

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

Занятие № 4. Методы радиолокационного обзора, используемые в системах вооружения ЗРВ.

Учебные вопросы

1. Методы обзора пространства по дальности и радиальной скорости.
2. Методы обзора пространства по угловым координатам.

Введение

Радиолокационное наблюдение осуществляется в определенной области пространства, которую называют **зоной видимости (ЗВ)** или **зоной обзора (ЗО)** РЛС. Размеры этой зоны определяются количеством измеряемых координат и интервалами, в пределах которых возможно измерение.

В простейшем случае при измерении двух координат – азимута  $\beta$  и дальности  $D$  можно наглядно отобразить зону видимости РЛС в полярных координатах (рисунок 1).

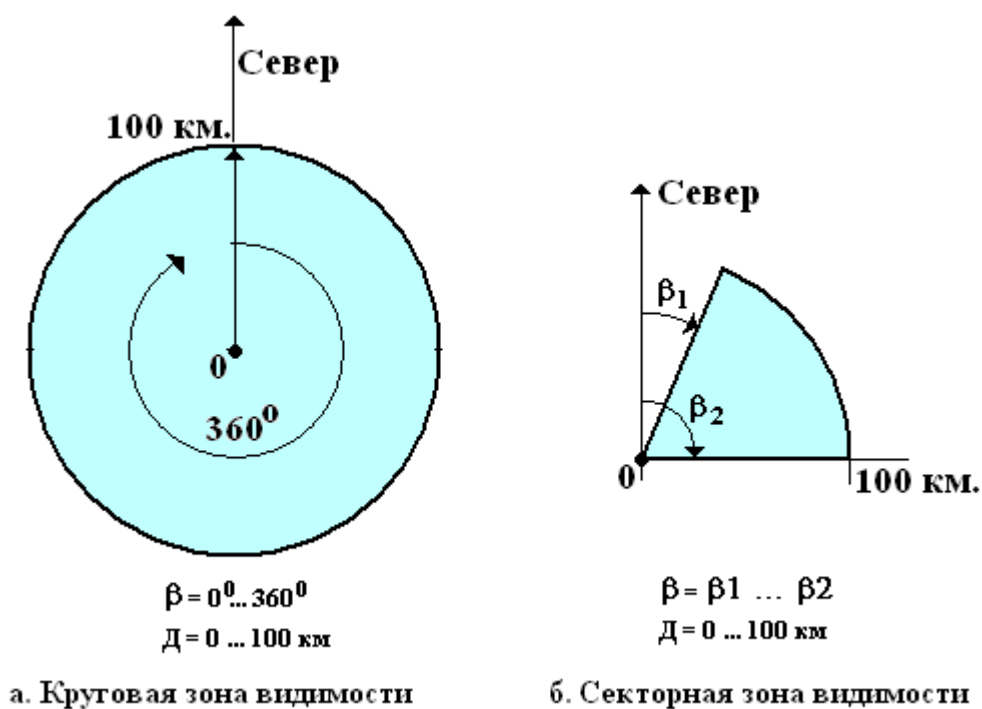


Рис.1. Варианты зон видимости 2-х координатной РЛС

Очевидно, что изменяя интервал просмотра по любой из координат, можно получить новую конфигурацию зоны обзора. Также очевидным является то, что для однозначного определения местоположения цели в пространстве необходимо знать не две, а три ее координаты. Поэтому для большинства современных РЛС зона видимости – трехмерная.

Однако в ЗРС цель это не только объект, координаты которого необходимо узнать, но и мишень, в которую затем осуществляется наведение зенитной управляемой ракеты (ЗУР). Для наведения ЗУР мало знать точные пространственные координаты цели, необходимо знать и то, с какой скоростью она движется. Поэтому в станциях наведения ракет кроме трех координат, задающих пространственное положение цели, может измеряться и четвертая координата – радиальная скорость.

Зона видимости такой РЛС является четырехмерной и характеризуется четырьмя координатными интервалами обзора: по дальности  $\Delta r_{обз} = r_{max} - r_{min}$ , по азимуту  $\Delta \beta_{обз} = \beta_{max} - \beta_{min}$ , по углу места  $\Delta \varepsilon_{обз} = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$ , а также по радиальной скорости  $\Delta V_{обз} = |V_{ry}|_{max} - |V_{ry}|_{min}$ . Что касается зоны обзора по радиальной скорости, то она может быть представлена в двух вариантах – для приближающихся к РЛС целей и для удаляющихся от РЛС целей, что выражено модулем  $|V_{ry}|$  в формуле.

Значения координатных интервалов в современных РЛС велики, а разрешающая способность в определении координат очень высока. Например, характерные значения для дальности составляют: координатный

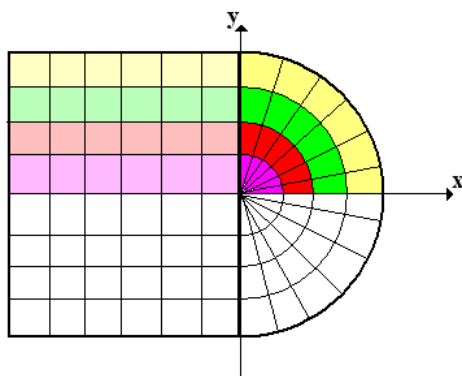


Рис.2. Разбиение ЗО на элементы разрешения в прямоугольных и полярных координатах

интервал – 300 км, а разрешающая способность  $\Delta r \sim 200$  м. Не сложно убедиться, что в координатном интервале только по одной координате укладывается 1500 элементов разрешения. Для двухмерного случая ЗО общее количество

элементов разрешения в зоне есть произведение числа элементов по обеим координатам (дальность - азимут)  $1500 \cdot 360$  (при  $\Delta\beta = 1^\circ$ ) (рисунок 2), т.е. сотни тысяч. Для четырехмерной ЗО число элементов разрешения может достигать миллионов. Для количественного описания числа элементов разрешения целесообразно пользоваться нормированными единицами, определяемыми отношением интервала обзора по каждой из оцениваемых координат к соответствующему интервалу разрешения:

$$N_r = \frac{\Delta r_{обз}}{\Delta r}; \quad N_\beta = \frac{\Delta \beta_{обз}}{\Delta \beta}; \quad N_\varepsilon = \frac{\Delta \varepsilon_{обз}}{\Delta \varepsilon}; \quad N_V = \frac{\Delta V_{обз}}{\Delta V};$$

то есть количеством разрешаемых элементов в зоне обзора РЛС по каждой из координат.

Задача обнаружения целей (получение ответа на вопрос – есть цель или ее нет) решается для каждого элемента разрешения в пределах зоны видимости. Время, требуемое для обнаружения цели в одном элементе обозначим как время анализа  $t_{ан}$ .

За время  $t_{ан}$  в активных РЛС с пассивным ответом выполняются следующие операции:

- наведение антенной системы на требуемый элемент разрешения;
- излучение зондирующего сигнала (ЗС);
- прием отраженного от цели сигнала (если цель есть в исследуемом элементе разрешения);
- обработка принятого сигнала по заданному алгоритму.

Длительность  $t_{ан}$  может достигать десятков миллисекунд. Если просматривать все элементы ЗО один за другим суммарное время, требуемое

на полный просмотр всей зоны (обзор пространства) определяется как  $t_{обз} = t_{ан} \cdot N$ , где  $N = N_r \cdot N_\beta \cdot N_\varepsilon \dots$  – количество элементов разрешения в ЗО.

Такой способ обзора пространства принято называть **последовательным**.

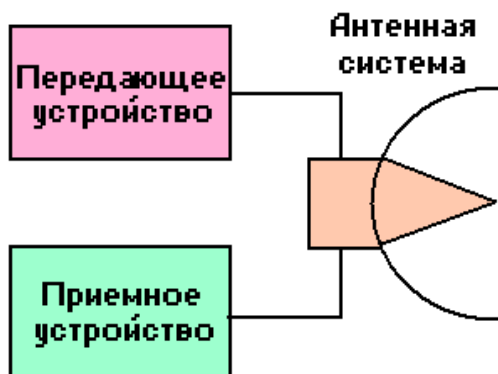


Рис.3. Структура канала РЛС

Для своей реализации он требует один канал, включающий передатчик, антенную систему и приемник (рисунок 3).

Очевидно, что для  $N \sim 10^6$  и  $t_{ан} \sim 10^{-2}$  сек. время обзора  $t_{обз} \sim 10^4$  сек. (это более 2 часов и 45 минут). Для обнаружения скоростных воздушных объектов такое время обзора неприемлемо.

Напрашивается элементарное решение – для уменьшения  $t_{обз}$  достаточно все элементы разрешения ЗО просмотреть одновременно. При этом  $t_{обз}$  должно стремиться к  $t_{ан}$ . Такой способ обзора принято называть **параллельным** обзором пространства, и для его реализации требуется создание отдельного канала (передатчик, антенная система и приемник) для каждого элемента ЗО (миллион каналов), что также неприемлемо.

На практике используют различные комбинации параллельного и последовательного обзора, которые позволяют получить требуемую величину времени  $t_{обз}$  при минимальных аппаратных затратах.

Ключевым моментом в данной ситуации является определение потребного времени обзора. Как правило, это время определяется потребителем радиолокационной информации (РЛИ). Если потребителем РЛИ выступает ЗРС, то  $t_{обз}$  – это период обновления информации о воздушной обстановке в зоне ответственности ЗРС. Учитывая, что целями для ЗРС являются высокоскоростные и маневренные СВКН,  $t_{обз}$  должно быть минимальным.

Подробные тактические расчеты потребного периода обновления информации будут изучаться в курсе «Тактика ЗРВ». Практическое значение  $t_{обз}$  должно составлять порядка 6 секунд и менее.

В данной лекции мы рассмотрим способы достижения требуемого значения  $t_{обз}$  за счет комбинации последовательного и параллельного обзора пространства по различным координатам.

## 1. МЕТОДЫ ОБЗОРА ПРОСТРАНСТВА ПО ДАЛЬНОСТИ И РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

## Методы обзора пространства по дальности.

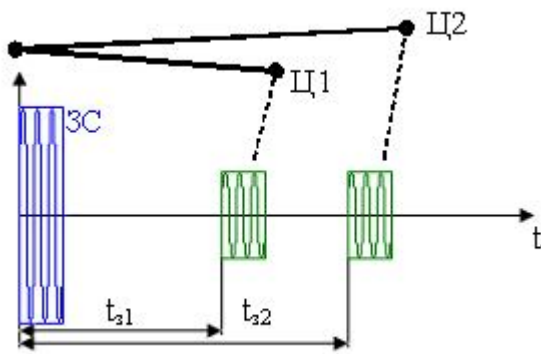


Рис.4. Временное положение отраженных от целей сигналов для одиночного радиоимпульса

Обзор зоны видимости РЛС по дальности происходит в процессе распространения зондирующей электромагнитной волны до цели и обратно. Радиолокационные сигналы, отраженные от различных элементов разрешения по дальности, поступают на вход приемного устройства РЛС в различные моменты времени, поэтому обзор пространства по дальности

является последовательным. Никаких специальных операций для выполнения такого обзора при использовании импульсных зондирующих сигналов (ЗС) не требуется. Однако при использовании протяженных во времени сигналов (например, когерентная пачка прямоугольных радиоимпульсов (КППРИ)), обработка которых предполагает их длительное накопление (когда время накопления превышает максимальное время запаздывания) может быть организован и параллельный обзор по дальности.

На рисунке 4 показано временное положение двух импульсных отраженных сигналов (ОС) от целей находящихся на различных дальностях  $r_{ц1}$  и  $r_{ц2}$ . Момент приема каждого сигнала задержан относительно начала

излучения ЗС на время запаздывания

$$t_{zi} = \frac{2r_{цi}}{c} \quad (i = 1, 2), \text{ где } c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

При зондировании целей одиночным сигналом измерение  $t_{zi}$  не представляет каких-либо затруднений и может производиться, например, путем визуального измерения расстояния между яркостной

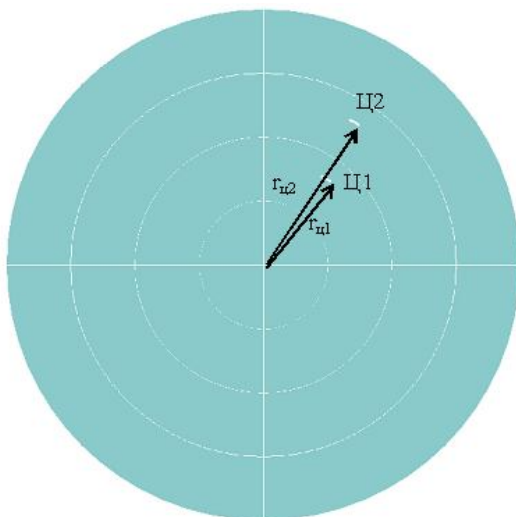


Рис.5. Определение дальности цели по индикатору кругового обзора импульсной РЛС

отметкой цели и центром экрана индикатора с круговой разверткой по координатам азимут-дальность ( $\beta$ -Д), соответствующим моменту излучения ЗС (рисунок 5).

Если в РЛС в качестве ЗС используется пачка радиоимпульсов (рисунок 6), излучение такого сигнала осуществляется периодически с интервалом  $T_n$  в течение времени  $T_c = MT_n$ .

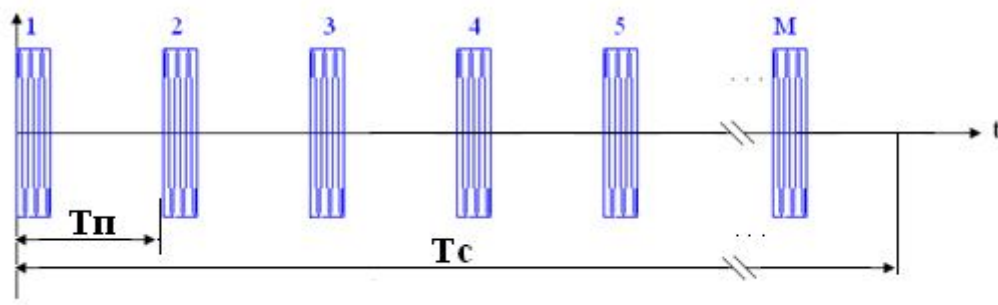


Рис.6. Когерентная пачка прямоугольных радиоимпульсов

Возможны два различных случая использования пачки радиоимпульсов в зависимости от соотношения периода повторения импульсов в пачке  $T_n$  и максимального значения времени запаздывания  $t_{з\text{ макс}}$ .

Если  $T_n > t_{з\text{ макс}}$ , то имеет место случай **однозначного** обзора по дальности. При этом временные соотношения между ОС и ЗС в пределах одного периода повторения  $T_n$  полностью соответствуют рассмотренным выше для случая одиночного импульса, а за время излучения пачки  $T_c$  существует  $M$  начальных моментов времени, аналогичных показанному на рисунке 6.

Если  $T_n < t_{з\text{ макс}}$ , то имеет место случай **неоднозначного** обзора по дальности. Для анализа природы этой неоднозначности рассмотрим временные соотношения между ОС и ЗС при использовании КППРИ (рисунок 7).

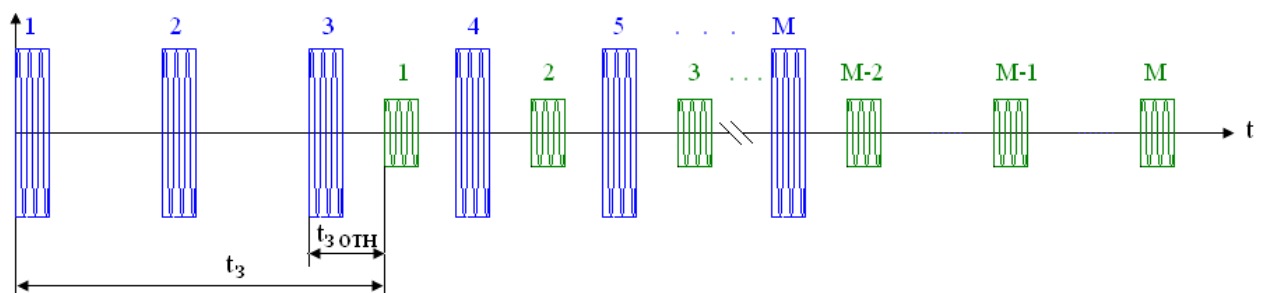


Рис.7. Временное положение отраженных от цели сигналов для КППРИ

Отраженный от цели сигнал, также как и зондирующий, представляет собой пачку из  $M$  радиоимпульсов, смещенную по времени на величину  $t_3$  относительно момента начала излучения. Особенность измерения времени запаздывания в этом случае состоит в невозможности однозначного сопоставления каждого импульса ОС соответствующему ему импульсу ЗС. Например, второму импульсу в пачке ОС в равной степени могут соответствовать 1, 2, 3 и 4 импульсы в пачке ЗС. При этом время запаздывания отраженного сигнала может быть определено только относительно ближайшего слева зондирующего импульса. Такое время запаздывания принято называть относительным  $t_{3\text{ отн}}$ , в отличие от истинного  $t_3$ .

В общем случае истинное значение времени запаздывания отличается от  $t_{3\text{ отн}}$  на целое число периодов повторения

$$t_3 = t_{3\text{ отн}} + k T_n,$$

где  $k$  - число целых периодов повторения, укладывающихся на интервале  $t_3$  (для случая, показанного на рисунке 3,  $k = 2$ ).

Неоднозначность в определении дальности является недостатком подобного ЗС, однако, при организации обзора по Д неоднозначность приводит к уменьшению количества элементов разрешения, а, следовательно, к упрощению процедуры обзора. Действительно, поскольку  $t_{3\text{ отн}} < T_n$ , для обнаружения целей с любыми дальностями в пределах  $\Delta r_{\text{обз}}$

достаточно просмотреть  $N_r = \frac{T_n}{\tau_u}$  элементов разрешения.

На практике для исключения потерь сигналов, расположенных на стыке соседних элементов разрешения, используется взаимное перекрытие разрешаемых элементов, характеризуемое коэффициентом перекрытия  $K_n$ . Физический смысл этой величины в том, что она показывает минимальное количество просмотров, используемых для каждой точки на временной оси за одно зондирование. Например, если  $K_n = 2$ , то каждую точку на временной

оси просматриваем дважды. Для реализации указанного требования число элементов разрешения следует увеличить в  $K_n$  раз.

Кроме того следует учесть, что прием ОС возможен не на всем протяжении  $T_n$ , так как на время излучения ЗС приемник закрывается (бланкируется). Длительность бланка составляет  $\tau_u$ .

Таким образом, итоговое выражение для определения числа элементов разрешения по Д для КППРИ составляет

$$N_r = \left( \frac{T_n}{\tau_u} \right) K_n - 1 = Q_c K_n - 1,$$

где  $Q_c = \frac{T_n}{\tau_u}$  - скважность сигнала.

### **Методы обзора пространства по радиальной скорости.**

Радиолокационный обзор по радиальной скорости также может быть однозначным или неоднозначным.

*Для описания частотных свойств сигнала применяется понятие спектра сигнала – распределение энергии, амплитуды или фазы сигнала по частоте. Для определения радиальной скорости используется Амплитудно-частотный спектр (АЧС). Наглядным примером спектрального представления белого света является радуга. В простейшем случае - синусоидального немодулированного сигнала весь спектр будет сосредоточен на одной единственной частоте (такой сигнал принято называть монохроматическим).*

Если в качестве ЗС используется монохроматический сигнал, в спектре которого присутствует только одна составляющая, измерение радиальной скорости  $V_{rc}$  производится однозначно. При этом обзор по  $V_{rc}$  может осуществляться как последовательно, так и параллельно.

Если же спектр ЗС содержит несколько составляющих, то для ответа на вопрос однозначно или неоднозначно будет измеряться радиальная скорость необходимо сравнить максимальное априорное значение доплеровской



частоты ОС с величиной частотного интервала между соседними составляющими спектра ЗС. Рассмотрим это на примере КППРИ.

АЧС принимаемого сигнала при облучении цели когерентной пачкой радиоимпульсов показан на рисунке 8, где частота  $f_0$  характеризует положение на частотной оси центрального лепестка спектра ЗС.

Из рисунка видно, что АЧС отраженного сигнала, так же, как АЧС зондирующего, является периодической функцией частоты и содержит

$\frac{1}{\tau_u F_n} = Q_c$  спектральных пиков, повторяющихся с интервалом  $F_n = 1/T_n$ .

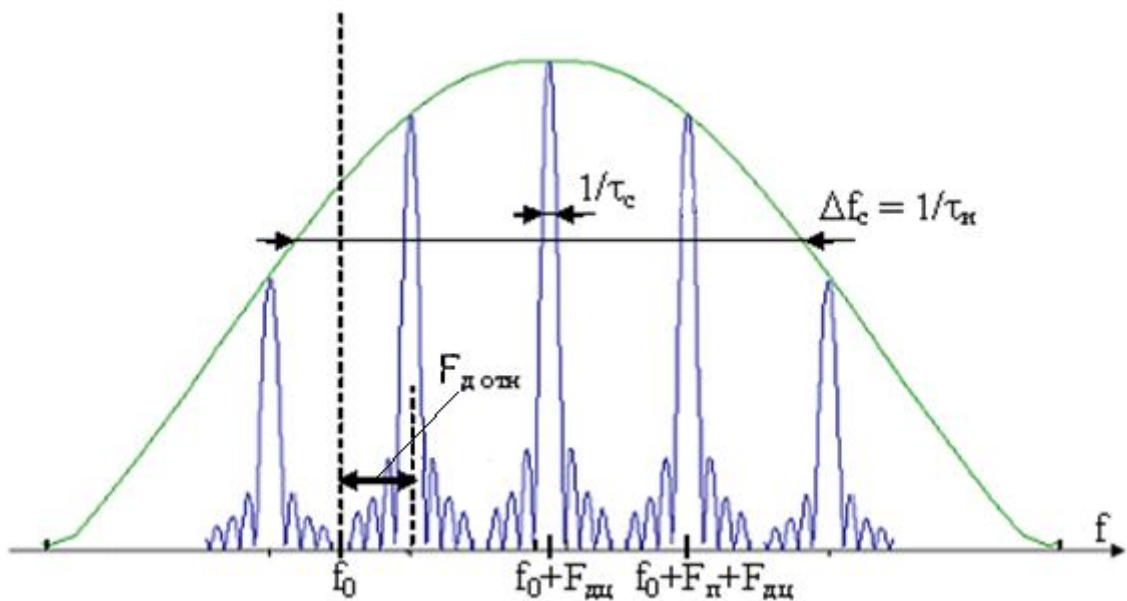


Рис.8. Амплитудно-частотный спектр принятой КППРИ

В отличие от АЧС ЗС каждый из спектральных пиков сигнала, отраженного от движущейся цели, смещен относительно соответствующего пика ЗС на величину доплеровской добавки частоты:

$$F_{доц} = \frac{2V_{rc}}{\lambda},$$

где  $V_{rc}$  – радиальная составляющая скорости цели.

Измеряя разницу частот принимаемого и излучаемого сигналов, можно определить величину  $F_{доц}$ , а, следовательно, и  $V_{rc}$ . Однако, как и при измерении дальности, периодичность спектров обоих сигналов не всегда

позволяет определить ее однозначно. В общем случае результатом подобного измерения будет относительное значение доплеровской частоты  $F_{\partial \text{ отн}}$  (относительно ближайшего слева или справа пика АЧС ЗС). Истинное ее значение будет выражаться зависимостью:

$$F_{\partial \text{ц}} = F_{\partial \text{отн}} + h F_n,$$

где  $h$  – округленное до целого числа количество интервалов  $F_n$ , укладываемых на величине  $F_{\partial \text{ц}}$  (например, если  $F_{\partial \text{ц}}/F_n = 1,49$  то  $h = 1$ , а если  $F_{\partial \text{ц}}/F_n = 1,51$  то  $h = 2$ ).

Из приведенной зависимости следует, что при  $|F_{\partial \text{ц}}| < \frac{F_n}{2}$  ( $h = 0$ ) истинное и относительное значения доплеровской частоты совпадают, а обзор по радиальной скорости является однозначным. При  $|F_{\partial \text{ц}}| > \frac{F_n}{2}$  ( $h \neq 0$ ) доплеровская частота определяется неоднозначно и обзор по скорости тоже неоднозначен.

Так же как и при обзоре по Д, неоднозначность обзора по скорости можно использовать для уменьшения количества просматриваемых элементов разрешения без потери информации о наличии цели.

При использовании КППРИ обзор по  $V_{rc}$  может осуществляться как последовательно, так и параллельно. Это справедливо как в случае однозначного обзора, так и неоднозначного.

## 2. МЕТОДЫ ОБЗОРА ПРОСТРАНСТВА ПО УГЛОВЫМ КООРДИНАТАМ

При параллельном обзоре пространства по угловым координатам радиолокационное наблюдение должно осуществляться по всей зоне обзора одновременно, путем использования многолучевой диаграммы направленности (ДН) антенны и многоканального приемника, число каналов в котором больше или равно числу антенных лучей. При достаточно плотном перекрытии лучей отраженный сигнал одновременно присутствует в нескольких приемных каналах РЛС, принимая максимальное значение в том

канале, угловое положение ДН которого наиболее точно совпадает с угловым положением цели  $\Theta_{ц}$ .

Последовательный обзор производится с помощью одного луча и одноканального приемника, что существенно упрощает конструкцию радиолокатора. При этом зона видимости просматривается последовательно во времени путем перемещения (сканирования) ДН антенны по угловой координате.

Антенны РЛС с последовательным обзором могут иметь диаграммы двух основных видов – **игольчатые** и **веерообразные**. При этом обзор может быть **круговым** или **секторным**.

**Круговой** обзор может быть реализован, например, путем механического вращения антенны с веерообразной ДН в азимутальной плоскости с постоянной угловой скоростью  $\Omega_a$  (рисунок 9).

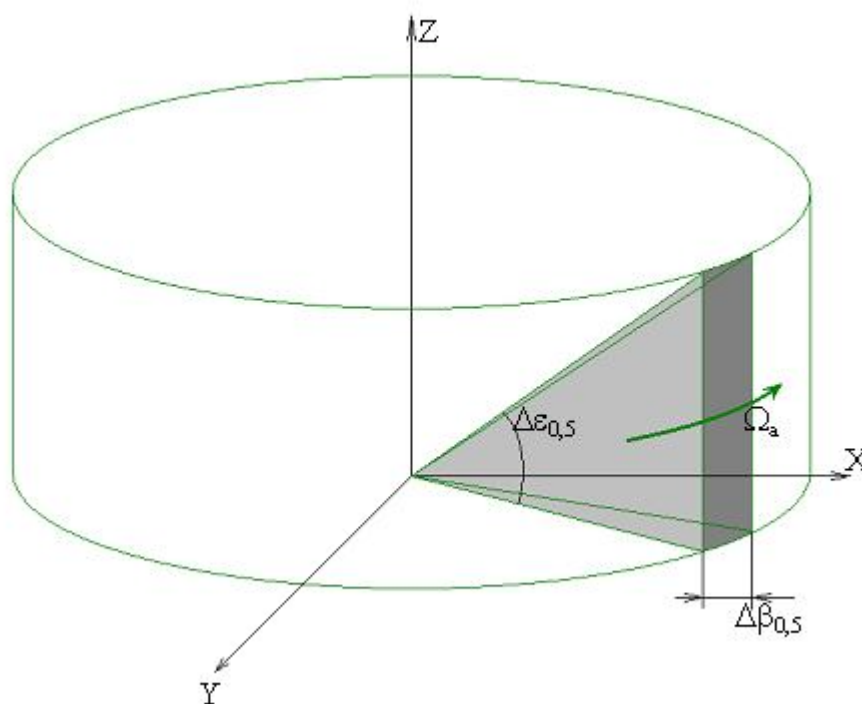


Рис.9. Круговой обзор по угловым координатам при помощи веерной ДН

Однократный просмотр зоны видимости осуществляется за время  $T_{обз}$ ,

называемое периодом обзора 
$$T_{обз} = \frac{2\pi}{\Omega_a, \frac{рад}{с}} = \frac{360^\circ}{\Omega_a, \frac{град}{с}}.$$

Если в зоне видимости присутствует цель, то сигнал, отраженный целью и принятый антенной РЛС, пропорционален зондирующему сигналу, промодулированному квадратом сечения ДН в плоскости сканирования антенны (рисунок 10). При совпадении максимума ДН с угловым положением цели амплитуда принятого сигнала достигает максимума.

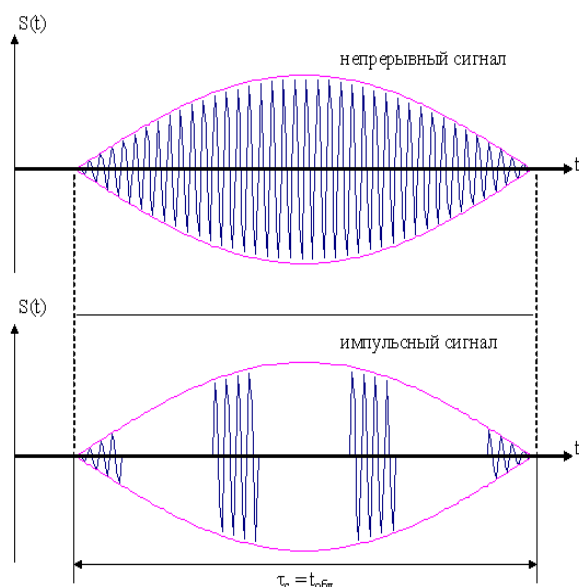


Рис.10. Форма принятого сигнала

Из рисунка видно, что в случае углового сканирования с непрерывным перемещением луча вид принимаемого сигнала существенно зависит от формы ДН, чем этот случай и отличается от случаев параллельного обзора и последовательного обзора с дискретным сканированием.

Как для непрерывного, так и для импульсного сигнала длительность принятой посылки равна времени облучения цели:

$$t_{обл} = \Delta\Theta_{0,5}/\Omega_a,$$

где  $\Delta\Theta_{0,5}$  – ширина луча ДН по уровню половинной мощности в плоскости сканирования антенны.

Веерная форма диаграммы позволяет охватить всю зону видимости по  $\varepsilon$  за одно зондирование, однако не позволяет измерить значение этой координаты, поэтому РЛС, использующие такую ДН, как правило, двухкоординатные.

В трехкоординатных РЛС, измеряющих дальность и обе угловые координаты, используется ДН игольчатой формы, а обзор осуществляется последовательным перемещением луча в обеих плоскостях. Рассмотрим один из вариантов **кругового** обзора для РЛС с фазированной антенной решеткой (рисунок 11).

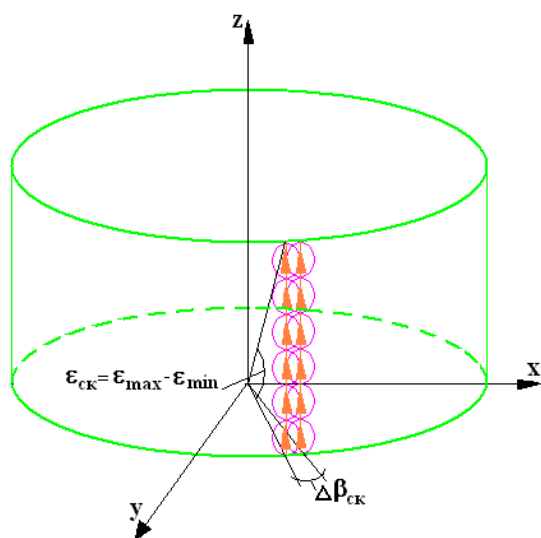


Рис.11. Последовательный обзор по угловым координатам в РЛС с игольчатой ДН

При фиксированном значении азимута максимум ДН последовательно с интервалом  $\Delta\epsilon_{ск}$ , называемым шагом сканирования по  $\epsilon$ , перемещается от минимального  $\epsilon_n$  до максимального  $\epsilon_k$  значений, после чего вновь возвращается в положение  $\epsilon_n$ , смещаясь при этом на один шаг сканирования по азимуту  $\Delta\beta_{ск}$ .

Далее цикл обзора повторяется и таким образом осуществляется круговой обзор в азимутальной плоскости и секторный в угломестной. Шаг сканирования подбирается так, чтобы

исключить участки непросматриваемого пространства между соседними лучами. В зависимости от решаемых РЛС задач и характеристик ДН сканирование может вестись с перекрытием соседних лучей  $\Delta\epsilon_{ск} < \Delta\epsilon_{0,5}$ ,  $\Delta\beta_{ск} < \Delta\beta_{0,5}$ , или без него  $\Delta\epsilon_{ск} = \Delta\epsilon_{0,5}$ ,  $\Delta\beta_{ск} = \Delta\beta_{0,5}$ . Оба варианта выбора шага сканирования проиллюстрированы на рисунке 11. По азимуту показано сканирование с перекрытием  $\Delta\beta_{ск} < \Delta\beta_{0,5}$ , а по углу места без перекрытия  $\Delta\epsilon_{ск} = \Delta\epsilon_{0,5}$ .

**Секторный** обзор по угловым координатам, как правило, используется в РЛС сопровождения целей и ракет. Он предусматривает излучение и прием пачки импульсов для текущего углового направления и лишь затем перенос луча на следующее направление. При этом линия огибающей принимаемого сигнала имеет прямоугольную форму, и не зависит от параметров ДН.

Рассмотренные примеры последовательного обзора по угловым координатам относятся к случаю обзора по **жесткой** программе, когда ДН перемещается независимо от результатов радиолокационного наблюдения. На практике РЛС обнаружения и сопровождения целей могут использовать и **гибкие** программы обзора. Например, в нечетные периоды происходит

обзор, аналогичный рассмотренным жестким программам обзора, а в четные осуществляется подсвет лишь тех угловых направлений, в которых зафиксированы цели. При этом повышается темп обновления радиолокационной информации о целях.

**Выводы:**

- в современных радиолокационных системах выбор методов обзора пространства по различным координатам определяется, прежде всего, необходимостью наилучшим образом решать задачи, стоящие перед РЛС;
- ускорение обзора пространства по любой из координат достигается путем усложнения аппаратуры РЛС (использованием многоканальных устройств), а, следовательно, повышения ее стоимости;
- выбранные методы обзора определяют не только период обзора пространства, но и в ряде случаев влияют на форму огибающей принятого сигнала.

**ЗАДАНИЕ НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ РАБОТУ:**

Повторить материал лекции.