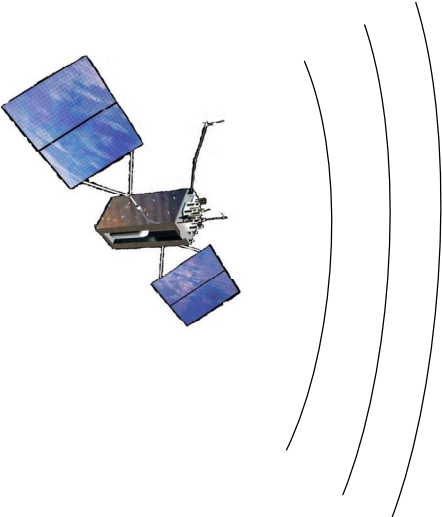


Лекция 5. Радиосигналы и методы определения дальности в радионавигации

- Общий вид радиосигнала, излучаемого из опорной точки:


$$s_0(t) = A_0 h_M(t) \cos \left(\omega_0 t + \int_{t_0}^t \omega_M(v) dv + \varphi_M(t) + \varphi_0 \right)$$

A_0, ω_0, φ_0 – амплитуда, несущая частота и начальная фаза

$h_M(t)$ – закон амплитудной модуляции

$\omega_M(t)$ – закон частотной модуляции

$\varphi_M(t)$ – закон фазовой модуляции

Поддиапазоны несущих частот

| Диапазон длин радиоволн | Условное обозначение частот | Частоты |
|-------------------------|------------------------------|-----------------|
| Мириаметровые | Очень низкие частоты (ОНЧ) | 3 — 30 кГц |
| Километровые | Низкие частоты (НЧ) | 30 — 300 кГц |
| Гекаметровые | Средние частоты (СЧ) | 300 кГц — 3 МГц |
| Декаметровые | Высокие частоты (ВЧ) | 3 — 30 МГц |
| Метровые | Очень высокие частоты (ОВЧ) | 30 — 300 МГц |
| Дециметровые | Ультравысокие частоты (УВЧ) | 300 МГц — 3 ГГц |
| Сантиметровые | Сверхвысокие частоты (СВЧ) | 3 — 30 ГГц |
| Миллиметровые | Крайне высокие частоты (КВЧ) | 30 — 300 ГГц |

Модель наблюдений радионавигационного сигнала

$$y(t) = s(t) + n(t)$$

$$s(t) = Ah_M(t - \tau) \cos \left(\omega_0(t - \tau) + \int_{t_0}^{t - \tau} \omega_M(v) dv + \varphi_M(t - \tau) + \varphi_0 + \tilde{\varphi} \right)$$

$\tau(t)$ - задержка радиосигнала

$\tilde{\varphi}$ - набег фазы, вызванный влиянием среды распространения

$n(t)$ - внутренний шум приемника с корреляционной функцией:

$$R(v) = M[n(t)n(t+v)] = \frac{N_0}{2} \delta(v), \quad N_0 = kT \cdot Kш$$

($k = 1.38 \cdot 10^{23}$ - постоянная Больцмана, T - температура, $Kш$ - коэффициент шума)

* В модели не учтены искажения формы радиосигнала

Характеристики радионавигационных сигналов

$$E = \int_0^T s^2(t) dt - \text{энергия радиосигнала на интервале наблюдения } 0 \dots T$$

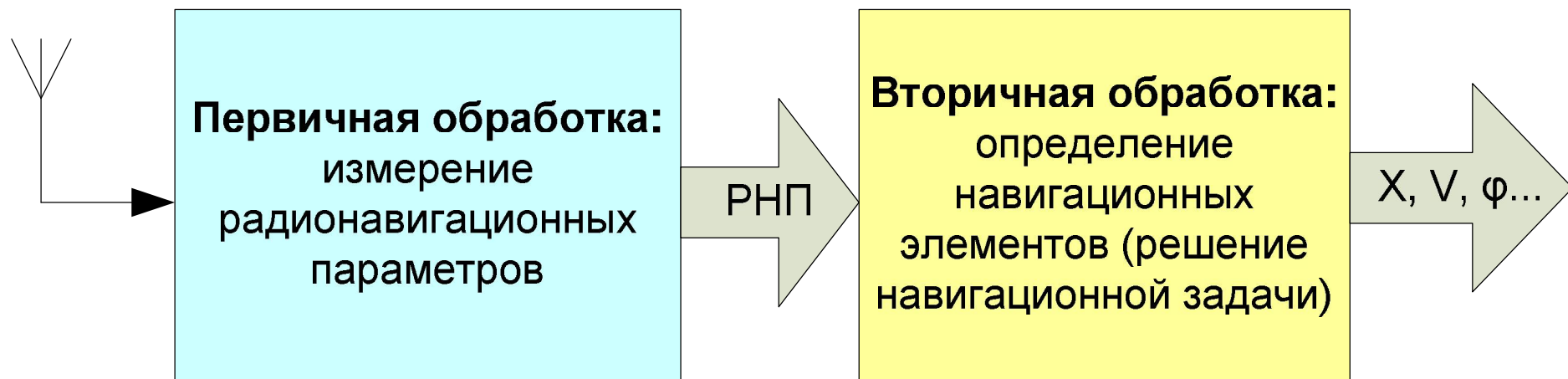
$$\dot{S}(f) = \int_0^T s(t) e^{-i2\pi ft} dt - \text{спектральная плотность радиосигнала}$$

$$\beta = \left[\frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} (2\pi f)^2 |\dot{S}(f)|^2 df \right]^{1/2} - \text{эффективная ширина спектра}$$

$$\alpha = \left[\frac{1}{E} \int_0^T (2\pi t)^2 s^2(t) dt \right]^{1/2} - \text{эффективная длительность}$$

отношение сигнал/шум: $q = E/N_0$

Первичная и вторичная обработка радионавигационных сигналов



Ошибки оценивания радионавигационных параметров

| Параметр | Пропорциональность среднеквадратической ошибки |
|----------------------|--|
| Задержка огибающей | $\sim \frac{1}{q\beta}$ |
| Фазовая задержка | $\sim \frac{1}{q\omega_0}$ |
| Фаза | $\sim \frac{1}{q}$ |
| Доплеровская частота | $\sim \frac{1}{q\alpha}$ |

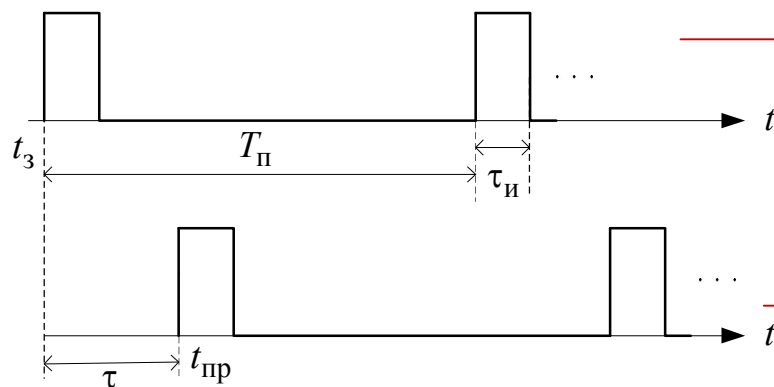
- В условиях наблюдения радионавигационного сигнала на фоне белого гауссовского шума

Временной метод определения дальности

Временной метод основан на непосредственном измерении времени запаздывания огибающей радиосигнала, возникающего при его распространении от источника излучения до приемника.

используются широкополосные радиосигналы с периодическими видами модуляции, например:

- импульсные (РСБН, VOR/DME)
- фазоманипулированные (Все СРНС, Locata)



$$s_0(t) = A_0 h_M(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \text{ - излучаемый сигнал}$$

$$s(t) = A h_M(t - \tau) \cos(\omega_0 t + \varphi) \text{ - принимаемый сигнал}$$

$$\tau = 2R/c \Rightarrow R = c\tau / 2$$

Ограничения временного метода в запросной импульсной системе

* Дальность ограничена периодом излучения импульсов:

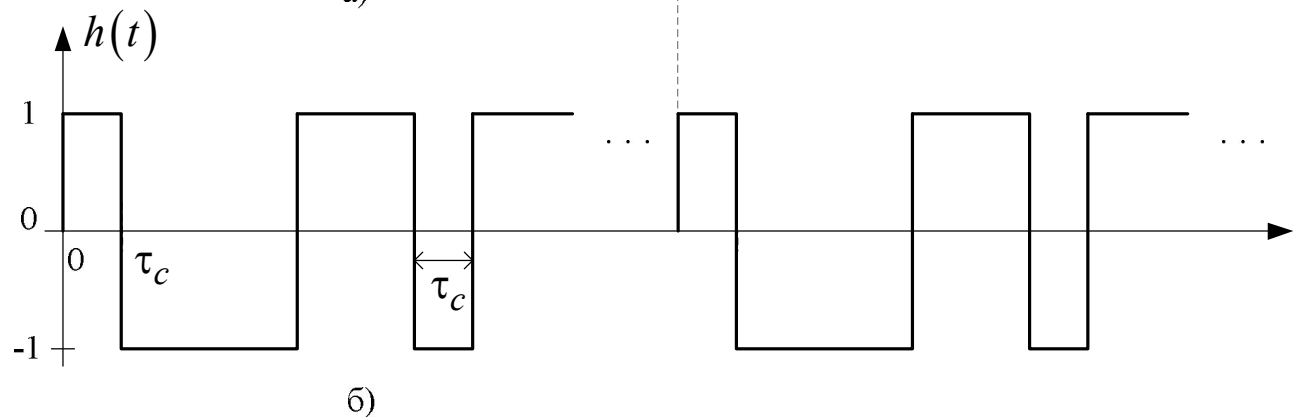
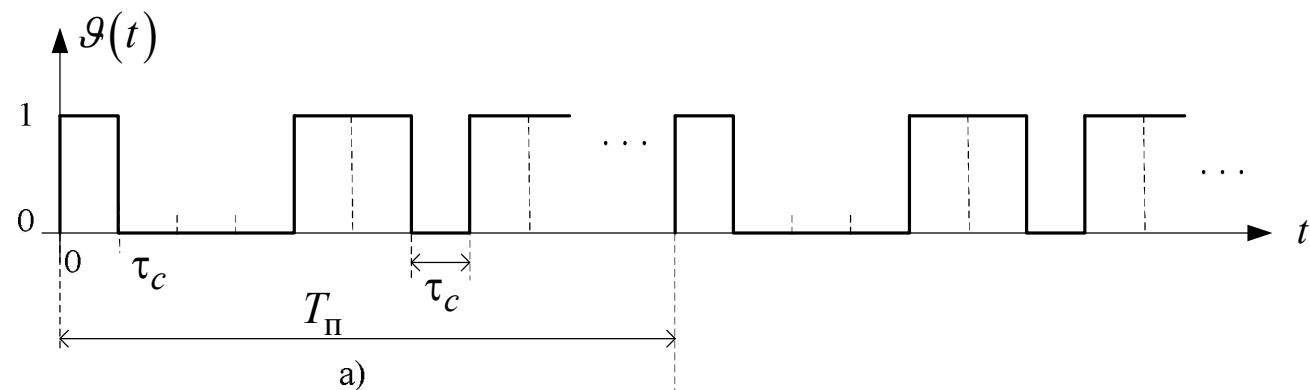
$$R < \frac{T_{\text{п}}c}{2} \equiv R_{\text{max}}$$

* Разрешающая способность по дальности ограничена длительностью импульса:

$$\Delta R_{\text{min}} = c\tau_{\text{и}}/2$$

Вывод: необходимо применять сигналы с короткими импульсами и большим периодом. Но это снижает энергетику сигналов. Поэтому применяют непрерывные фазоманипулированные сигналы из множества коротких смежных импульсов.

Фазоманипулированные сигналы для определения псевдодалльности по огибающей



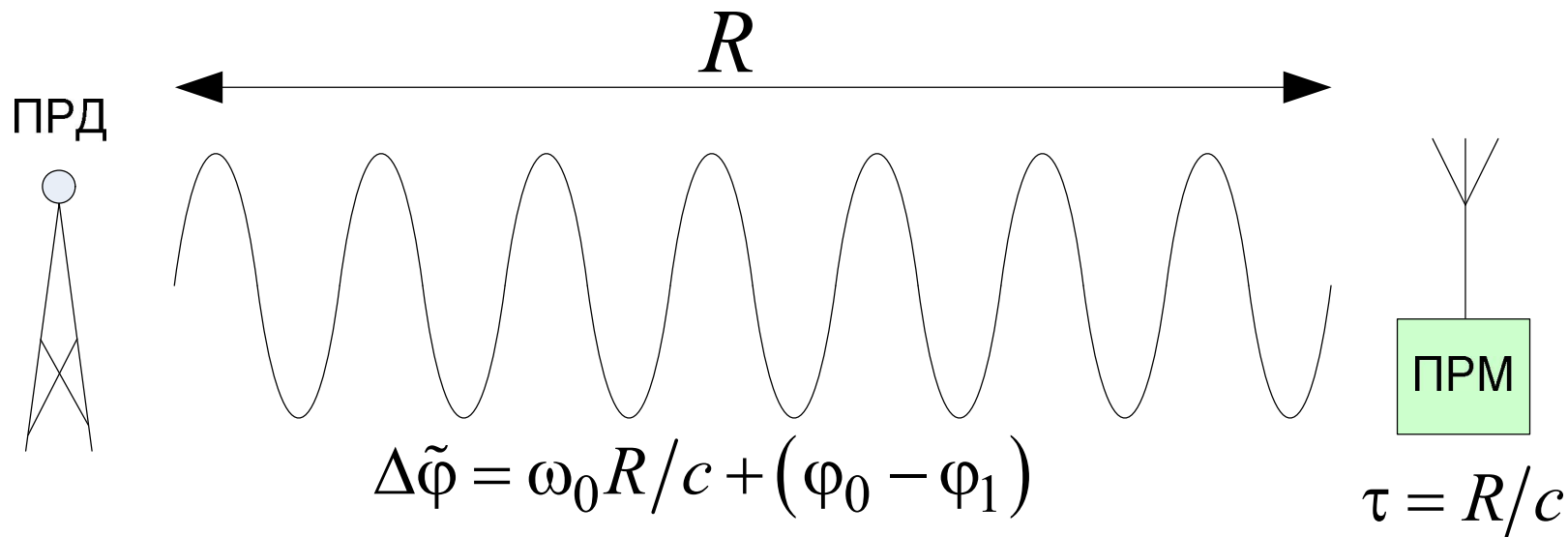
Такие сигналы
используются в
СРНС и Locata!

$$s(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi \mathcal{G}(t)) = -Ah(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

Фазовый метод определения дальности

Фазовый метод основан на измерении фазового запаздывания радиосигнала, возникающего при его распространении от источника излучения до приемника.

Фазовый метод используют в системах Logan-C, Чайка, Omega, Альфа.



$s_0(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ - излучаемый радиосигнал

$s(t) = A \cos(\omega_0(t - \tau) + \varphi_1)$ - принимаемый радиосигнал

Неоднозначность определений дальности фазовым методом

Информация о дальности содержится в разности фаз излученного и принятого сигнала:

$$\Delta\tilde{\varphi} = \omega_0 R/c + (\varphi_0 - \varphi_1)$$

$(\varphi_0 - \varphi_1)$ - мешающее слагаемое, которое д.б. скомпенсировано

Ограничение однозначного определения дальности:

$$\Delta\varphi = \omega_0 R/c = 2\pi R/\lambda_0 \leq 2\pi \quad \Rightarrow \quad R \leq \lambda_0$$

Как правило, фазовый метод не позволяет определить дальность однозначно!

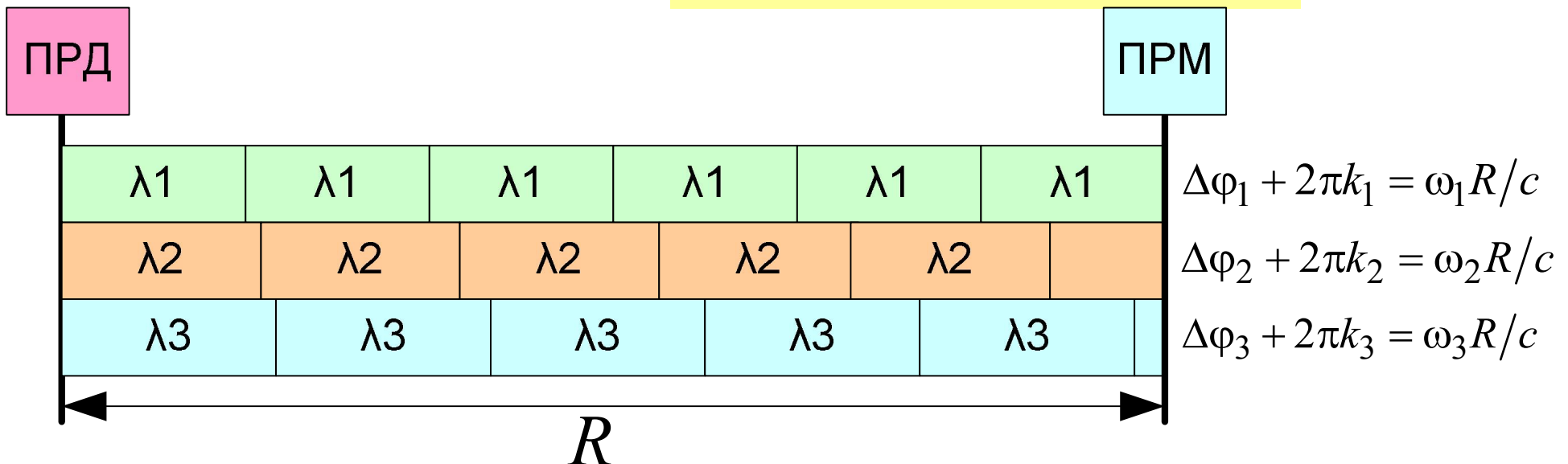
$$\Delta\varphi + 2\pi k = 2\pi R/\lambda_0, \quad \Delta\varphi \in [0, 2\pi],$$

k - число периодов фазовой неоднозначности

Примеры устранения неоднозначности фазовых измерений

1. Использование многочастотных сигналов (нониусный метод):

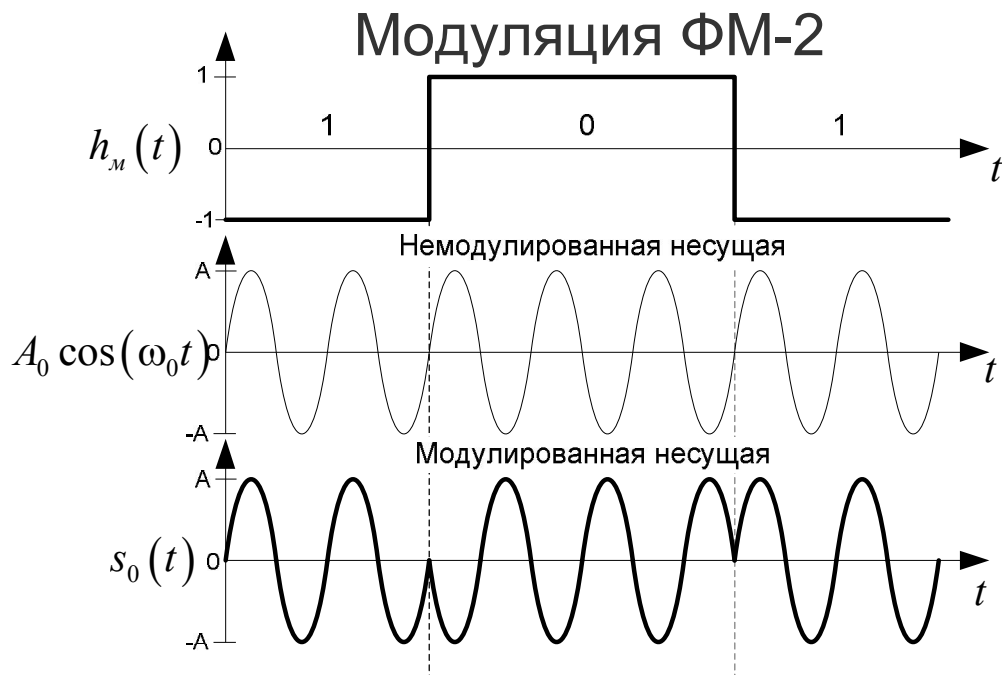
$$s_0(t) = A_0 \sum_{i=1}^m \cos(\omega_i t + \varphi_0)$$



Примеры устранения неоднозначности фазовых измерений

2. Модуляция сигнала низкочастотной огибающей:

$$s_0(t) = A_0 h_m(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$



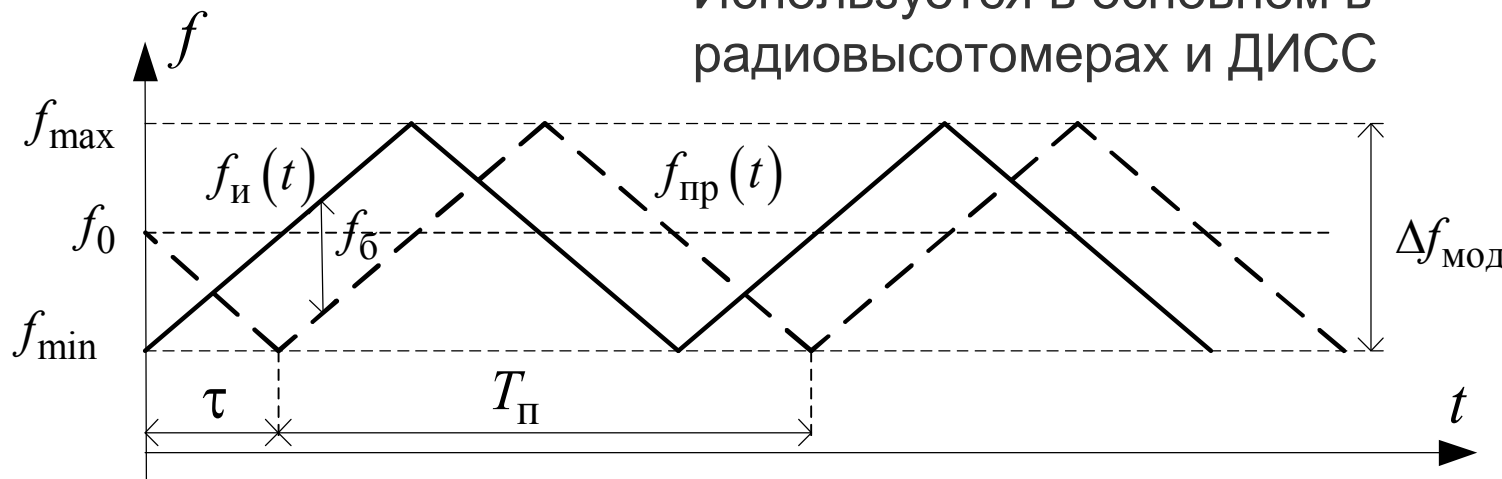
Грубая оценка дальности производится по задержке огибающей, а точная – по фазе. Фазовая неоднозначность оказывается в пределах погрешности грубой дальности:

$$2\pi(\Delta k) \leq |\Delta\tau \cdot \omega_0|$$

Частотный метод определения дальности

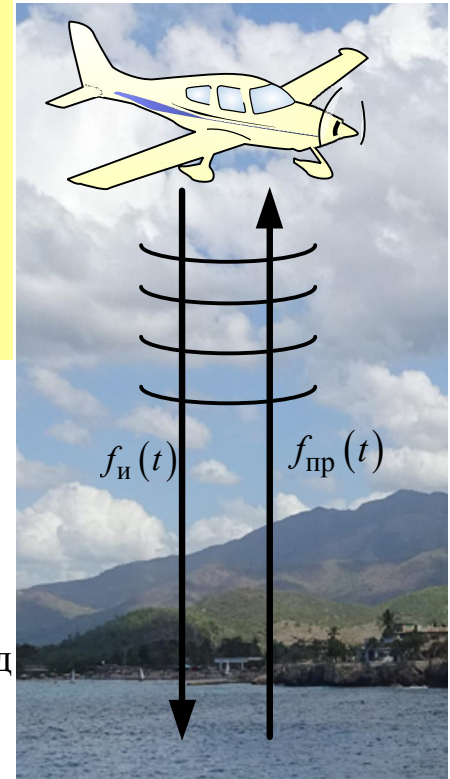
...основан на излучении непрерывного частотно-модулированного радиосигнала и измерении разности частот между излученным и принятым радиосигналами.

Используется в основном в радиовысотомерах и ДИСС

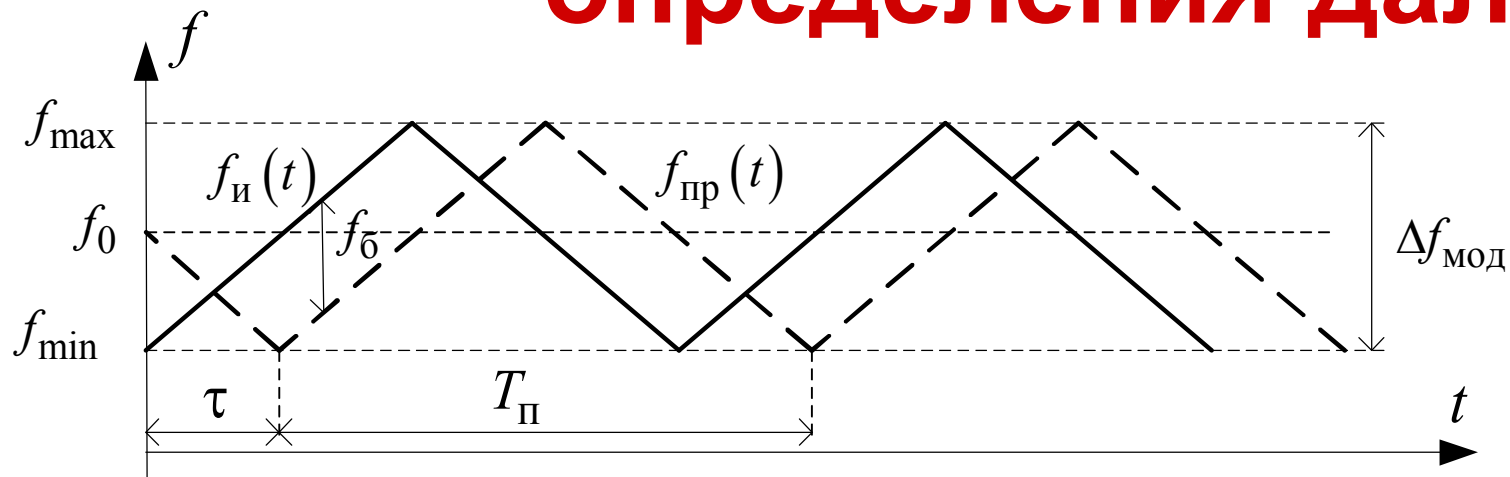


$$f_{\text{И}}(t) = f_0 \pm \beta t = f_0 \pm \frac{\Delta f_{\text{МОД}}}{T_{\Pi}} t - \text{частота излученного сигнала}$$

$$\text{где } \Delta f_{\text{МОД}} = f_{\max} - f_{\min}$$



Частотный метод определения дальности



$$f_{\text{пр}}(t) = f_0 \pm \beta(t - \tau) = f_0 \pm \frac{\Delta f_{\text{мод}}}{T_{\Pi}} \left(t - \frac{2R}{c} \right) - \text{частота принятого сигнала}$$

$$\text{измеряется: } f_{\delta} = f_{\text{и}}(t) - f_{\text{пр}}(t) = \beta\tau = \frac{2R\Delta f_{\text{мод}}}{T_{\Pi}c} - \text{разность частот принятого}$$

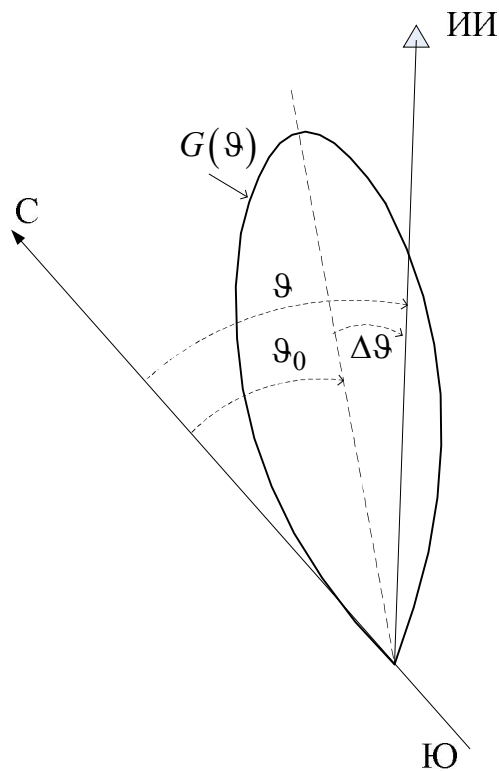
и отраженного сигналов, из которой находим дальность (высоту):

$$R = \frac{f_{\delta} T_{\Pi} c}{2\Delta f_{\text{мод}}}$$

$$R = T_{\Pi} c / 2 - \text{максимальная однозначно определяемая дальность}$$

Методы определения угловых параметров. Амплитудный метод.

Амплитудные методы основаны на том, что информация об определяемом угле в навигационном параметре связывается с амплитудой принимаемого радиосигнала.



Метод максимума:

$$u_m(t) = U_m G(\vartheta - \Omega t)$$

Ω - частота вращения антенны

С-Ю - опорное направление

ИИ - источник излучения

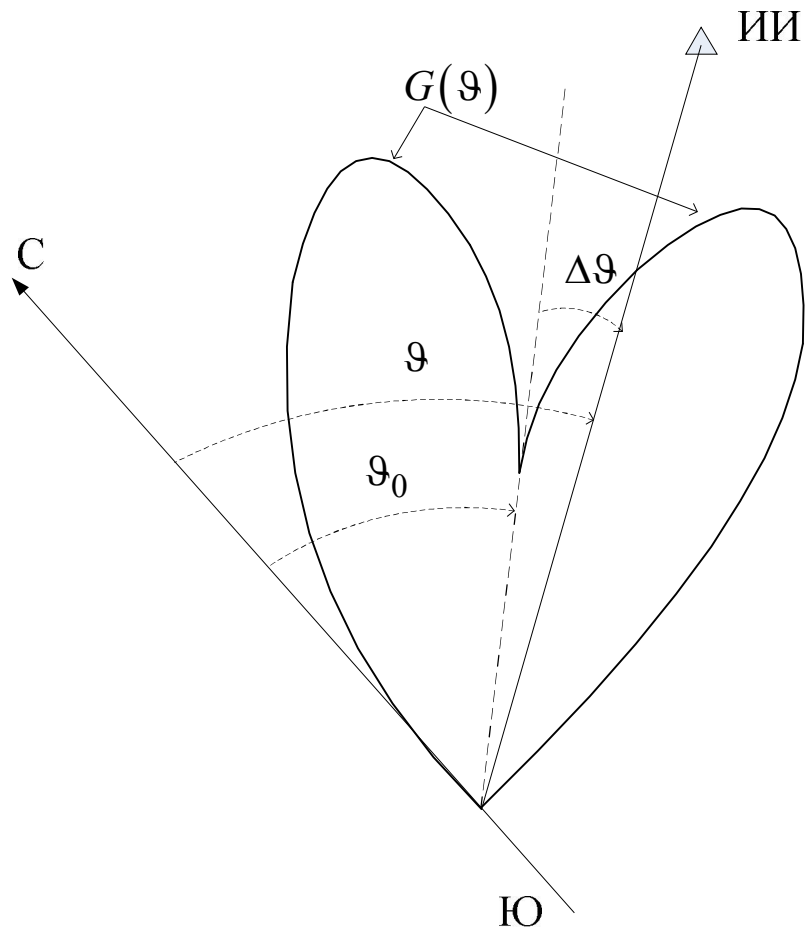
ϑ_0 - угол между опорным направлением и максимумом ДН

$\Delta\vartheta$ - угол между максимумом ДН и направлением на ИИ

Достоинства ММ – простота и дальность действия

Недостаток ММ – низкая угловая разреш. способность

Амплитудные методы определения угловых параметров. Метод минимума.



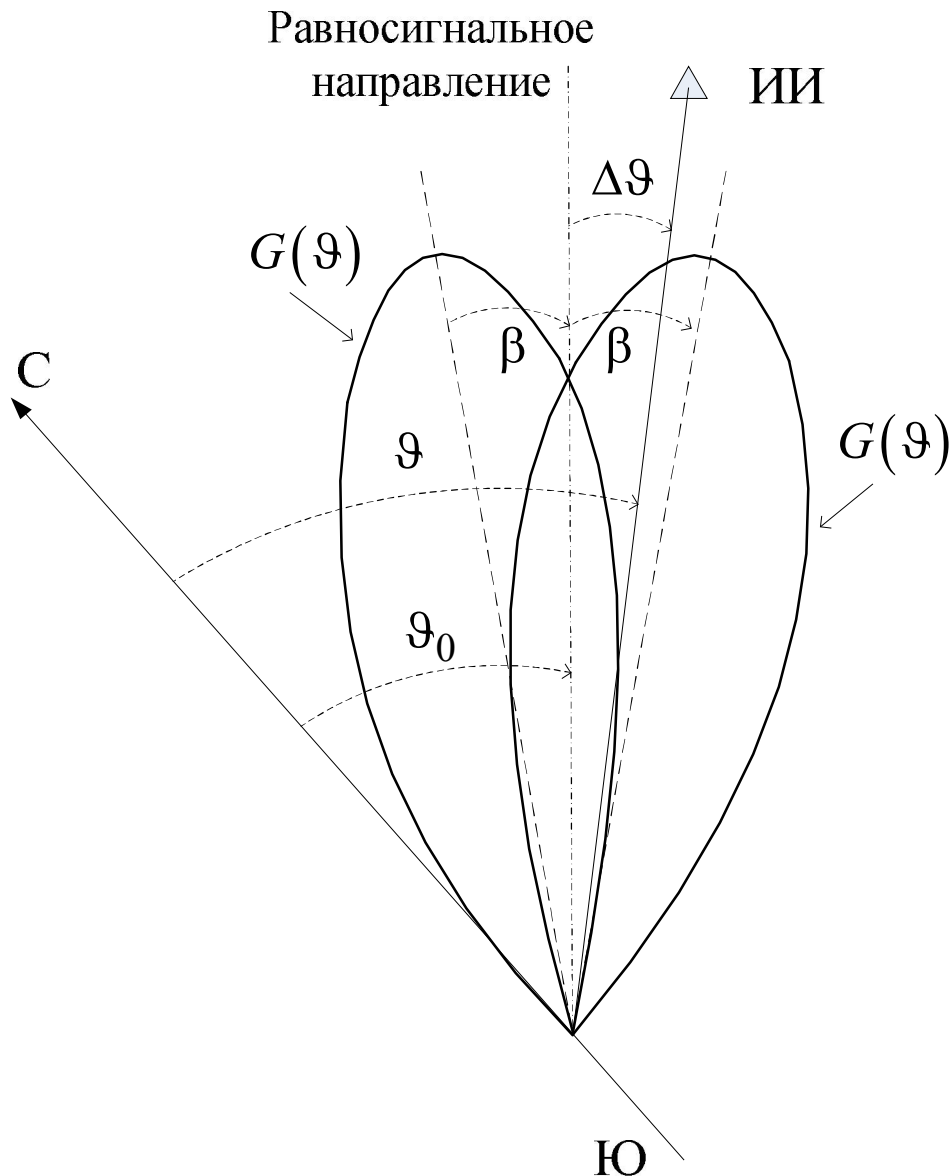
Достоинство – высокая угловая разрешающая способность

Недостатки:

- сложность формирования многолепестковой ДН
- снижение дальности действия из-за снижения отношения $c/\text{ш}$ в минимуме ДН

Амплитудные методы определения угловых параметров.

Метод сравнения.



$$U_p(\theta) = U_m (G(\beta + \Delta\theta) - G(\beta - \Delta\theta))$$

- сигнал на выходе РПУ

Достоинства:

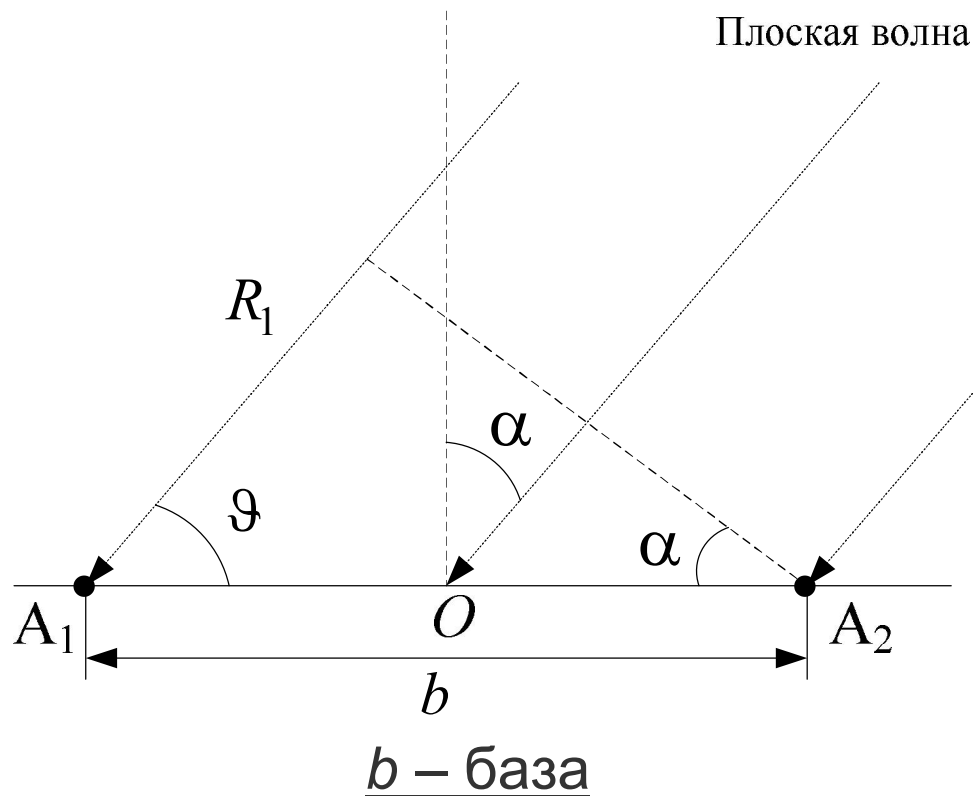
– высокая угловая разрешающая способность

- высокая дальность действия из-за работы в районе максимума ДН

Недостаток: фазовым методом можно точнее

Фазовые методы определения угловых параметров

Подход: использование разнесенных в пространстве неподвижных антенн



Измеряется разность фаз радиосигнала в точках A_1 и A_2 $\Delta\varphi$

$$\sin(\alpha) = \frac{c\Delta\varphi}{2\pi f_0 b} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi b/\lambda}$$

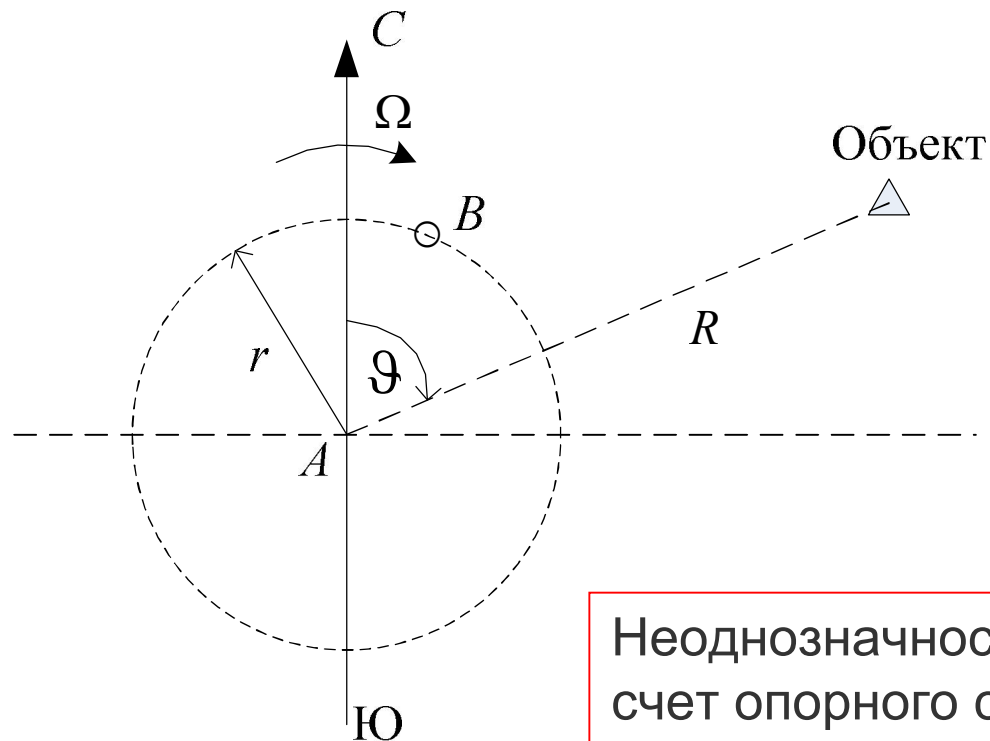
Погрешность метода:

$$\sin(\delta\alpha) = \frac{\delta\varphi}{2\pi b/\lambda}$$

Проблема метода: фазовая неоднозначность

Фазовые методы определения угловых параметров

Подход: использование вращающейся по окружности ненаправленной антенны



Излучаемые сигналы:

$$s_B(t) = A_0 \cos(\omega_0 t)$$

$$s_A(t) = A_0 h_m(t) \cos(\omega_0 t)$$

Принимаемый от ант. B сигнал:

$$s(t) = A \cos(\omega_0 (t - \tau(t)))$$

$$\tau(t) \approx c [R - r \cos(\Omega t - \vartheta)] \text{ при } R \gg r$$

Требуется найти ϑ

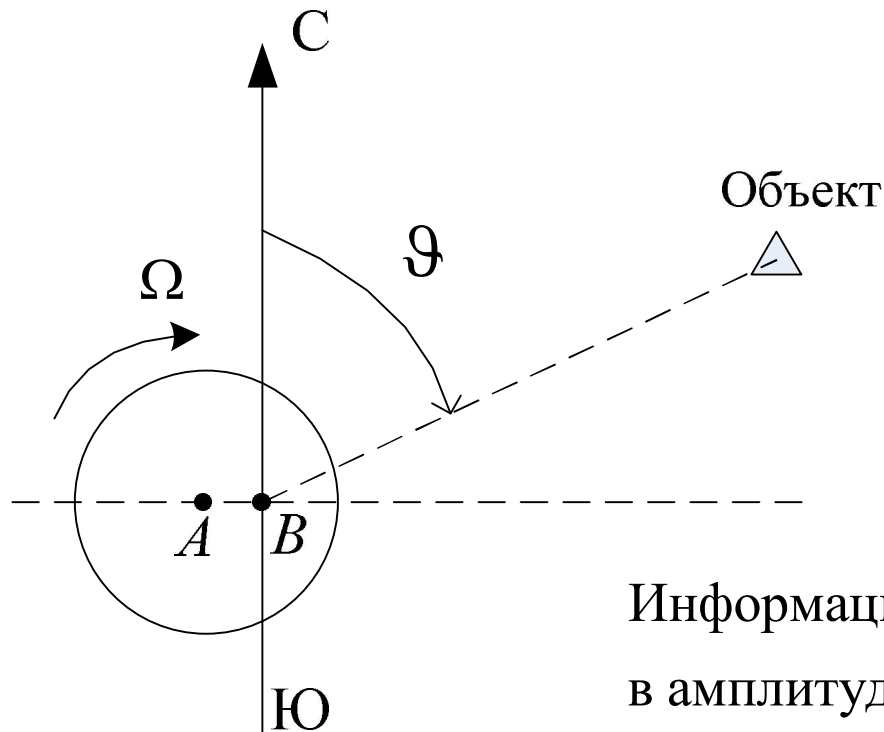
Неоднозначность начальной фазы разрешается за счет опорного сигнала от антенны A

Информация о направлении на объект заложена в фазе сигнала от антенны B :

$$s(t) = A \cos\left(\omega_0 t - \frac{R\omega_0}{c} + \frac{r\omega_0}{c} \cos(\Omega t - \vartheta)\right)$$

Фазовые методы определения угловых параметров

Подход: использование вращающейся по окружности направленной антенны



Излучаемый сигнал:

$$s_A(t) = A_0 \cos(\omega_0 t)$$

Принимаемый от ант. A сигнал:

$$s(t) = A(t) \cos(\omega_0 (t - \tau(t)))$$

$$\tau(t) \approx c \left[R - r \cos(\Omega t - \vartheta) \right] \text{ при } R \gg r$$

Требуется найти ϑ

Информация о направлении на объект ϑ заложена в амплитуде и фазе сигнала:

$$s(t) = A(t) \cos \left(\omega_0 t - \frac{R\omega_0}{c} + \frac{r\omega_0}{c} \cos(\Omega t - \vartheta) \right)$$

$$A(t) = \max \text{ при } \vartheta = \Omega t$$

Неоднозначность начальной фазы разрешается за счет АМ