Транзит» применяют два высокочастотных сигнала: основной (400 МГц) и вспомогательный (150 МГц), что дает возможность произвести компенсацию ошибки, обусловленной ионосферной рефракцией при доплеровских измерениях.
- Низкоорбитальные СРНС обладают по крайней мере двумя серьезными недостатками: малой точностью определения координат высокодинамичных объектов и большим интервалом времени между наблюдениями.
- Например, при ошибке измерения скорости объекта 0,5 м/с ошибка местоопределения составляет 500 м, в то время как ошибка местоопределения неподвижного объекта приблизительно равна 50 м.
- Средний интервал времени между наблюдениями зависит от географической широты потребителя и колеблется от 35 мин в приполярных районах до 90 мин вблизи экватора.
- Уменьшение этого интервала путем увеличения числа спутников в данных системах невозможно, так как все ИСЗ излучают сигналы на одних и тех же частотах.

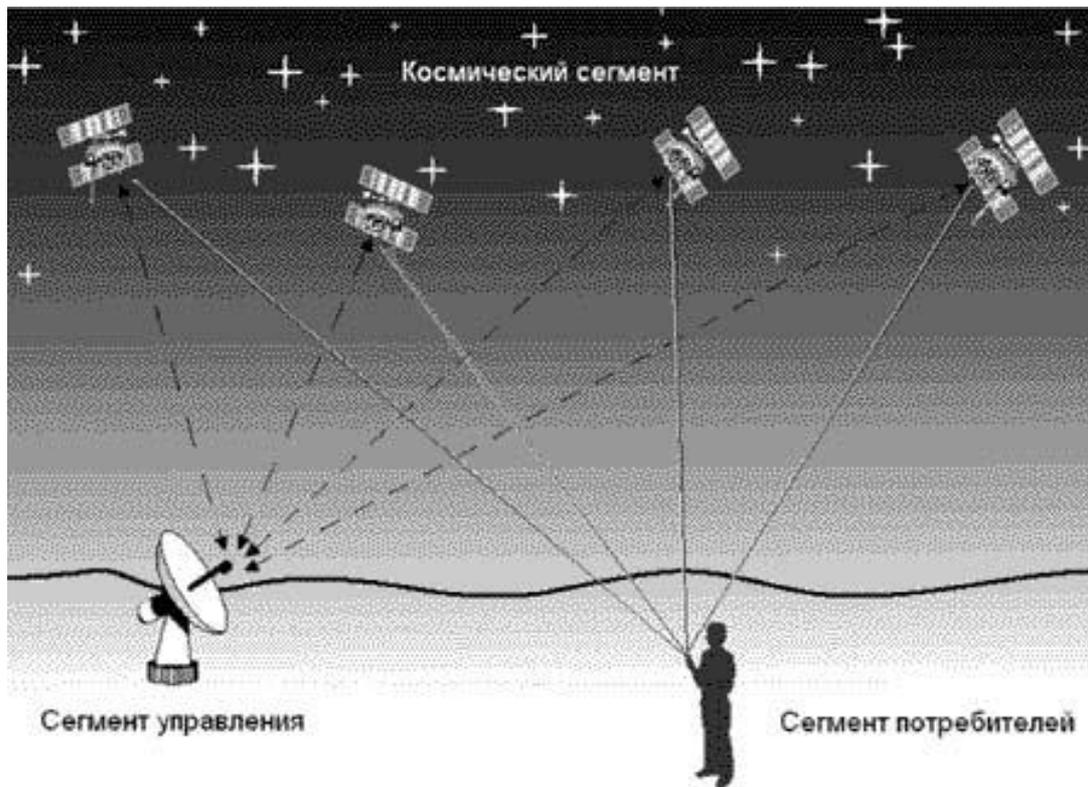
СРНС второго поколения «Навстар» и ГЛОНАСС

- Характерными особенностями СРНС 2-го поколения являются применение среднеорбитальных ИСЗ и использование для навигационных определений сигналов одновременно нескольких ИСЗ
- В состав СРНС входят подсистема ИСЗ, подсистема контроля и управления (наземный командно-измерительный комплекс) и подсистема аппаратуры потребителей.



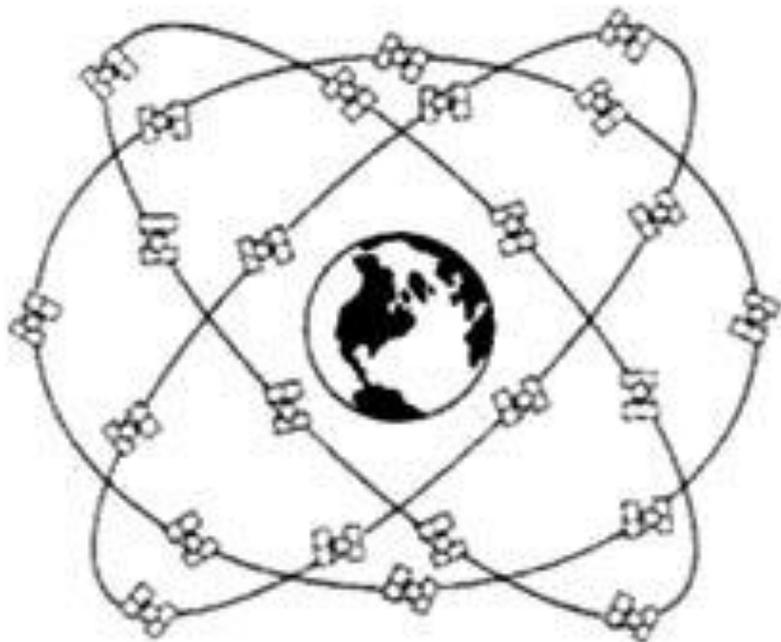
- В состав космической подсистемы входят 18 ... 24 ИСЗ, размещенные равномерно в трех орбитальных плоскостях, разнесенных по долготе на 120° . Высота орбит ИСЗ 20 тыс. км, период обращения 12 час.
- В зоне радиовидимости потребителя в любой момент может находиться от 4 до 11 ИСЗ, что обеспечивает возможность непрерывного определения трех координат (долгота, широта, высота).

Сегменты высокоорбитальных навигационных систем Глонасс и GPS



- космический сегмент, в который входит орбитальная группировка ИСЗ;
- сегмент управления, наземный комплекс управления (НКУ) орбитальной группировкой космических аппаратов;
- аппаратура пользователей системы.

Подсистема космических аппаратов ГЛОНАСС

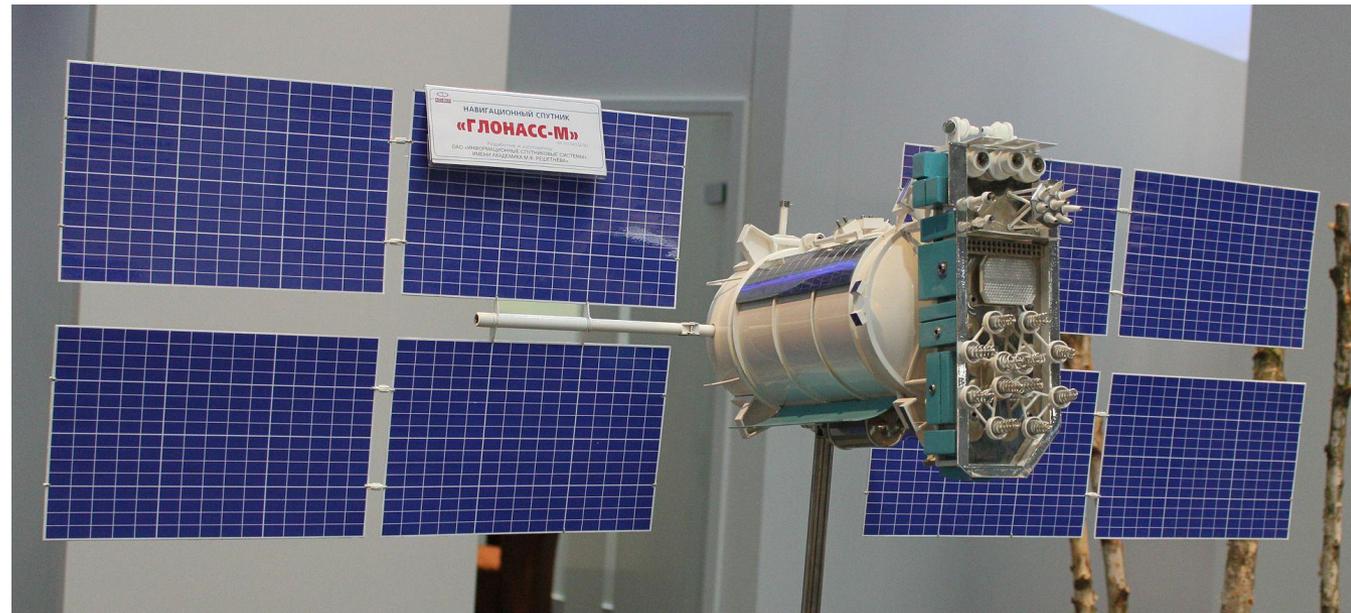
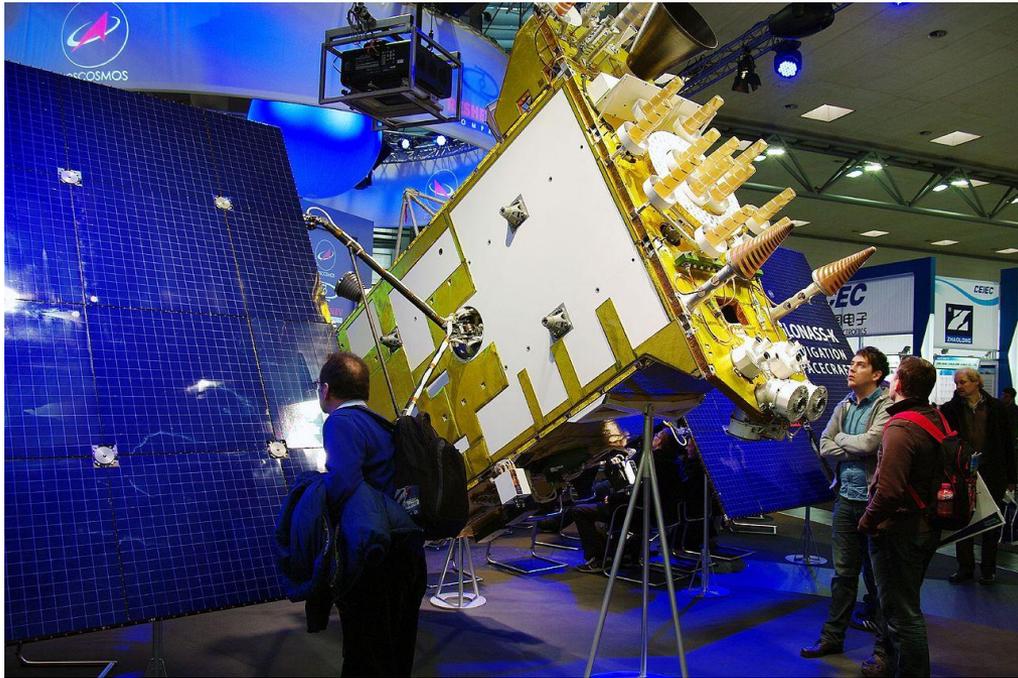


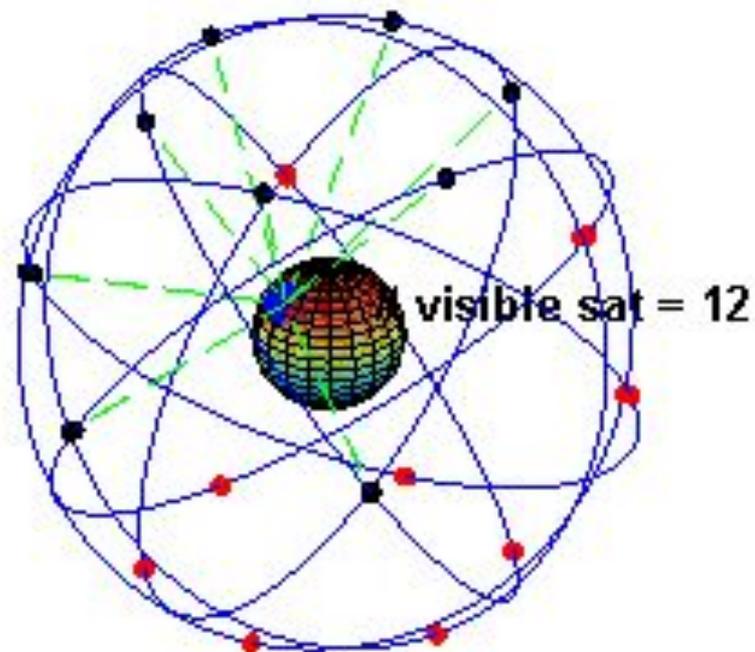
Подсистема космических аппаратов GPS



В системе ГЛОНАСС используются ИСЗ, вращающиеся по круговой орбите на высоте ~ 19100 км. Период обращения ИСЗ равен 11 час 45 мин. Время эксплуатации спутника ≈ 5 лет, за это время параметры его орбиты не должны измениться больше чем на 5%. ИСЗ представляет собой герметический контейнер диаметром 1,35 м и длиной 7,84 м. Питание всех систем производится от солнечных батарей. Общая масса спутника - 1415 кг. В состав бортовой аппаратуры входят: бортовой навигационный передатчик, хронизатор (часы), бортовой управляющий комплекс, система ориентации и стабилизации.

Блок	Период запусков	Запуски спутников				Работают сейчас
		Запущено	Не успешно	Готовится	Запланировано	
I	1978-1985	10	1	0	0	0
II	1989-1990	9	0	0	0	0
IIA	1990-1997	19	0	0	0	11
IIR	1997-2004	12	1	0	0	12
IIR-M	2005-2009	8	0	0	0	7
IIF	2010-2011	2	0	10	0	2
IIIA	2014-?	0	0	0	12	0
Всего		59	2	10	12	31





ИСЗ обращаются в шести различных плоскостях, по 4 аппарата в каждой.

- СРНС имеет собственное системное время, хранимое на борту ИСЗ эталонами частоты. Временные шкалы всех ИСЗ согласованы между собой и синхронизируются системой единого времени.
- Подсистема контроля и управления (наземный командно-измерительный комплекс) осуществляет слежение за ИСЗ и обеспечивает спутники информацией, необходимой для формирования радионавигационных сигналов и навигационных сообщений.
- Навигационная аппаратура потребителей (подсистема аппаратуры потребителей) производит выбор рабочего созвездия ИСЗ, поиск и слежение за сигналами, обработку измеряемых РНП и эфемеридной информации для определения координат и составляющих скорости потребителей.
- В СРНС «Навстар» ИСЗ излучают двоичный ФМан-сигнал, код которого является индивидуальным для каждого ИСЗ. Это позволяет всем ИСЗ работать на общей несущей частоте, не создавая заметных внутрисистемных помех.

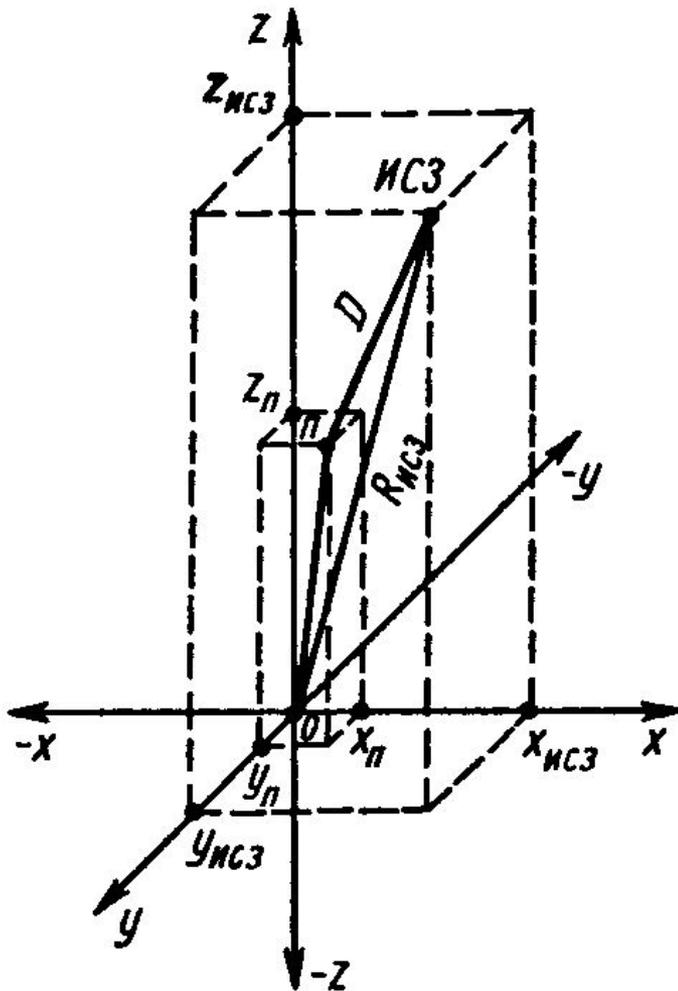
- Измеряемыми РНП служат время запаздывания и доплеровское смещение частоты принимаемого радионавигационного сигнала относительно его образца, формируемого на борту потребителя.
- ФМан-сигнал, имеющий базу ≈ 1000 , излучается на несущей частоте $f_0 \approx 1,5$ ГГц.
- Время запаздывания принятого сигнала относительно шкалы времени потребителя включает начальное расхождение шкал времени потребителя и ИСЗ и задержку распространения сигнала на трассе ИСЗ - потребитель.
- Если фазы опорных генераторов потребителя и ИСЗ совпадают (расхождение шкал времени равно нулю), то измеряемое время запаздывания пропорционально дальности между ИСЗ и потребителем. ЭТОГО НЕТ!
- В противном случае для оценки координат необходимо использовать разностно-дальномерные измерения подобно тому, как это делается в наземных РНС.
- Измерение времени запаздывания принимаемого сигнала производится на основе корреляционного метода. Выходной сигнал коррелятора достигает максимального значения, пропорционального числу элементов кода, когда формируемая копия совпадает по времени и частоте с принимаемым сигналом.

Сегмент наземного комплекса управления системы ГЛОНАСС



Сегмент наземного комплекса управления системы GPS





- Для составления навигационных уравнений удобно использовать систему декартовых координат с началом в центре Земли
- Квадрат расстояния между ИСЗ и П представим в виде

$$D^2 = (x_{\text{ИСЗ}} - x_{\text{П}})^2 + (y_{\text{ИСЗ}} - y_{\text{П}})^2 + (z_{\text{ИСЗ}} - z_{\text{П}})^2$$

- Если бы шкалы времени ИСЗ и потребителя были точно совмещены, то для нахождения координат достаточно было бы измерить три РНП (D_1 , D_2 и D_3) – расстояния до трех ИСЗ, и решить систему из трех уравнений относительно трех координат потребителя.

- При наличии расхождения шкал времени $\Delta t = \text{const}$ измеренная квазидальность включает величину $c\Delta t$, поэтому система уравнений принимает вид

$$(D_i + c\Delta t)^2 = (x_{\text{исз}i} - x_{\text{п}})^2 + (y_{\text{исз}i} - y_{\text{п}})^2 + (z_{\text{исз}i} - z_{\text{п}})^2$$

- Это система 4x4 с неизвестными: Δt и координаты П.
- СРНС позволяет также измерить три составляющие скорости потребителя на базе доплеровского смещения частоты принимаемого сигнала.
- В настоящее время точность определения координат системой ГЛОНАСС несколько отстаёт от показателей для GPS.
- На сентябрь 2012 года ошибки навигационных определений ГЛОНАСС (при $p=0,95$) по долготе и широте составляли 3-6 м при использовании в среднем 7-8 ИСЗ В то же время ошибки GPS составляли 2-4 м при использовании в среднем 6-11 ИСЗ.
- При совместном использовании обеих навигационных систем ошибки составляют 2-3 м при использовании в среднем 14-19 ИСЗ.

Дифференциальный режим

- СРНС позволяют потребителю получить координаты с точностью порядка 10-15 м. Однако для многих задач, особенно для навигации в городах, требуется большая точность.
- Дифференциальный режим DGPS (Differential GPS) позволяет установить координаты с точностью до 3 м в динамической навигационной обстановке и до 1 м - в стационарных условиях.
- Дифференциальный режим реализуется с помощью контрольного GPS-приемника, называемого опорной станцией. Она располагается в пункте с известными координатами, в том же районе, что и основной GPS-приемник. Сравнивая известные координаты (полученные в результате прецизионной геодезической съемки) с измеренными, опорная станция вычисляет поправки, которые передаются потребителям по радиоканалу.
- Аппаратура потребителя принимает от опорной станции поправки и учитывает их при определении местонахождения потребителя.
- Результаты, полученные с помощью дифференциального метода, зависят от расстояния между объектом и опорной станцией. Опорную станцию рекомендуется располагать не далее 500 км от объекта. Применение этого метода наиболее эффективно, когда преобладающими являются систематические ошибки, обусловленные причинами.

Параметры систем GPS, ГЛОНАСС и Галилео

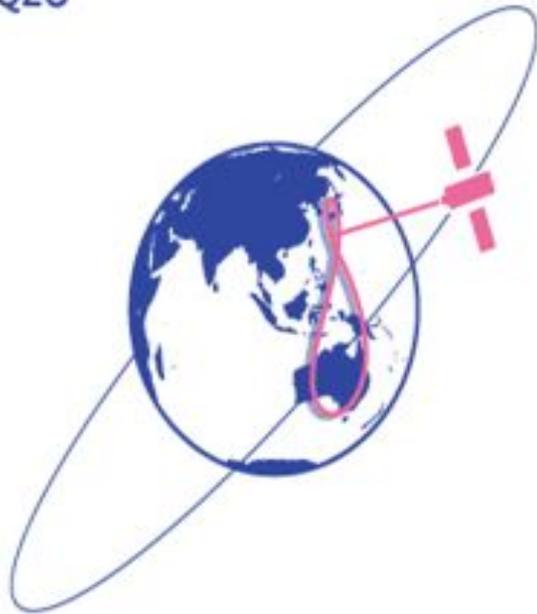
Тип системы	<i>ГЛОНАСС</i>	<i>GPS</i>	<i>Галилео</i>
Число ИСЗ в системе (резерв)	24 (3)	24 (7)	24 (6)
Число орбит	3 (через 120°)	6 (через 60°)	3 (через 120°)
Число ИСЗ на орбите	8	4	9
Тип орбиты	Круговая	Круговая	Круговая
Высота орбиты	19 100 км	20 145 км	23 222 км
Наклонение орбиты	64,8°	55°	56°
Период обращения	11 ч 15 мин 44 с	11 ч 57 мин 58,3 с	14 ч 4 мин 45 с
Система отсчета времени	UTC (SU)	UTC (USNO)	UTS (GST)
Разделение сигналов	FDMA	CDMA	CDMA
Несущие частоты, МГц	L1=1602.5625...1615.5 L2=1246.4375...1256.5	L1=1575.42 L2=1227.60 L5=1176.45	E1=1575.42 E5=1191.795 E5A=1176.46 E5B=1207.14 E6=1278.75



Зона покрытия Бэйдоу

5 КА на геостационарной орбите (ГСО)	точки	58,75° в.д., 80° в.д., 110,5° в.д., 140° в.д., 160° в.д.
	высота	35 786 км
27 КА на средних круговых орбитах	количество плоскостей	3
	наклонение	55°
	высота	21 528 км
	период	12 ч 53 мин 24 с
3 КА на наклонной геосинхронной орбите (ГСНО)	пересечение экватора подспутниковой трассой в точке 118° в.д.	
	наклонение	55°
	высота	35 786 км
Несущие частоты, МГц	B1=1 575,42; B2=1 191,79; B3=1 268,52	

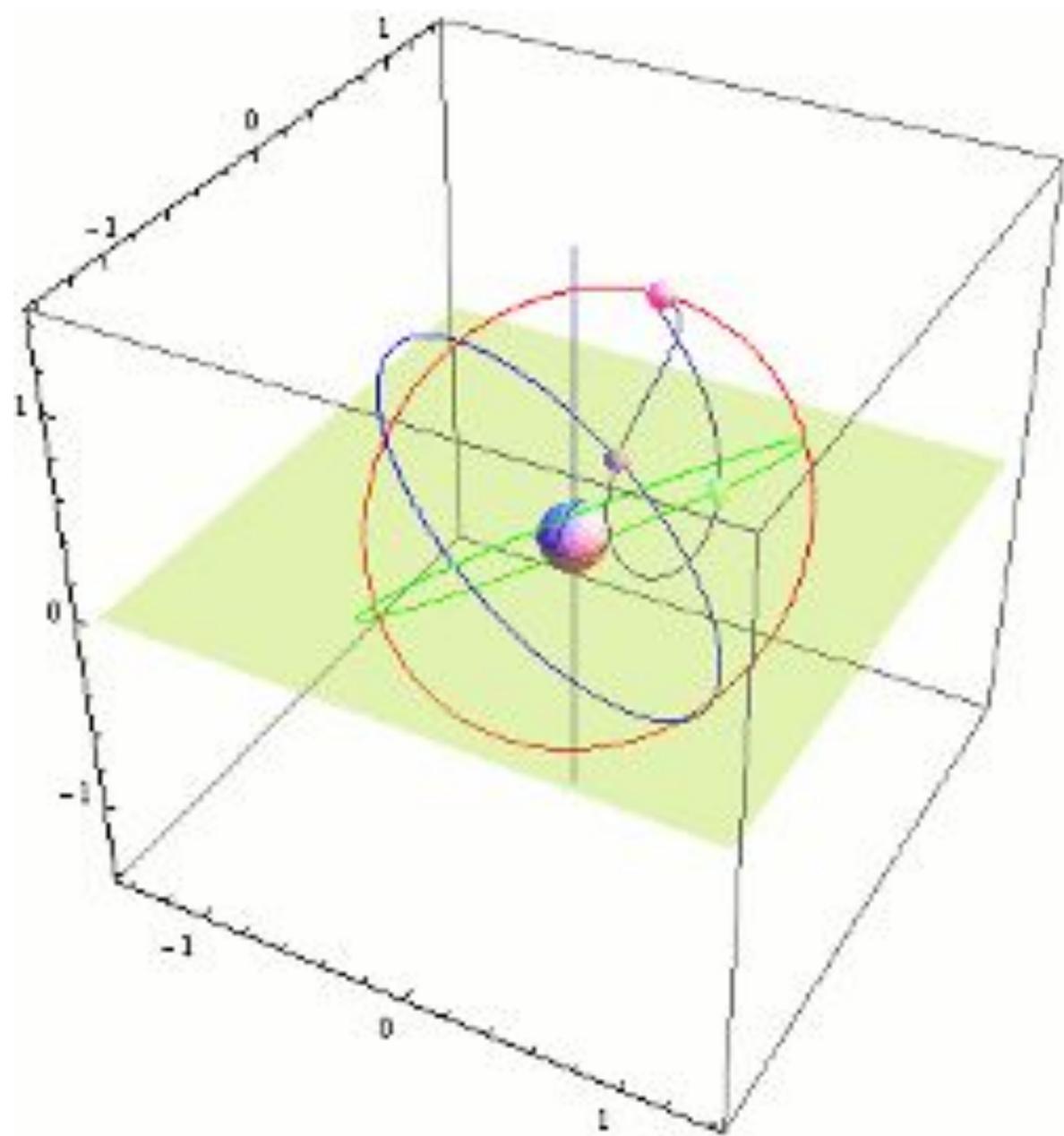
QZO



5 КА на квазизенитной орбите	большая полуось	42 164 км
	высота перигея	≈ 32 000 км
	высота апогея	≈ 40 000 км
	наклонение	40°...47°
	количество плоскостей	3
2 КА на геостационарной орбите		
Несущие частоты, МГц	E1=1 575,42; L2=1 227,6; L5=1 176,45; E6=1 278,75	

Орбита и зона покрытия QZSS

Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), «Квазизенитная спутниковая система» — проект региональной системы синхронизации времени и одна из [систем дифференциальной коррекции](#) (QZSS), «Квазизенитная спутниковая система» — проект региональной системы синхронизации времени и одна из систем дифференциальной коррекции для [GPS](#) (QZSS), «Квазизенитная спутниковая система» — проект региональной системы синхронизации времени и одна из систем дифференциальной коррекции для GPS, сигналы которой будут доступны в [Японии](#). Первый спутник был запущен 11 сентября 2010 года QZSS предоставляет ограниченную точность позиционирования и по существующей спецификации не работает в автономном режиме. Система позиционирования QZSS может работать совместно с геостационарными спутниками в японской системе MTSAT, находящейся в процессе создания.





4 КА на геосинхронной орбите	количество плоскостей	2
	наклонение	29°
	пересечение экваториальной плоскости	55° и 111,5° в. д.
3 КА на геостационарной орбите	34°, 83° и 131,5° в. д.	
Несущие частоты, МГц	L5=1 176,45; S= 2 492,028	

Зона покрытия IRNSS

Если орбита имеет отличное от нуля наклонение и нулевой эксцентриситет, то при наблюдении с Земли спутник в течение суток описывает на небе восьмёрку. Если же наклонение и эксцентриситет отличны от нуля, то восьмёрка может, в зависимости от конкретных величин наклонения и эксцентриситета вырождаться в эллипс (спутники серии Canopus) или в отрезок прямой, лежащий в плоскости экватора