

# Методы обзора пространства и измерения координат

Теория и применение в радиолокации

## Методы измерения координат

$$\tau = \frac{2R}{c}$$

Определение дальности по задержке

Методы измерения дальности:

- Фазовый
- Частотный
- Импульсный (временной)

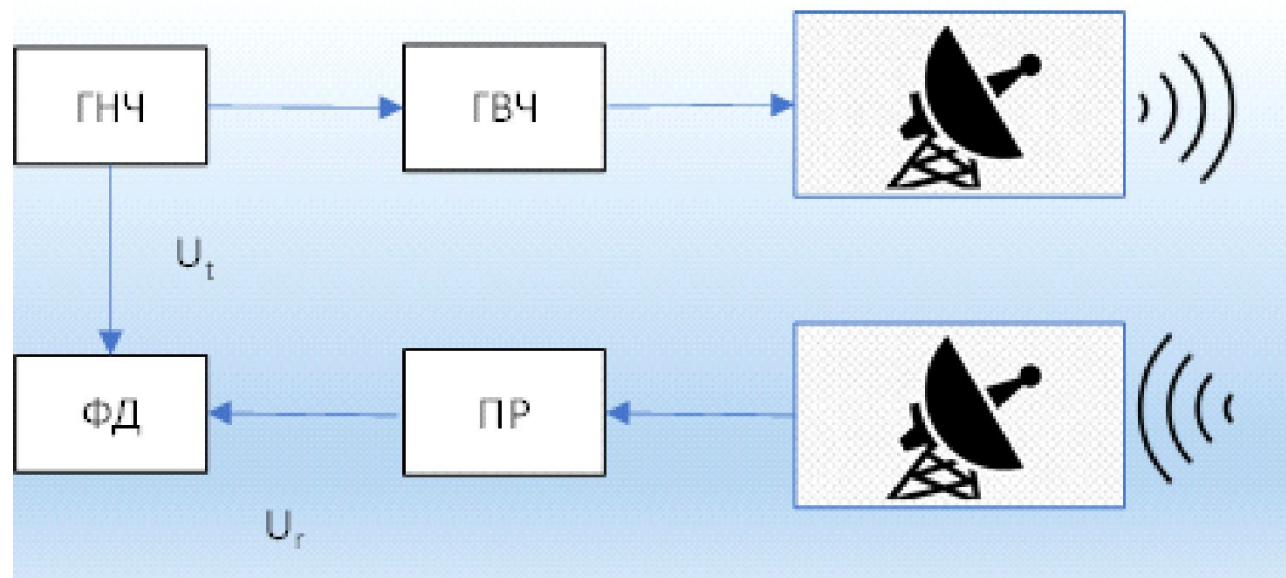
### Фазовый метод

$$\varphi_d = \omega_m t_d$$

Фазовый сдвиг

$$R = \frac{c\varphi_d}{2\omega_m}$$

дальность



$$\Delta\varphi = \varphi_d + \varphi_{eq} + \varphi_t$$

Разность фаз  $U_1, U_2$

Фаза цели

Сдвиг фазы в аппаратуре

$$\varphi_d = \Delta\varphi - \varphi_{eq} - \varphi_t$$

$$R_{\max} \leq \frac{\lambda}{2}$$

Измерение на несущей

$$\omega_1, \omega_2 : \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$$

Измерение на частоте биений

$$\Delta\omega \leq \frac{\pi c}{R_{\max}}, \omega_m \leq \frac{\pi c}{R_{\max}}$$

Выбор НЧ или частоты биений

$$\Delta\omega_1, \dots, \Delta\omega_n$$

Многошкальная система

Преимущества и недостатки фазовых дальномеров:

- Возможно очень точное измерение дальности (например, в лазерных дальномерах).
- Отсутствие мертвой зоны приема сигналов.
- Разделение прямого и отраженного сигнала возможно только для движущихся объектов.
- Не обладают разрешением по дальности.
- Необходимо исключать неоднозначность по дальности.

### Частотный метод

$$\gamma = \frac{df}{dt}$$

*Скорость изменения частоты*

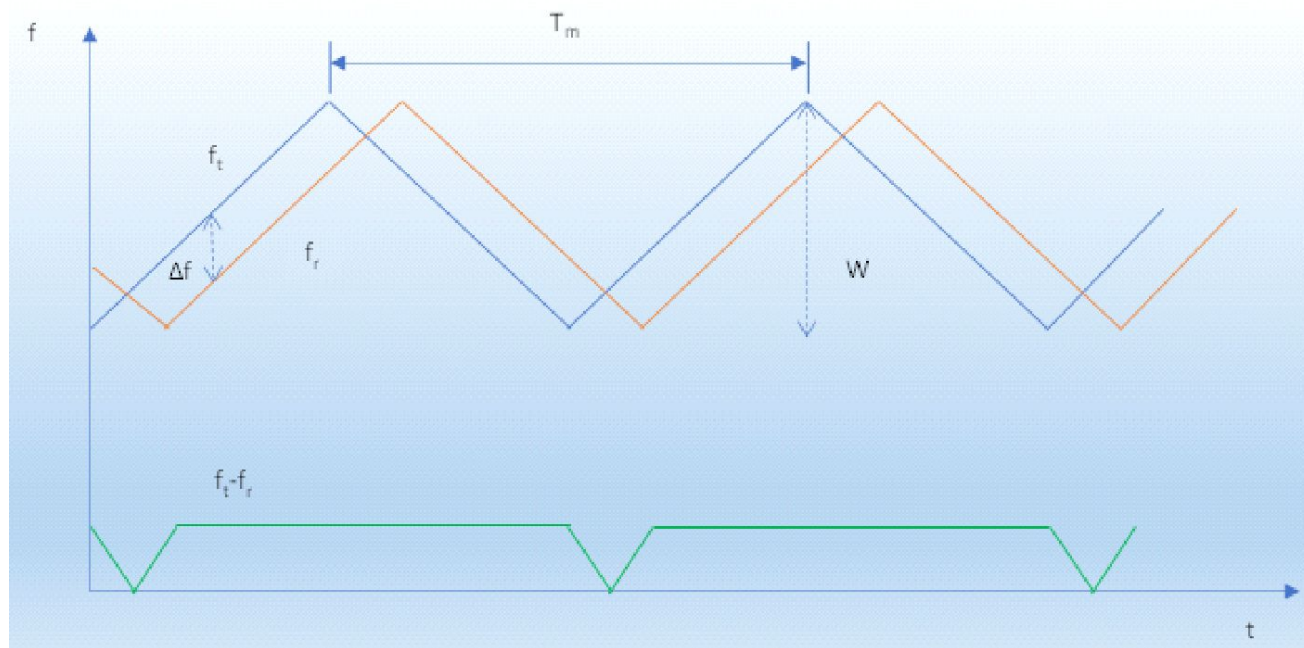
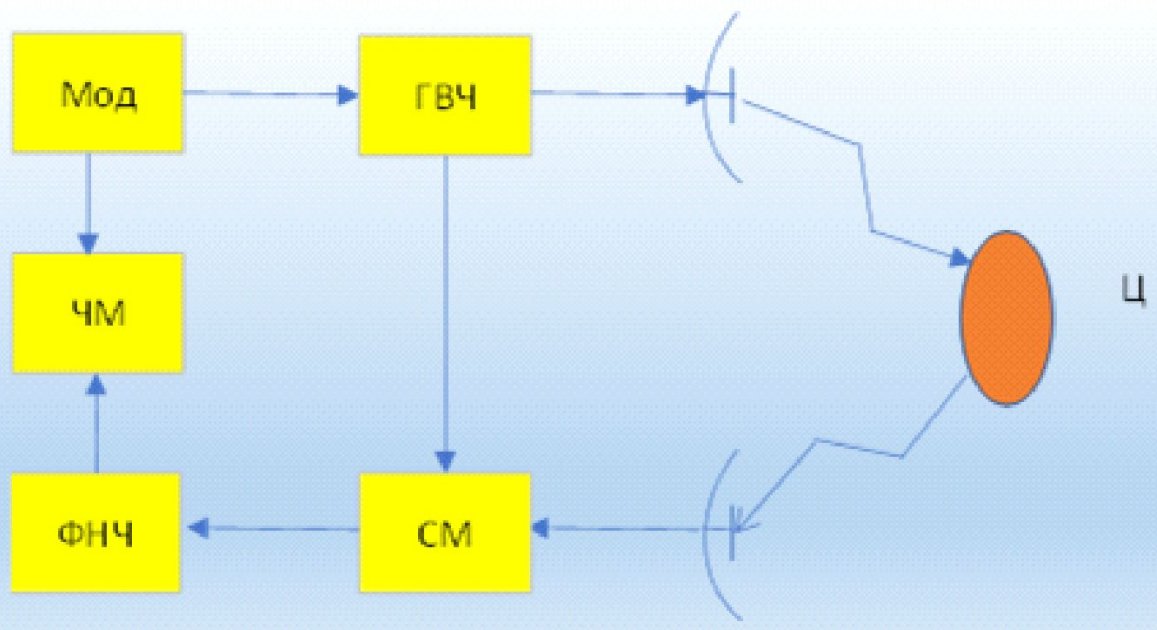
$$\Delta f = \gamma \tau$$

*Приращение частоты за время*

$$\tau = \frac{2R}{c}$$

$$R = \frac{c\Delta f}{2\gamma}$$

Дальность до цели



$$\Delta f \propto F_m = \frac{1}{T_m}$$

$$f_t = f_0 + \gamma t = f_0 + \frac{2W}{T_m} t$$
$$f_r = f_0 + \gamma (t - \tau) = f_0 + \frac{2W}{T_m} \left( t - \frac{2R}{c} \right)$$
$$\Delta f = f_t - f_r = \frac{4WR}{cT_m}$$

$$\overline{\Delta f} = \frac{4WR}{cT_m} \left( \frac{T_m - \tau}{T_m} \right)$$

Средняя частота биений за период модуляции

$$\tau \propto T_m$$

$$\overline{\Delta f} \approx \Delta f$$

$$R = \frac{c\Delta f}{4WF_m}$$

Дальность до цели

К достоинствам такого метода относятся:

- Использование передатчика с малой мощностью излучения, т.к. это непрерывный режим;
- Возможность измерение малых дальностей, поскольку здесь нет мертвой зоны;
- Кроме измерения дальности можно измерить скорость объекта.
- Есть разрешение по дальности.

Недостатки:

- Необходимо иметь две антенны;
- Высокие требования к линейности ЛЧМ сигнала;
- Сложность реализации фильтров и многоканальной обработки сигналов.

## Импульсный метод

$$R = \frac{ct}{2}$$

*Определение дальности*

Достоинства:

- При импульсной РЛС используется одна антенна;
- Можно измерять дальность одновременно нескольких целей;
- Простота разделения прямых и отраженных сигналов;

К недостаткам относятся:

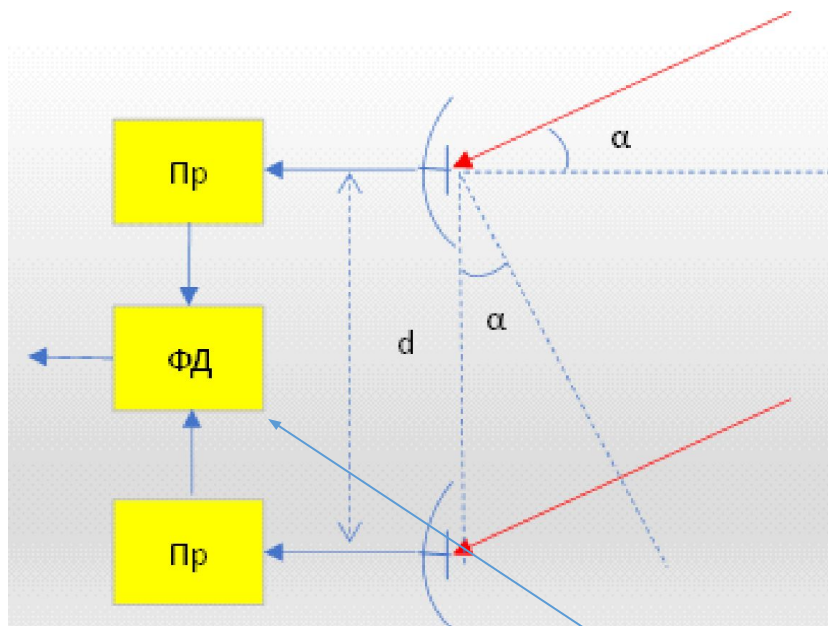
- Работа в импульсном режиме требует больших импульсных мощностей передатчика, это может вызвать пробой;
- Наличие "мертвой" зоны РЛС.
- Сложность обнаружения движущихся целей на фоне отражений от неподвижных объектов и неоднозначность измерения радиальной скорости цели доплеровским методом.



## Методы измерения угловых координат

- Амплитудный
- Фазовый
- Амплитудно-фазовый

## Фазовый метод



$$\Delta d = d \sin \alpha$$

Разность расстояний

Угол между направлением на цель и нормалью к базе

$$\Delta \varphi = 2\pi \frac{d \sin \alpha}{\lambda}$$

Разность фаз колебаний,  
Измеряют с помощью ФД

$$F(\alpha) = 2\pi \frac{d}{\lambda} \alpha$$

Пеленгационная характеристика при малых углах

$$S_\alpha = \left| \frac{dF(\alpha)}{d\alpha} \right|_{\alpha=0} = \frac{2\pi d}{\lambda}$$

Крутизна пеленгационной характеристики (чувствительность пеленгования)

Увеличение крутизны

$$\frac{d}{\lambda} > \frac{1}{2}$$

Неоднозначность угла

Таким образом достоинства фазового метода пеленгации:

— Потенциально высокая точность

Недостатки:

— Неоднозначность измерений, необходимость реализации многошкальной системы;

— Отсутствие разрешения по углу;

— Необходимость реализации идентичных каналов приема сигналов.

## Амплитудный метод пеленгации

$$U_s = U_1 + U_2 = U \left( e^{j\frac{\varphi}{2}} + e^{-j\frac{\varphi}{2}} \right) = 2U \cos \left( \pi \frac{d}{\lambda} \sin \alpha \right)$$

*Суммарный сигнал от 2-х антенн*

Недостатки пеленгования по максимуму:

- низкая чувствительность,
- невозможность определения направления отклонения от максимума,
- зависимость от амплитуды сигнала.

$$U_d = U_1 - U_2 = U \left( e^{j\frac{\varphi}{2}} - e^{-j\frac{\varphi}{2}} \right) = 2jU \sin \left( \pi \frac{d}{\lambda} \sin \alpha \right)$$

*Разностный сигнал от 2-х антенн*

Недостаток: в момент минимума сигнал равен 0, его нельзя наблюдать и использовать для измерения дальности

$$F(\alpha) = \frac{U_d}{U_s} = \operatorname{tg} \left( \pi \frac{d}{\lambda} \sin \alpha \right)$$

### Суммарно-разностный пеленгатор

- исключена зависимость от амплитуды,
- можно определить направление отклонения и
- обеспечить высокую точность пеленгования

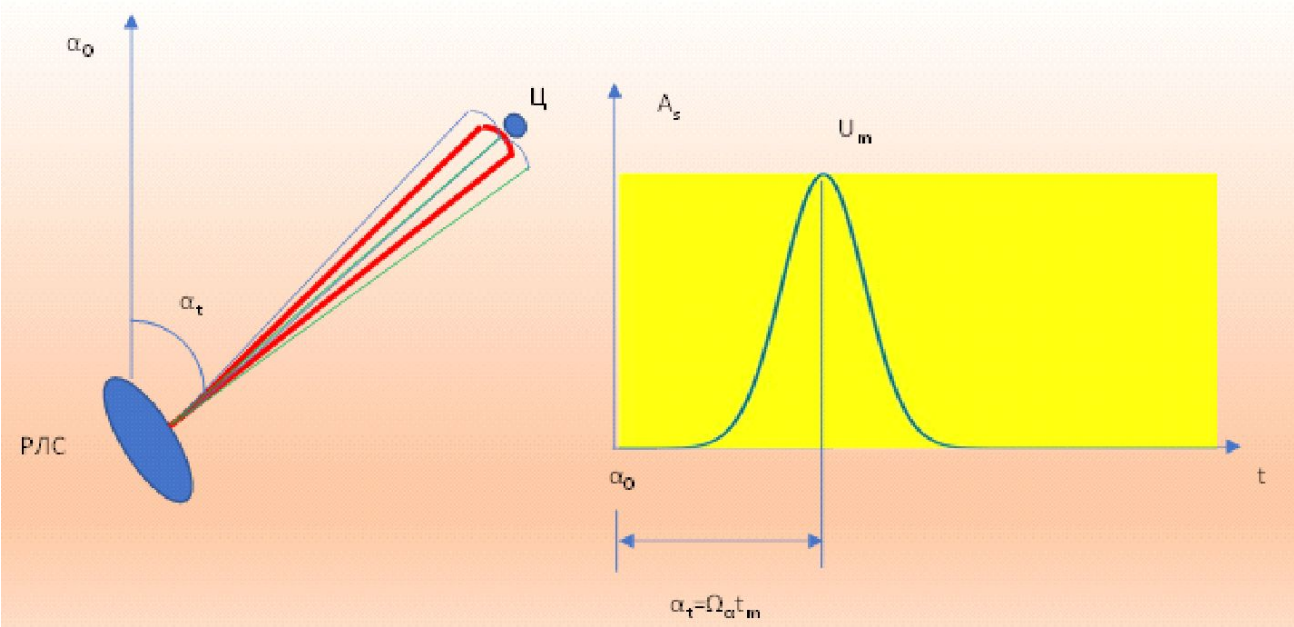
$$S_\alpha = \left| \frac{dF(\alpha)}{d\alpha} \right|_{\alpha=0} = \pi \frac{d}{\lambda}$$

### Крутизна пеленгационной характеристики

Недостатки:

- отсутствия разрешения по углу и
- неоднозначность измерений

## Метод максимума огибающей

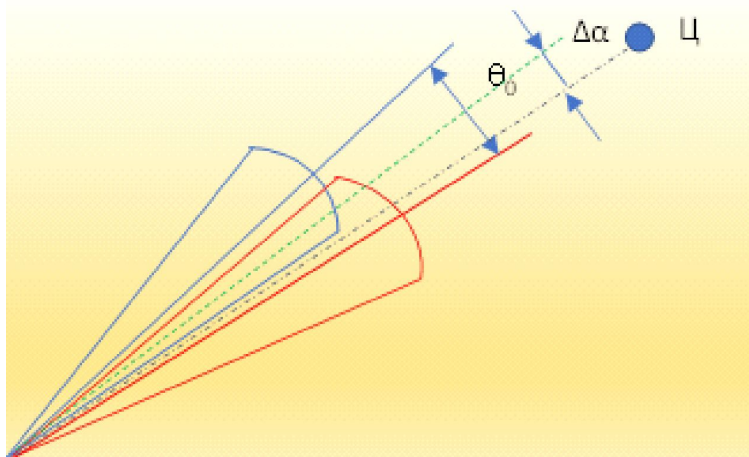


$$F(\alpha) = f^2(\alpha) \quad \text{Пеленгационная характеристика}$$

$$0.2\Delta\alpha \quad \text{СКО угла}$$

## Равносигнальный

метод



$$U_d(\Delta\alpha) = U_d \left( f \left( \frac{\theta_0}{2} + \Delta\alpha \right) - f \left( \frac{\theta_0}{2} - \Delta\alpha \right) \right)$$

Разностный сигнал определяет величину и знак угла

# МЕТОДЫ ОБЗОРА ПРОСТРАНСТВА

$$N_r = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{\Delta R}; N_\alpha = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{\Delta \alpha}; N_\beta = \frac{\beta_{\max} - \beta_{\min}}{\Delta \beta}; N_v = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\Delta V}$$

*Число элементов разрешения  
в зоне обзора*

Типы обзора:

- Последовательный
- Параллельный
- Комбинированный

$$\tau_r = \frac{2R_{\max}}{c}$$

*Время на 1 угловое  
направление*

*Полоса сигнала*

$$f_{d \max} - f_{d \min} = \frac{2(V_{r \max} - V_{r \min})}{\lambda} < \Delta f$$

*Условие одновременного  
обзора по скорости*

$$N_{\alpha\beta} = N_{\alpha} N_{\beta}$$

Число угловых каналов при параллельном обзоре

$$T_0 \geq \tau_{r \max} \cdot N_{\alpha\beta}$$

Время последовательного обзора

Последовательный обзор

$$(\theta_{\alpha}, \theta_{\beta})$$

Угловой сектор

$$T_0 \geq \frac{2R_{\max}}{c} \frac{N\theta_{\alpha}\theta_{\beta}}{\Delta\alpha\Delta\beta}$$

Время обзора

Наибольшее распространение получили следующие виды последовательного обзора:

- Круговой
- Секторный
- Винтовой
- Спиральный
- Конический

## Круговой и секторный обзор

$$\Delta\beta = \theta_\beta, \theta_\alpha = 2\pi$$

Круговой обзор

$$T_{0c} = \frac{2\pi}{\Omega_\alpha}; T_{0s} = \frac{\theta_\alpha}{\Omega_\alpha}$$

$$\Omega_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\tau_{r\max} N}, \tau_{r\max} \leq T_r \Rightarrow \Omega_\alpha \leq \frac{\Delta\alpha}{T_r N} = \frac{\Delta\alpha F_r}{N}$$

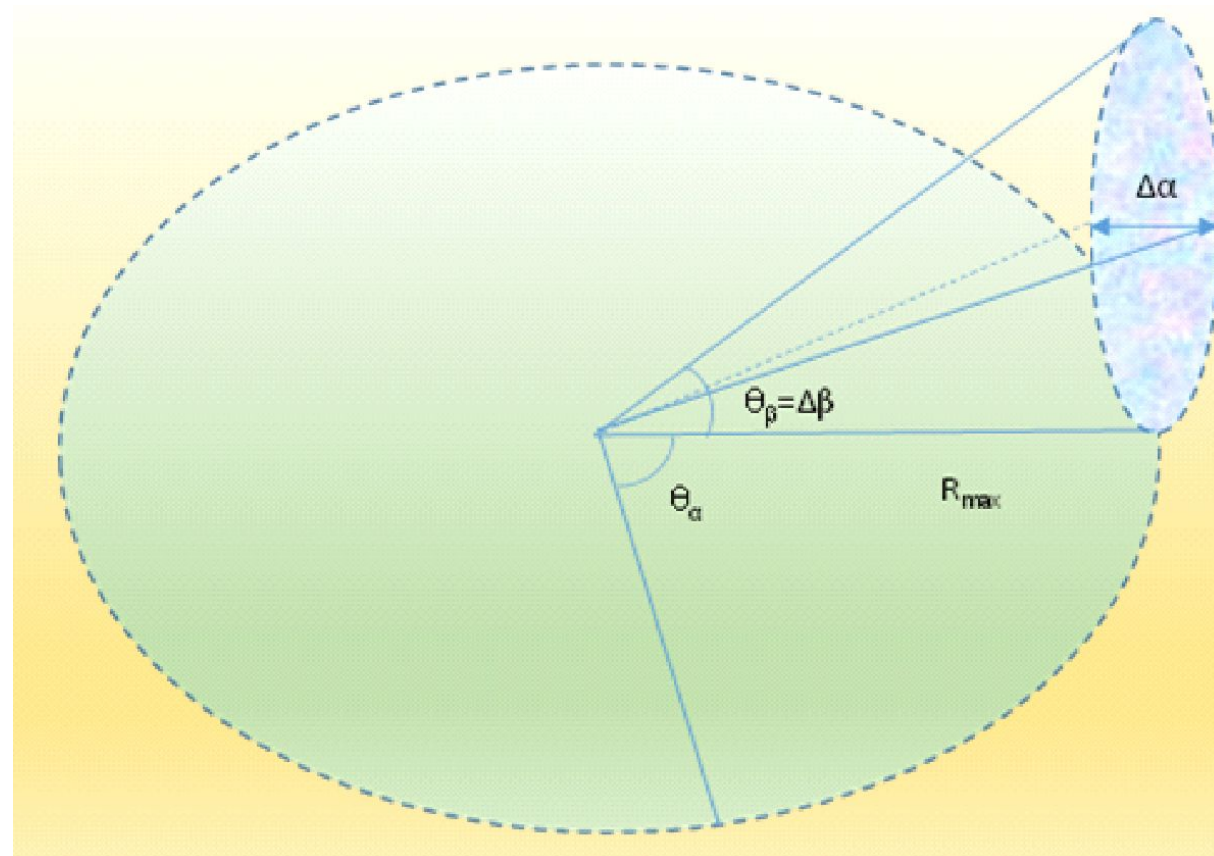
$$T_{0c} \geq \frac{2\pi N}{\Delta\alpha F_r}; T_{0s} \geq \frac{\theta_\alpha N}{\Delta\alpha F_r}$$

время обзора

Угловая скорость

$$\theta_\alpha < 2\pi$$

секторный обзор



Недостаток:

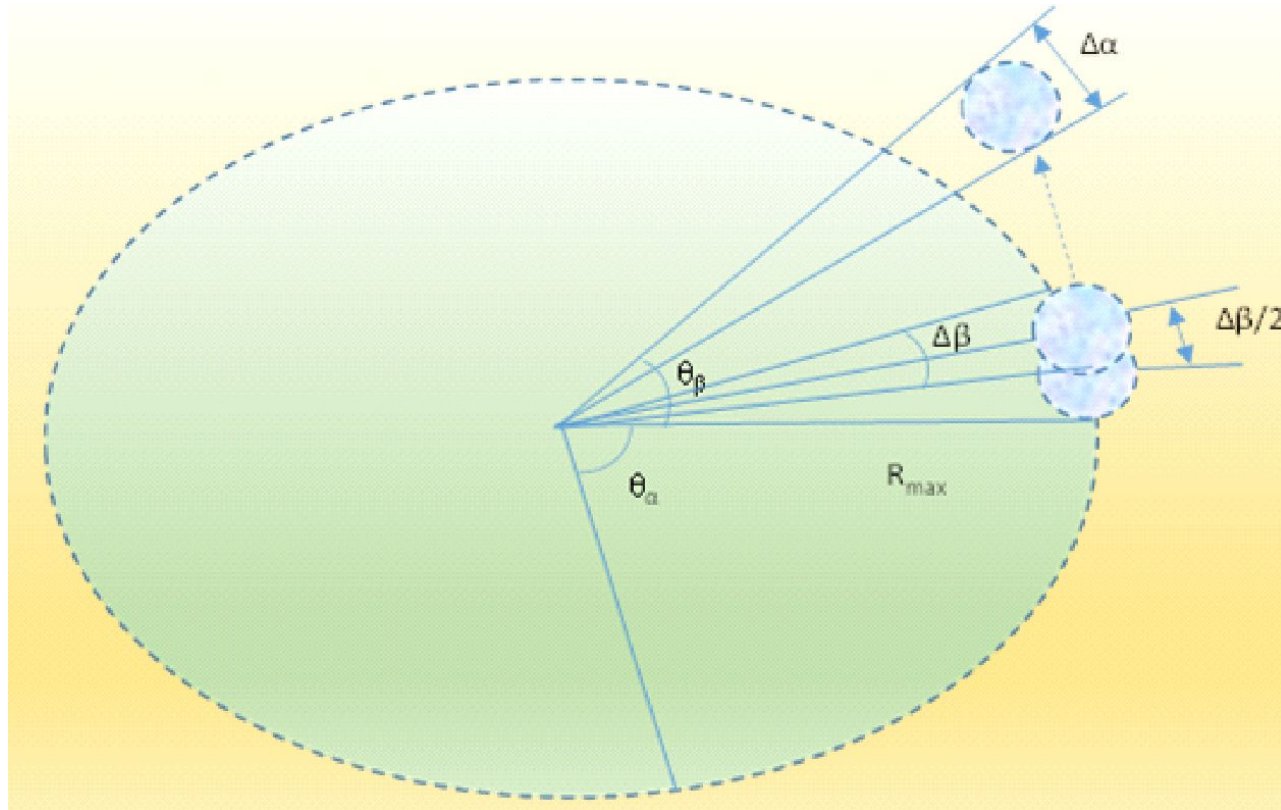
Измеряется только две координаты – дальность и азимут



## Винтовой обзор

$$\frac{\Delta\beta}{2}$$

Смещение с перекрытием ДНА на каждом витке



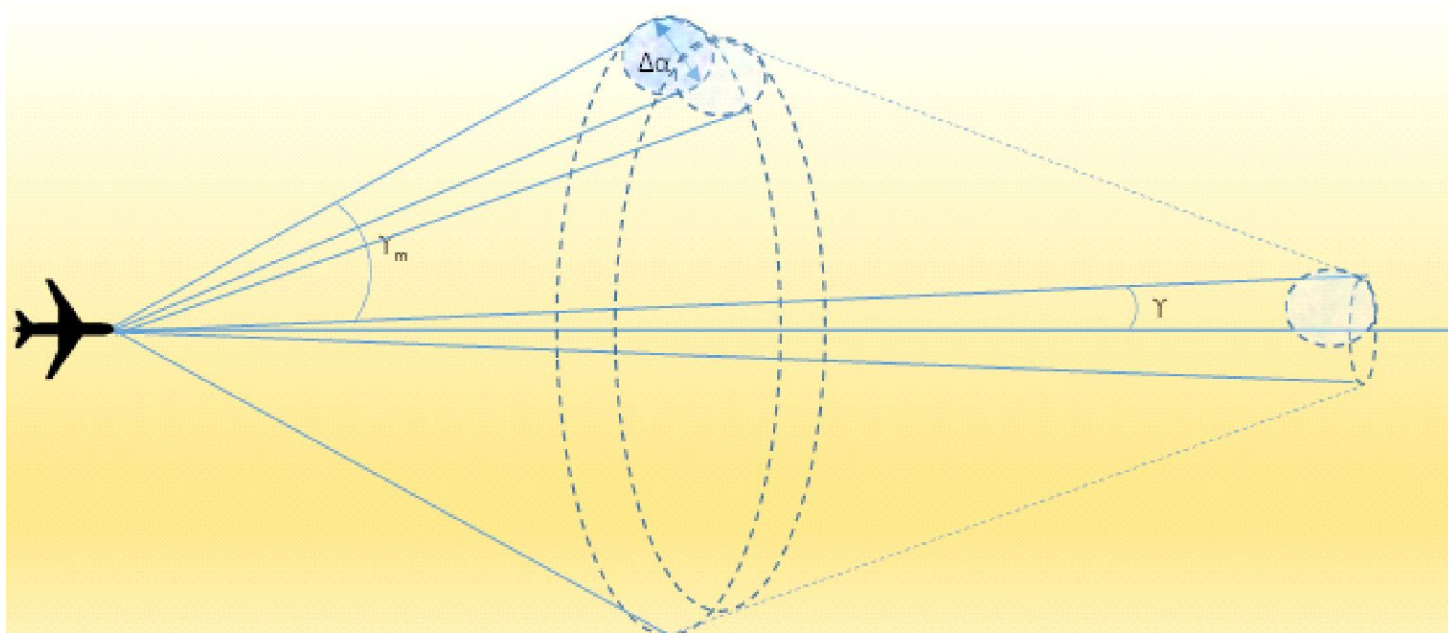
$$T_h = \frac{2\theta_\beta}{\Delta\beta} \frac{2\pi}{\Omega_\alpha}; \Omega_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{NT_r} = \frac{\Delta\alpha F_r}{N} \Rightarrow T_h = \frac{4\pi\theta_\beta N}{\Delta\alpha\Delta\beta F_r}$$

Время обзора

$$\frac{2\theta_\beta}{\Delta\beta}$$

Увеличение времени обзора по сравнению с круговым обзором за счет измерения 3-х координат

## Спиральный обзор



$\gamma$

Угол между осью вращения и осью ДНА

Время обзора

$$T_s(\gamma) = \frac{2\pi N \gamma_m \sin \gamma}{\Delta\alpha \Delta\beta F_r} \Rightarrow T_s = \frac{2\pi \gamma_m N \frac{1}{\gamma_m} \int_0^{\gamma_m} \sin \gamma d\gamma}{\Delta\alpha \Delta\beta F_r} = \frac{4\pi N \sin^2\left(\frac{\gamma_m}{2}\right)}{\Delta\alpha \Delta\beta F_r}$$

По сравнению с винтовым обзором время сокращается, однако, разрешение по азимуту при малых углах места существенно ухудшается.

## Конический обзор

$\gamma$

Постоянный угол (частный случай спирального обзора), не больше

$$\frac{\Delta\alpha}{2}$$

$2\gamma + \Delta\alpha$

Сектор обзора по углу места

$$T_c = \frac{2\pi}{\Omega_\alpha} = \frac{2\pi N \sin \gamma}{\Delta\alpha F_r}$$

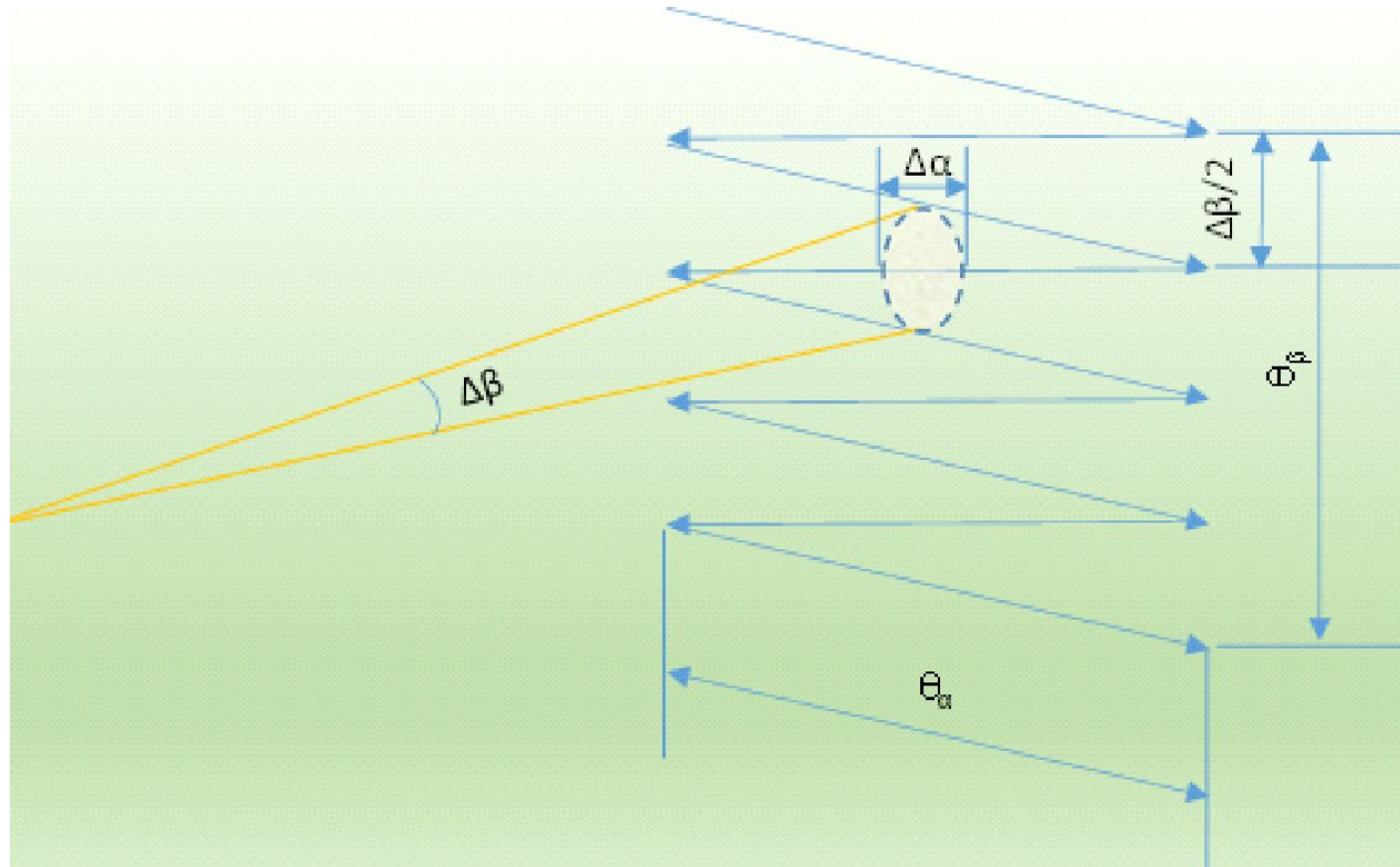
время обзора (1 оборот)

время обзора меньше, чем у спирального обзора, но нет разрешения по углу места

## Растровый обзор

$$T_r = \frac{2\theta_\alpha \theta_\beta N}{\Delta\alpha \Delta\beta F_r}$$

время обзора



Механическое вращение ограничивает скорость обзора. Необходимо применять электронное сканирование и параллельный адаптивный обзор.

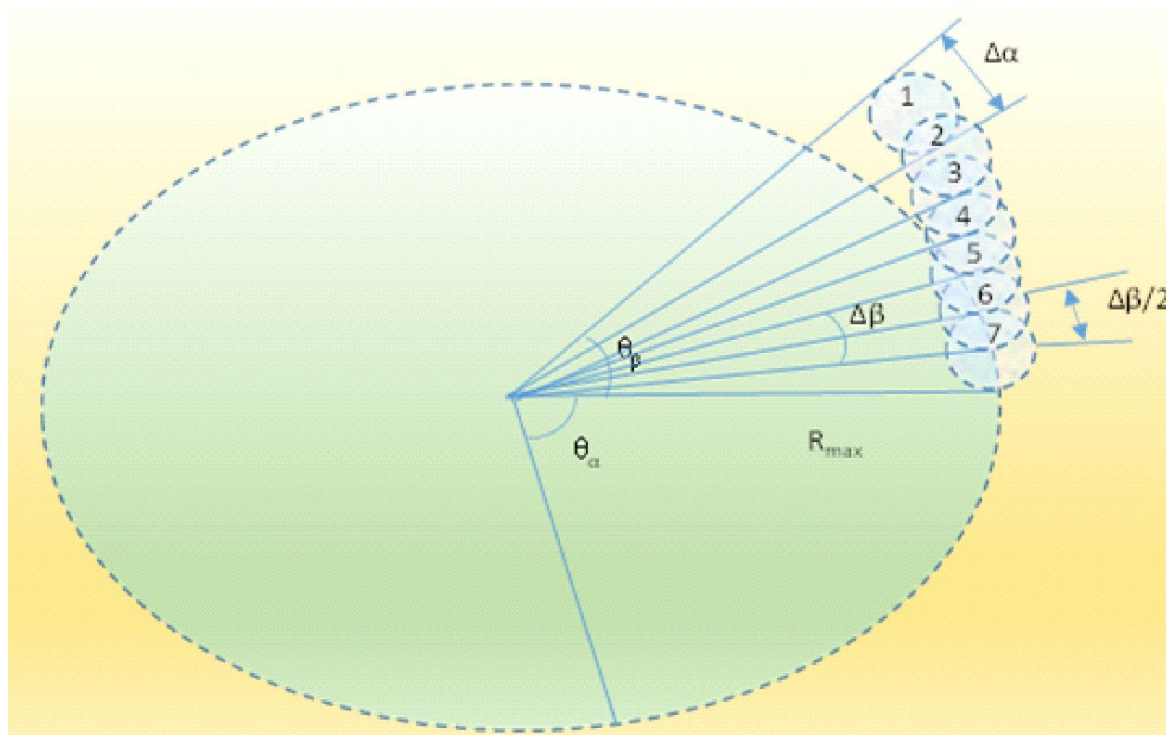
### Адаптивный и программируемый обзор

$$N_{\beta} \geq \frac{\theta_{\beta}}{\Delta\beta}$$

Число лучей по углу места

$$T_0 = \frac{2R_{\max}}{c} \frac{N\theta_{\alpha}}{\Delta\alpha}$$

Время обзора



Если не применять механическое вращение сектор обзора не может быть больше 120°(реально 90°). В системах с электронным сканированием реализуют либо набор ФАР, повернутых в разные направления, либо используют ФАР сферической или цилиндрической формы.

## Управляемый поиск целей (адаптивный обзор)

$$\Lambda = \sum_{k=1}^{N_r} p_k \Lambda_k$$

Отношение правдоподобия для углового направления

Отношение правдоподобия для  $k$ -ой ячейки

Вероятность наличия цели в  $k$ -ой ячейке  
дальности

$$\begin{cases} \Lambda > C_h \Rightarrow \text{цель} \\ \Lambda < C_l \Rightarrow \text{шум} \\ C_l \leq \Lambda \leq C_h \Rightarrow \text{наблюдение} \end{cases}$$

Критерий Вальда

### Задачи и упражнения

1. Во сколько раз скорость спирального обзора выше винтового при максимальном отклонении ДНА от оси вращения, равном  $\frac{\pi}{2}$ ?
2. Есть ли выигрыш в скорости у параллельного обзора по углу места по сравнению с последовательным при одинаковой мощности передатчика РЛС, обеспечивающей обнаружение целей на максимальной дальности?
3. Фазовый дальномер работает в см диапазоне волн при максимальной дальности цели 10км. Выбрать способ однозначного измерения фазы сигнала.
4. ЧМ дальномер измеряет дальность по средней частоте принятого сигнала с периодом модуляции равном 2мс. Какова относительная ошибка измерения дальности до цели, удаленной на 10км от РЛС?
5. РЛС кругового обзора с периодом 6 сек. обнаруживает цели на дальности до 150км. Ширина ДНА по азимуту 1,5 град. В каких пределах находится ошибка измерения азимута цели по максимальной амплитуде принятого сигнала?
6. РЛС винтового обзора имеет ширину луча 2 градуса по обоим угловым координатам. Обзор производится вкруговую по азимуту и по углу места до 20 град. Дальность обнаруживаемых целей до 300км. Период обзора 15 сек. Сколько импульсов можно накапливать в каждом угловом направлении для уменьшения мощности передатчика?
7. В РЛС, работающей на частоте 300МГц, используется суммарно-разностный метод пеленгации, с использованием двух антенн, разнесенных на расстояние 0,5м. Найти чувствительность пеленгатора и относительную величину пеленгационного сигнала от цели с азимутом 10 град.
8. Найти число каналов обработки в РЛС, использующей параллельный обзор сектора 30 градусов по азимуту и углу места. Разрешение по азимуту 1 градус, по углу места 2 градуса. Чему равно время обзора, если дальность цели до 600км?
9. Определить максимальную дальность ЧМ дальномером с периодом модуляции 2мс. Есть ли отличия от дальности импульсной РЛС с таким же периодом повторения импульсов? Почему такую дальность трудно измерить ЧМ таким дальномером?
10. Сколько целей в одном угловом направлении может обнаружить и разрешить импульсная РЛС, излучающая сигналы длительностью 1мкс при максимальной дальности обнаружения 30км? РЛС, использующая фазовый дальномер?

***БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!***