

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

ЗАНЯТИЕ № 8. Общие сведения об антенных системах, используемых в системах вооружения ЗРВ.

Учебные вопросы

1. Назначение и состав антенной системы РЛС.
2. Технические характеристики антенных систем РЛС.
3. Особенности реализации антенных систем РЛС, используемых в системах вооружения ЗРВ.

1. НАЗНАЧЕНИЕ И СОСТАВ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ РЛС

Антенная система (АС) (в общем случае включает приемную и передающую антенны) и *аппаратура правления лучом*. Предназначены для формирования диаграмм направленности на передачу и прием и управления их положением в пространстве. Как правило, к антенной системе относят волноводные тракты между АС приемником и передатчиком.

Антенной (от лат. antenna – мачта, рей) называется устройство для излучения или приема радиоволн. Передающая антенна преобразует подводимые к ней электромагнитные колебания в излучаемые электромагнитные волны, приемная - преобразует падающие на нее электромагнитные волны (ЭМВ) в колебания, которые затем воздействуют на приемник.

Работа антенны основана на эффекте излучения - преобразовании энергии переменного тока высокой частоты, протекающего по проводнику, в энергию распространяющихся ЭМВ.

Огромный диапазон длин волн, излучаемых или принимаемых современными антеннами, и многообразие областей применения обусловили большое число их типов и конструкций.

Одна из главных функций антенны состоит в формировании излучения с определенными характеристиками, в первую очередь – с заданной диаграммой направленности (ДН). Задача формирования узкого луча ДН сводится к формированию плоского фронта волны для излучаемой ЭМВ. (*Фазовый фронт волны* это совокупность точек пространства, в которых данная волна имеет одинаковую фазу.)

Наглядно проиллюстрировать это утверждение можно, если сравнить два волновых процесса: волну на поверхности воды от брошенного камня – «круги на воде» и прямую прибойную волну. Видимые на воде гребешки волн это и есть фазовые фронты волн. Очевидно, что круги расходящиеся от камня очень быстро затухают, а прямая прибойная волна может двигаться по водоему на большое расстояние и не потерять своей высоты.

Объяснение этому явлению очень простое: если пренебречь потерями энергии на трение то запас энергии у волны будет постоянным, круговая волна постоянно увеличивает свой радиус и распределяя эту конечную энергию по все более длинному фронту быстро затухает. Прямая прибойная волна не меняет длину своего фронта, поэтому ее запас энергии останется неизменным.

Совершенно аналогичным образом ведет себя и ЭМВ: если фазовый фронт сферический, то излучение ненаправленное и быстро рассеивается в пространстве, если фазовый фронт плоский имеет место узконаправленное излучение, вся энергия которого сосредоточена в одном направлении – по нормали к фронту. Предельным случаем узконаправленного излучения является лазер.

В простейших антеннах плоский фазовый фронт создается с помощью отражающих поверхностей – зеркал. Поэтому они так и называются - антенны отражательного типа или зеркальные антенны. Их основными

элементами являются облучатель, который подводит высокочастотную электромагнитную энергию от передатчика к антенне, и рефлектор (отражатель), фокусирующий ее в узконаправленный луч заданной конфигурации.

Облучатель помещается в фокусе отражателя, в качестве которых применяют параболические или сегментно - параболические цилиндры, усеченные параболоиды вращения и другие аналогичные поверхности. Наиболее распространены однозеркальные антенны, облучаемые из фокуса или фокальной плоскости (рис. 1)

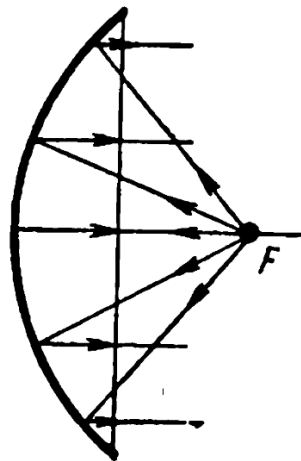


Рис.1 Принцип действия зеркальной антенны

В РЛС дециметрового и сантиметрового диапазонов облучателем чаще всего является рупор, которым оканчивается волновод, в метровом диапазоне для этого используются вибраторы, размеры которых зависят от длины генерируемой станцией волны.

Площадь плоской антенны или площадь поверхности, ограниченной кромкой отражателя зеркальной антенны, называется раскрывом антенны. Излучающим раскрывом или апертурой антенны называется площадь поверхности, на которой поле антенны является синфазным, формируя практически плоские волны. Она отстоит от поверхности антенны на

расстояние в несколько длин волн и соизмерима с геометрической площадью раскрыва. Иначе ее называют эффективной площадью антенны $S_{\text{эфф}}$.

Для повышения дальности действия РЛС размеры антенны стремятся выбрать максимальными, но конкретная ее конфигурация определяется назначением лоатора, его тактико-техническими характеристиками, особенностями боевого применения и условиями эксплуатации.

В общем случае, чем больше геометрические размеры антенного полотна и чем больше длин волн укладывается в его сечении, тем более узкой, при всех прочих равных условиях, может быть диаграмма направленности антенны.

На практике зависимость ширины ДН от относительного размера антенны характерна не только для зеркальных антенн, но и для всех остальных. Прямым следствием этого является зависимость линейных размеров антенн от диапазона длин волн. Для получения одинаковой ширины ДН антенна РЛС с длиной волны 3 метра должна быть в 10 раз больше, чем антенна РЛС с длиной волны 3 сантиметра.

Недостатком зеркальных антенн является необходимость механического (т.е. медленного) перемещения антенны для изменения направления излучения.

Однако рост боевых возможностей средств воздушного нападения потребовал сокращения времени переноса луча с одной цели на другую. Для решения этой задачи были разработаны методы электронного перемещения луча в пространстве относительно плоскости антенны.

Суть подобного управления заключается в замене одного мощного источника излучения (рупора) множеством элементарных слабонаправленных излучателей, расположенных непосредственно в плоскости раскрыва антенны и строго упорядоченных по строкам и столбцам. За счет явления интерференции (сложения с учетом фазы) суммарная энергия излучения в направлении цели остается прежней. Однако, если изменить начальные фазы элементарных облучателей антенная система

приобретет новое свойство – направление излучения изменится, без механического перемещения антенны. Таким образом расположив управляемые по фазе элементарные излучатели в узлах жесткой решетки, размер которой равен размеру исходной зеркальной антенны получаем антенну с аналогичными направленными свойствами но с электронным управлением положением луча.

Подобные системы называются фазированными антенными решетками (ФАР). Решетками потому, что конструктивно излучающие элементы располагаются в виде решетчатой структуры, образуя антенное полотно, а фазированными потому, что имеется возможность управлять процессом формирования диаграммы направленности зондирующего сигнала.

Наиболее просты в реализации ФАР проходного типа, в которых управляемые элементы не генерируют ЭМВ самостоятельно, а лишь переизлучают сигнал от мощного неуправляемого по фазе источника (рис. 3, 4).

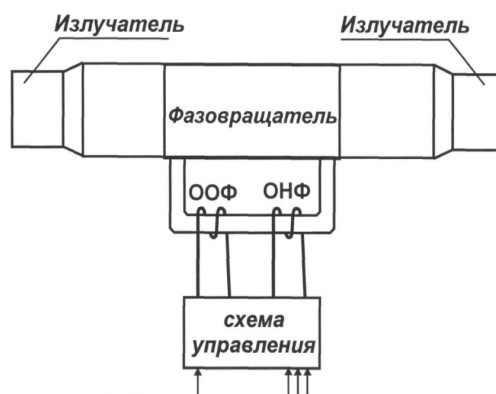


Рис. 3. Управляемый излучатель ФАР

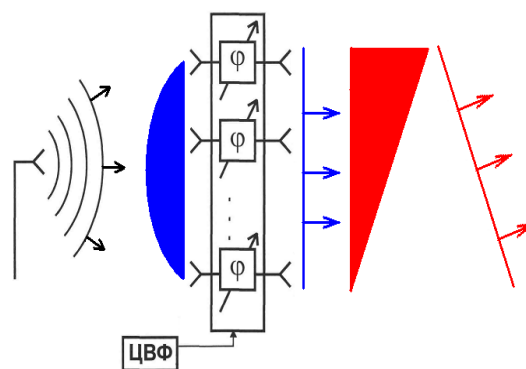


Рис.4. Принцип действия ФАР

Управляемый излучатель состоит из управляемого ферритового фазовращателя (ФВ), двух диэлектрических излучателей и схемы управления. Фазовращатель выполняет роль управляемой задержки сигнала на время, не превышающее периода СВЧ колебаний.

Антенное полотно представляет собой прямоугольный каркас, в котором расположены антенные элементы (управляемые излучатели) и другая необходимая радиоаппаратура. Всего в составе ФАР может быть

несколько тысяч таких управляемых излучателей. Они идентичны по своим характеристикам, одинаково ориентированы в пространстве и располагаются на некотором расстоянии друг от друга, образуя строки и столбцы антенной решетки.

Принцип работы ФАР проходного типа:

1. Слабонаправленный рупор – источник передаваемого сигнала формирует ЭМВ со сферическим фазовым фронтом (на рис. 4 показана черным цветом).

2. Для формирования узкой ДН сферический фазовый фронт необходимо преобразовать в плоский, для чего формируется первая часть фазового распределения, компенсирующая кривизну сферического фазового фронта (на рис. 4 показана синим цветом).

3. Поскольку ЭМВ всегда распространяется по нормали к фазовому фронту, для управления положением луча необходимо наклонить весь фазовый фронт. Для этого формируется вторая часть фазового распределения (на рис. 4 показана красным цветом).

4. С помощью цифрового вычислителя фазы (ЦВФ) формируется суммарное фазовое распределение и заносится в управляющие цепи фазовращателей.

5. При прохождении полотна ФАР сферическая волна преобразуется в плоскую, имеющую необходимый наклон, что ориентирует луч выбранном направлении.

Аналогично ФАР работает и при приеме отраженного от цели сигнала. При этом падающая плоская волна преобразуется в сферическую с вогнутым фронтом и фокусируется на приемном рупоре, поскольку состояние фазовращателей осталось прежним.

2. Технические характеристики антенных систем РЛС.

Основными техническими характеристиками современных антенных систем являются:

- масса и габариты;
- рабочий диапазон длин волн;
- форма диаграммы направленности и ширина ее главного лепестка;
- время переноса луча из одного положения в другое, или доступная скорость сканирования;
- для ФАР дополнительной характеристикой является ширина рабочего сектора, в пределах которого возможно электронное управление лучом без потери качества ДН.

На современном этапе развития техники антенная система РЛС является одним из самых крупных и тяжелых элементов конструкции. Например, антенная система станции управления стрельбой имеет суммарную площадь раскрыва более 10 м². Поэтому для обеспечения мобильности аппаратуры во всех РЛС предусмотрена возможность складывания антенной системы.

Рабочий диапазон длин волн для РЛС обнаружения на малых высотах и РЛС управления стрельбой – сантиметровый, для РЛС обнаружения на средних и больших высотах – дециметровый.

Все антенны способны обеспечить ширину луча порядка 1 градуса. Однако следует учесть, что кроме основного луча ДН, у всех антенн есть еще боковые и фоновые лепестки ДН (рис. 5). Уровень боковых лепестков на 30-40 дБ (в 1000 – 10000 раз) ниже уровня основного лепестка.

Форма главного лепестка тоже может быть различной: для максимально точного определения двух угловых координат на больших дальностях следует использовать ДН игольчатой формы, а для одновременного просмотра всех доступных углов места на каждом конкретном азимуте следует формировать ДН узкую по азимуту и широкую по углу места – веерную или косекансную (рис. 6).

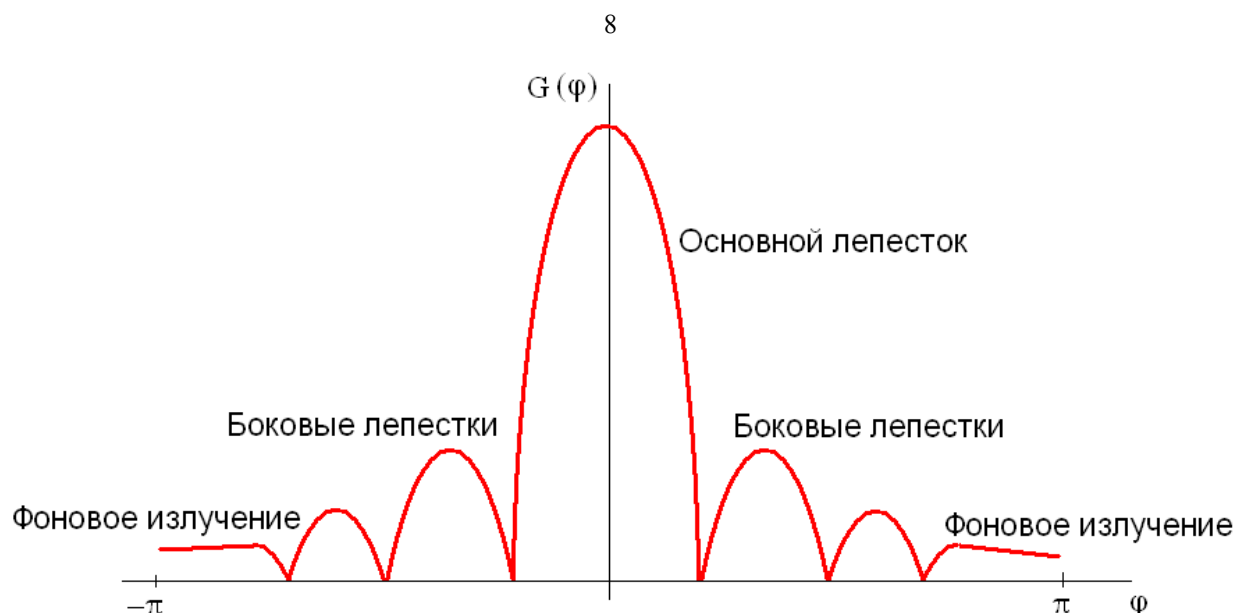


Рис.5. Форма ДН

главный лепесток игольчатой ДН



главный лепесток косекансной ДН



Рис. 6. Сечения диаграмм направленности в угломестной плоскости.

Важность учета формы ДН обусловлена тем, что обнаруживать слабые сигналы от цели РЛС может только главным лепестком ДН, а принимать мощные помеховые сигналы РЛС может и по боковым и по фоновым лепесткам. При этом помеховый сигнал, принятый боковым лепестком за счет высокой мощности (на 70-80 дБ больше целевого сигнала) помехи будет препятствовать обнаружению целей по главному лепестку.

Именно на постановке помех по боковым лепесткам ДН основывается применение СВЧН бортовой аппаратуры постановки активных помех в режиме взаимного прикрытия. Для снижения влияния помех, принимаемых боковыми лепестками ДН, применяются автокомпенсаторы помех и схемы подавления боковых лепестков, которые подробно будут рассмотрены на

занятии, посвященном принципам защиты от помех. Сейчас важно указать, что для работы таких устройств необходимо в антенной системе предусмотреть дополнительные слабонаправленные антенны.

Для обзорных РЛС важным параметром является скорость сканирования, прямо пропорциональная скорости обновления информации о воздушной обстановке. Она составляет от 6 до 25 оборотов в минуту у различных типов РЛС из состава ЗРС. Дополнительно к механическому круговому сканированию ФАР могут использовать электронное управление лучом, расширяя возможности станции.

Для современных РЛС управления стрельбой круговое сканирование не имеет смысла. Важность приобретает время переноса луча с одной цели на другую в пределах рабочего сектора, ширина которого может превышать 100° .

3. Особенности реализации антенных систем РЛС, используемых в системах вооружения ЗРВ.

3.1. Особенности АС импульсной обзорной РЛС

Рассматриваемая РЛС относится к станциям обнаружения на средних и больших высотах.

Основным элементом АС является *приемо-передающая антенна* на базе фазированной антенной решетки (ФАР) проходного типа. Возможность использования одной антенны на прием и передачу обусловлена применением импульсного ЗС. Диаграмма направленности антенны игольчатая, ширина главного лепестка составляет примерно $1,5^\circ$ градуса. Диапазон частот - дециметровый.

ФАР, совместно с *аппаратурой управления лучом*, обеспечивает возможность электронного перемещения луча в угломестной и азимутальной плоскостях в пределах сектора сканирования – от нормали к плоскости

антенны $60 - 70^\circ$ по углу места и $\pm 52,5^\circ$ по азимуту. Время переноса луча составляет сотни микросекунд. Азимутальный привод вращения задает вращение всей антенной системы вкруговую с частотой 6 или 12 оборотов в минуту. Сканирование пространства по угловым координатам осуществляется последовательно столбцевым методом рис. 7. Перемещение луча по азимуту - за счет вращения антенной системы и, при необходимости, электронным способом, по углу места только электронным способом.

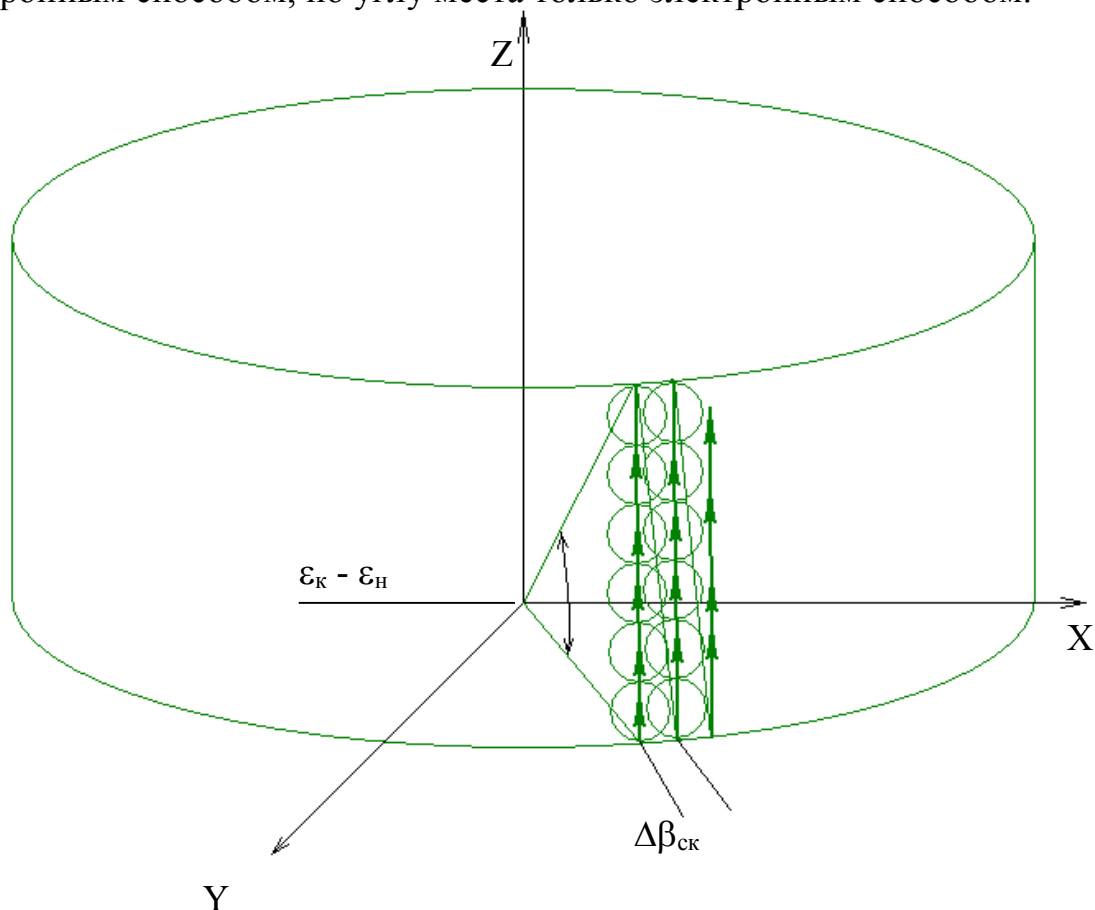


Рис. 7. Сканирование по угловым координатам в импульсной РЛС.

Особенностью антенной системы является возможность формирования луча обеими сторонами ФАР, для чего облучатели размещены по обеим сторонам антенного полотна. Это свойство позволяет визировать сопровождаемые цели с удвоенной частотой обращения (рис. 8).

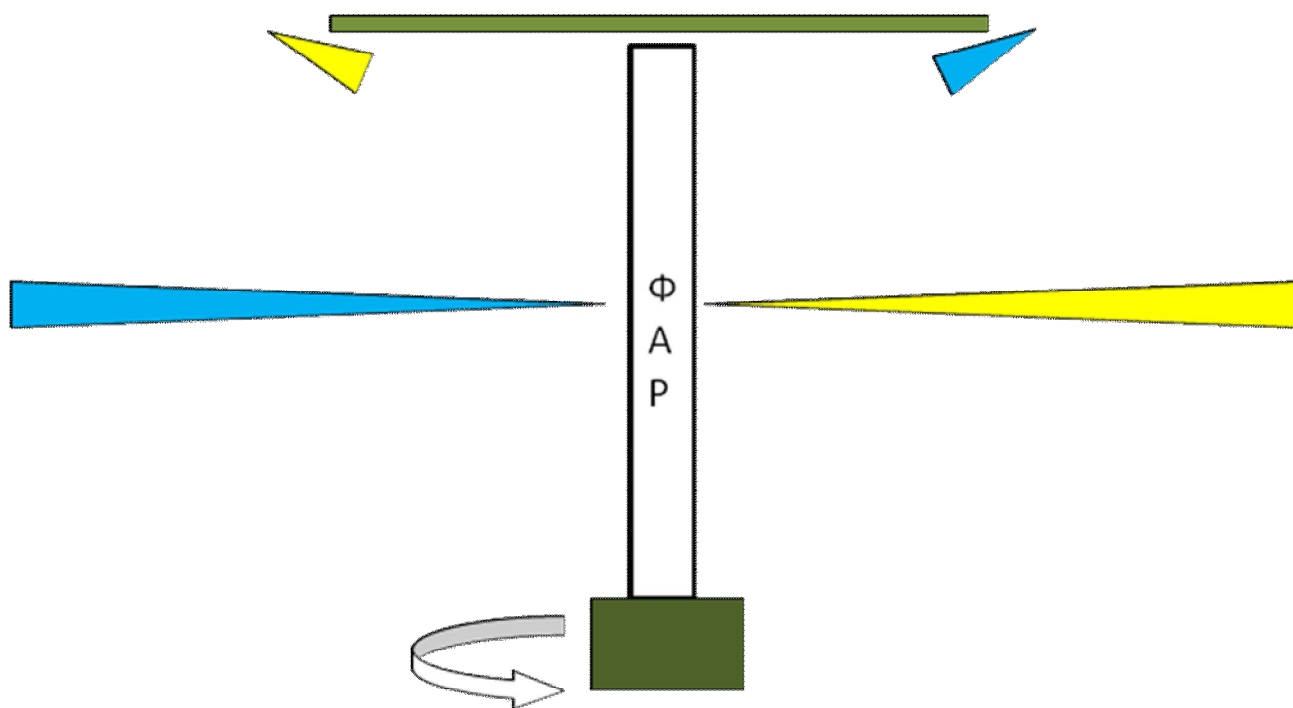


Рис. 8. Двухстороннее сканирование ФАР

Для определения государственной принадлежности целей в состав АС входит антенна наземного радиозапросчика.

Для защиты от активных шумовых помех (АШП), действующих по боковым лепесткам ДН, выделены антенны компенсационных каналов.

Особенностью волноводного тракта является наличие вращающегося сочленения между неподвижным РПУ и вращающимися АС и РПрУ.

3.2. Особенности АС непрерывной обзорной РЛС

Рассматриваемая доплеровская РЛС относится к станциям обнаружения на малых высотах. Для увеличения дальности прямой видимости ее АС размещается только на вышке высотой от 20 метров.

АС включает *приемную и передающую зеркальные антенны* разделенные экраном для защиты приемника от проникающего сигнала передатчика (рис. 9).

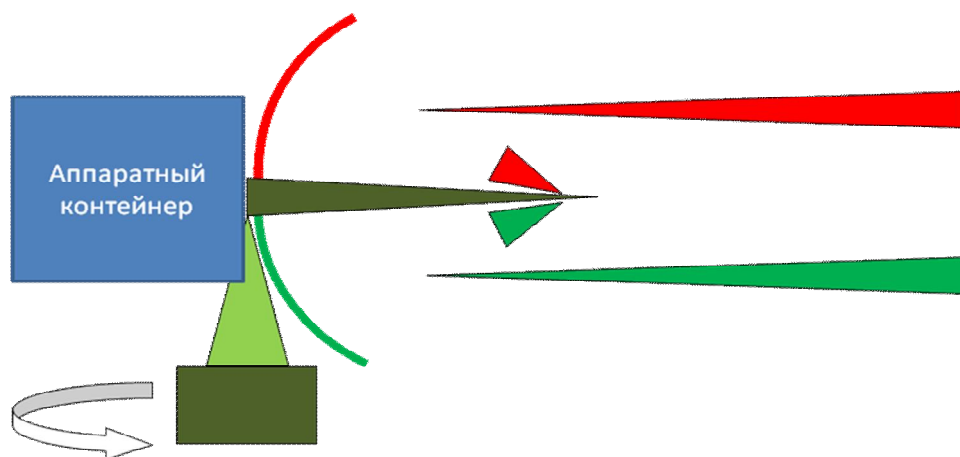


Рис. 9. Приемная и передающая зеркальные антенны

Антенная система позволяет формировать диаграммы направленности двух видов: косекансную или игольчатую (рис. 6). В азимутальной плоскости диаграммы обоих видов имеют одинаково малую ширину примерно в один градус. В угломестной плоскости рабочая часть косекансной диаграммы направленности обеспечивает примерно одинаковую интенсивность отраженных сигналов при различных наклонных дальностях до цели (т. е. передача и прием в направлении более удаленных целей ведутся с большей интенсивностью).

Диапазон длин волн - сантиметровый. Круговое сканирование по азимуту осуществляется за счет вращения антенной системы, совместно с аппаратным контейнером со скоростью более 20 оборотов в минуту.

Для защиты от АШП, действующих по боковым лепесткам ДН, в АС применяется антенна подавления боковых лепестков (ПБЛ).

Для определения государственной принадлежности целей в состав АС входит антенна наземного радиозапросчика.

3.3. Особенности АС РЛС управления стрельбой

Рассматриваемая РЛС является многофункциональной.

Основным элементом АС является *приемо-передающая антенна* на базе ФАР проходного типа. Возможность использования одной антенны на прием и передачу обусловлена:

- при работе по целям применением ЗС в виде когерентной пачки прямоугольных радиоимпульсов (КППРИ);
- при работе по ракетам применением импульсных кодов в линии радиосвязи РЛС-ракета.

Диаграмма направленности антенны игольчатая, ширина ее главного лепестка зависит от выбранного режима работы и может составлять величину менее одного градуса. Диапазон длин волн - сантиметровый.

Рабочее положение АС – наклонное (т.е не вертикальное). ФАР, совместно с *аппаратурой управления лучом*, обеспечивает возможность электронного перемещения луча в вертикальной и наклонной плоскостях, относительно нормали проведенной к антенному полотну. Максимальное отклонение луча в обеих плоскостях ограничено размерами рабочего сектора. Время переноса луча составляет сотни микросекунд.

Для изменения положения рабочего сектора применен азимутальный привод, обеспечивающий механический разворот антенной системы и контейнера с приемопередающей аппаратурой.

Для определения государственной принадлежности целей в состав АС входит ФАР наземного радиозапросчика.

Для защиты АШП, действующих по боковым лепесткам ДН, используются дополнительные слабонаправленные компенсационные антенны, также реализованные на базе ФАР.

Антенная система установлена на аппаратном контейнере с приемо-передающей аппаратурой и может эффективно вести боевую работу как с шасси автомобиля МАЗ (рис. 10), так и с вышки высотой 20 или 40 м.



Рис. 10. АС РЛС управления стрельбой

Приемный и передающий облучатели ФАР должны находиться в фокусе антенны, поскольку в одной точке расположить два облучателя невозможно, то для обеспечения их пространственного разнеса и развязки между приемным и передающим трактами используется *поляризационный фильтр* (рис. 11).

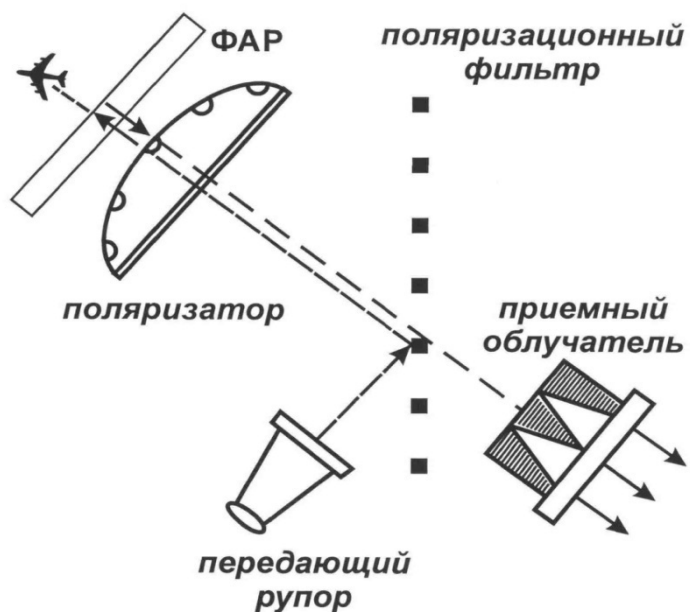


Рис. 11. Принцип действия поляризационного фильтра.

Он представляет собой систему металлических струн, натянутых параллельно вектору напряженности электрического поля излучаемой ЭМВ. Расстояние между струнами выбрано таким, чтобы падающий на них зондирующий сигнал (волна с горизонтальной поляризацией) отражался в плоскость антенной решетки, а принимаемый отраженный (это волна с вертикальной поляризацией) проходил практически без потерь в приемный облучатель.

После отражения от поляризационного фильтра СВЧ энергия от передатчика проходит через поляризатор, преобразующий линейную поляризацию волны в круговую.

Поляризатор представляет собой систему плоских параллельных металлических пластин, образующих сферическую поверхность. Пластины расположены под углом 45° к направлению вектора электрического поля падающей волны, которую можно представить в виде суммы двух составляющих: параллельной плоскости поляризатора и перпендикулярной ей.

Первая из них проходит между пластинами как в волноводе и изменяет свою скорость, а вторая (перпендикулярная) проходит через устройство без изменения фазовой скорости. В результате на выходе поляризатора между ними возникает фазовый сдвиг. Ширина пластин выбрана такой, чтобы этот сдвиг составлял 90° и обеспечивал тем самым образование волны с круговой поляризацией и левым направлением вращения.

В пространстве ЗС отражается от цели. При этом сохраняется круговая поляризация, но направление ее вращения меняется на противоположное.

При работе АС на прием на поляризатор падает волна с круговой поляризацией и правым направлением вращения, которая после прохождения через него преобразуется в волну с линейной вертикальной поляризацией, проходит через поляризационный фильтр и фокусируется в приемной облучателе.

В рассматриваемой РЛС используется *суммарно-разностная обработка* принимаемых сигналов, поэтому приемный облучатель имеет три канала: один суммарный и два разностных и называется *моноимпульсным приемным облучателем* (МПО). Конструктивно он представляет собой систему рупоров, состоящую из основного облучателя и четырех дополнительных рупоров (рис.12).

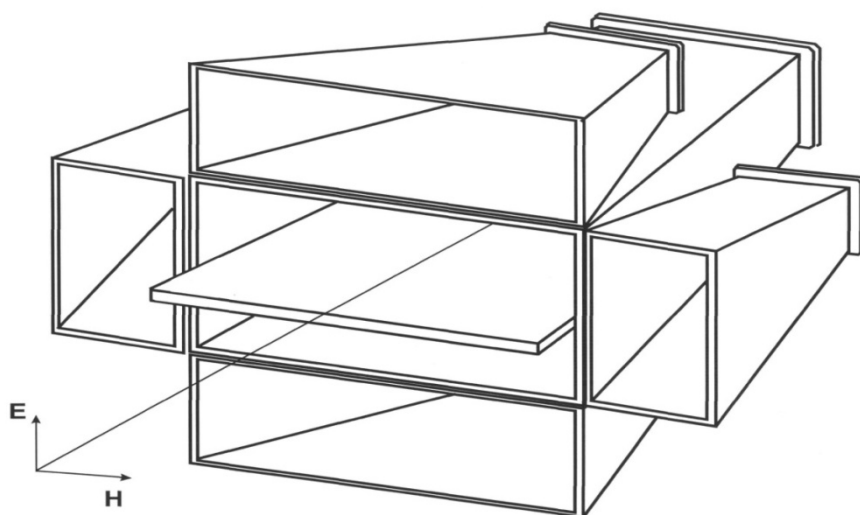


Рис. 12. Внешний вид моноимпульсного приемного облучателя.

Основным двухрупорным облучателем является сдвоенный прямоугольный волновод с общей стенкой в Н-плоскости. При своем возбуждении он формирует в каждой плоскости пеленгации по две парциальные (то есть частичные) приемные диаграммы направленности (рис. 13), разнесенные в пространстве на половину ширины и имеющие единый фазовый центр.

Дополнительные рупоры располагаются попарно вертикально и горизонтально относительно основного облучателя и участвуют только в формировании разностных диаграмм. МПО имеет три выходных канала, сигналы которых с помощью волноводных тройников формируются из сигналов, принимаемых различными ДН приемного облучателя.

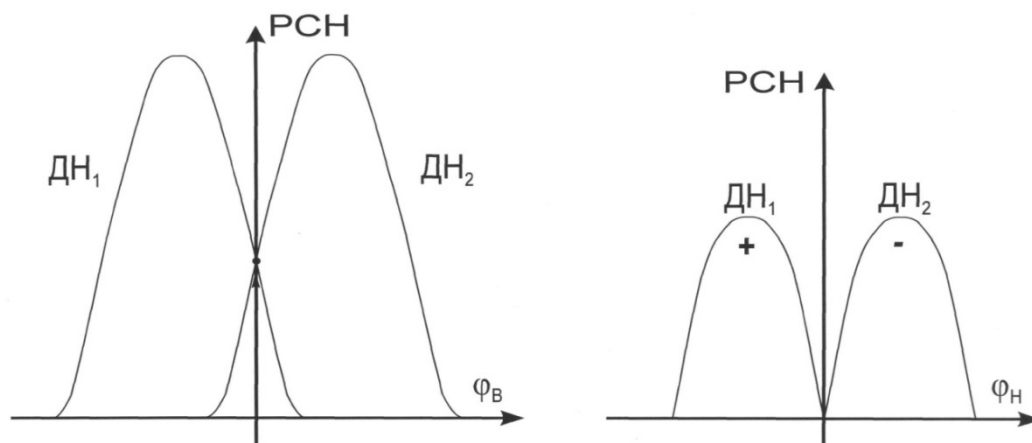


Рис. 13. Парциальные диаграммы направленности МПО.

Выход Σ основного облучателя формирует суммарный сигнал на основе принимаемой всеми рупорами СВЧ энергии.

Выход $\Delta\varphi_{\text{в}}$ формирует разностный сигнал в вертикальной плоскости.

Выход $\Delta\varphi_{\text{н}}$ - формирует разностный сигнал в наклонной плоскости.

Таким образом, с выходов МПО по приемному волноводному тракту, также состоящему из трех каналов, на входное приемное устройство сопровождения одновременно поступает три сигнала - суммарный и два разностных.

ЗАДАНИЕ НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ РАБОТУ:

Повторить учебный материал. Подготовиться к контрольной работе.