

Занятие 9. Принципы построения радиолокационных систем и устройств.

Введение

Сфера применения радиолокационной техники в настоящее время очень широка, а с применением достижений современной схмотехники, радиоэлектронных технологий и вычислительной техники – все более расширяется. Это объясняется, прежде всего, уникальными свойствами РВ, с помощью которых можно производить различные исследования с широким спектром объектов. Поэтому рассмотрение основных принципов, используемых при построении радиолокационных устройств и систем, является весьма актуальным.

Для достижения поставленных целей рассмотрим следующие вопросы:

1. Классификация радиолокационных станций.
2. Принцип действия простейшей радиолокационной станции.
3. Размещение аппаратуры радиолокационных систем в пространстве.

Данный учебный материал можно найти в следующих **источниках**:

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004.
2. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М.: Советское радио, 1975.

1. Классификация радиолокационных станций.

РЛС классифицируют по следующим признакам:

происхождению радиосигнала, принимаемого приемником РЛС (активные РЛС (с активным и пассивным ответом), полуактивные и пассивные РЛС);

используемому диапазону РВ (РЛС декаметрового, метрового, дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов);

виду зондирующего сигнала (РЛС с непрерывным (немодулированным или частотно-модулированным) и импульсным (некогерентным, когерентно-импульсным с большой и малой скважностью, с внутриимпульсной частотной или фазовой модуляцией) излучением);

числу применяемых каналов излучения и приема сигналов (одноканальные и многоканальные с частотным или пространственным разделением каналов);

числу и виду измеряемых координат (одно-, двух- и трехкоординатные);

способу измерения, отображения и съема координат объекта;

месту установки РЛС (наземные, корабельные, самолетные, спутниковые);

функциональному назначению РЛС (от малогабаритных переносных РЛС измерения скорости автомобилей до огромных наземных РЛС систем противовоздушной (ПВО) и противоракетной (ПРО) обороны).

Перечислим основные типы наземных, корабельных и самолетных РЛС различного назначения.

Основные типы *наземных РЛС*:

обнаружения воздушных целей и наведения на них истребителей;

управления воздушным движением (обзорные и диспетчерские);

обнаружения и определения координат баллистических ракет (БР) и искусственных спутников Земли (ИСЗ);

целеуказания станциям управления зенитной артиллерией и наведения зенитных управляемых ракет (ЗУР);

управления зенитной артиллерией и ЗУР;
обнаружения минометов;
метеорологические;
обзора акватории порта;
обзора летного поля;
обнаружения и определения скорости наземных движущихся объектов.

Основные типы *корабельных РЛС*:

обеспечения кораблевождения;

обнаружения надводных объектов и низколетящих ЛА, определения их координат;

обнаружения и определения координат высоколетящих самолетов;

управления ЗУР и зенитной артиллерией;

обнаружения и определения координат БР и ИСЗ.

Основные типы *самолетных РЛС*:

радиолокационные дальномеры;

радиовысотомеры;

доплеровские измерители путевой скорости и угла сноса самолета;

РЛС обнаружения самолетов и предотвращения столкновений;

панорамные РЛС обзора земной поверхности;

РЛС бокового обзора (в том числе и с синтезированным раскрытием антенны);

РЛС перехвата и прицеливания;

РЛС наведения управляемых ракет;

радиолокационные взрыватели.

По назначению РЛС подразделяют на обзорные и следящие.

Обзорные РЛС применяют для обнаружения и измерения координат всех целей в данной области пространства или земной поверхности, а также для управления воздушным движением (УВД) ПВО и ПРО, разведки, получения метеорологической информации и т.п.

Следящие РЛС выполняют функцию точного и непрерывного определения координат одной или ряда целей. Полученная РЛС информация используется, например, для наведения оружия на цель или для управления объектом.

Различают автономные и неавтономные системы и устройства. *Автономные* работают самостоятельно без помощи других радиоэлектронных устройств и не используют радиолиний, связывающих бортовую аппаратуру данного объекта с внешними по отношению к нему системами и устройствами. В таких радиосистемах реализуется принцип однопозиционной радиолокации, т.е. информация об элементах извлекается из отраженного от земной поверхности или цели сигнала.

Неавтономные имеют в своем составе как бортовую аппаратуру, установленную на объекте, так и связанную с ней радиолинией аппаратуру специальных радиоустройств, размещаемых в наземных пунктах или на других объектах, т.е. реализуется принцип многопозиционной радиолокации.

Основными характерными признаками сигнала являются вид излучаемого (зондирующего) сигнала (непрерывный или импульсный), тип модуляции, динамический диапазон мощности, ширина спектра и др.

По виду измеряемого элемента различают угломерные, дальномерные и разностно-дальномерные устройства, а также устройства измерения скорости.

Угломерные устройства радиолокаторов определяют угол между опорным направлением и направлением на объект в горизонтальной или вертикальной плоскости (измеряют пеленг) в соответствующей СК. К этим устройствам (радиопеленгаторам) относят средства, которые позволяют найти угловые координаты источника излучения электромагнитных колебаний по результатам измерения направления прихода радиоволн.

Дальномерные устройства (радиодальномеры) предназначены для измерения расстояния до объекта. Обычно радиодальномеры измеряют запаздывание отраженного объектом сигнала относительно собственного

излученного (зондирующего) сигнала. Дальномеры – часть большинства РЛС, они также применяются самостоятельно, например, для нахождения высоты полета ЛА (радиовысотомеры). Дальномеры могут реализовать принцип запрос – ответ, когда дальность измеряется по ретранслируемому сигналу.

Приведенная классификация включает далеко не все используемые типы РЛС. Однако и перечисленных типов достаточно для характеристики широты и многообразия применения радиолокационных средств.

2. Принцип действия простейшей радиолокационной станции.

Как уже говорилось в предыдущих лекциях, физической основой радиолокации является рассеяние радиоволн объектами, отличающимися своими электрическими характеристиками от соответствующих характеристик окружающей среды при их облучении. Причем интенсивность рассеяния или отражения РВ (интенсивность вторичного поля) зависит от степени отличия электрических характеристик объекта и среды, от формы объекта, от соотношения его размеров и длины волны, от поляризации РВ. Результирующее вторичное ЭМП состоит из поля отражения, распространяющегося в сторону облучающего первичного поля, и теневого поля, распространяющегося за объект (в ту же сторону, что и первичное поле).

С помощью приемной антенны и приемного устройства (Прм) можно принять часть рассеянного сигнала, преобразовать и усилить его для последующего обнаружения. Таким образом, простейшая РЛС может состоять из передатчика (Прд), формирующего и генерирующего радиосигналы, передающей антенны, излучающей эти радиосигналы, приемной антенны, принимающей отраженные сигналы, радиоприемника, усиливающего и преобразующего сигналы и, наконец, выходного устройства (ВУ), обнаруживающего отраженные сигналы (рис. 3.1).

Как правило, амплитуда (или мощность) принимаемого сигнала мала, а сам сигнал имеет случайный характер. Малая мощность сигнала объясняется большим расстоянием до объекта (цели) и поглощением энергии сигнала при его распространении. Кроме того, на интенсивность отраженного сигнала существенно влияют размеры целей. Случайный характер сигнала является следствием флуктуации отраженного сигнала за счет случайного перемещения элементов цели сложной формы при отражении РВ, многолучевого РРВ, хаотических изменений амплитуды сигнала при распространении и ряда других факторов. В результате принимаемый сигнал

по виду, интенсивности и характеру изменения похож в приемном тракте на шумы и помехи. Поэтому первой и основной задачей РЛС является обнаружение полезного радиосигнала, т.е. вынесение решения о присутствии полезного сигнала в поступающей на вход приемного тракта смеси полезного сигнала с помехами, называемой *входной реализацией*. Эта статистическая задача решается входящим в радиолокационное устройство (РЛУ) специальным устройством – обнаружителем, в котором стараются использовать алгоритм оптимального (наилучшего) обнаружения. Качество процесса обнаружения характеризуют вероятностью правильного обнаружения, когда присутствующий во входной реализации сигнал обнаруживается, и вероятностью ложной тревоги, когда за полезный сигнал принимается помеха, а сам сигнал отсутствует.

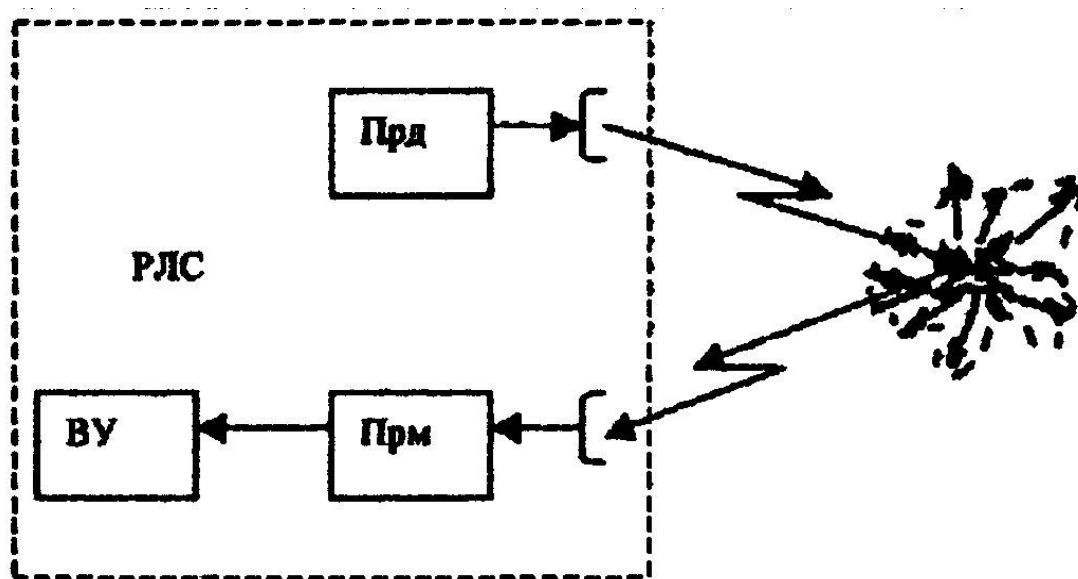


Рис. 3.1. Принцип действия простейшей РЛС

Большинство параметров принимаемого сигнала априори неизвестны, поэтому при обнаружении приходится осуществлять поиск нужного параметра радиосигнала, отличающего его от сопутствующих шумов и помех.

Передатчик формируют мощные высокочастотные колебания. В зависимости от того, какая антенна используется в РЛС, может быть реализован в модульном варианте и встроен в активную ФАР, либо в виде модулятора и однокаскадного или многокаскадного генератора радиочастоты для пассивной ФАР или зеркальной антенны.

Приемник обеспечивает прием, обработку и выделение информации из принятого сигнала.

Короткие зондирующие импульсы через антенну излучаются в пространство. При наличии на пути распространения радиоволн объекта (цели) часть электромагнитной энергии отражается обратно в сторону РЛС. Отраженный сигнал через антенну поступает в приемник, усиливается и поступает в выходное устройство для индикации и (или) обработки (обнаружитель, измерители).

Построение РЛС на базе современных технологий обработки информации заключается:

в использовании в качестве антенн фазированной антенной решетки (ФАР), работающей на передачу и прием сигналов;

в качестве генератора пусковых импульсов синтезатора частоты – синхронизатора, регламентирующего во времени порядок работы и взаимодействия основных блоков РЛС;

в качестве выходного устройства – цифрового процессора.

В итоге перспективная РЛС (рис. 3.2) состоит из ФАР, синтезатора-синхронизатора, аналогового процессора (приемника), цифрового процессора и устройства отображения информации.

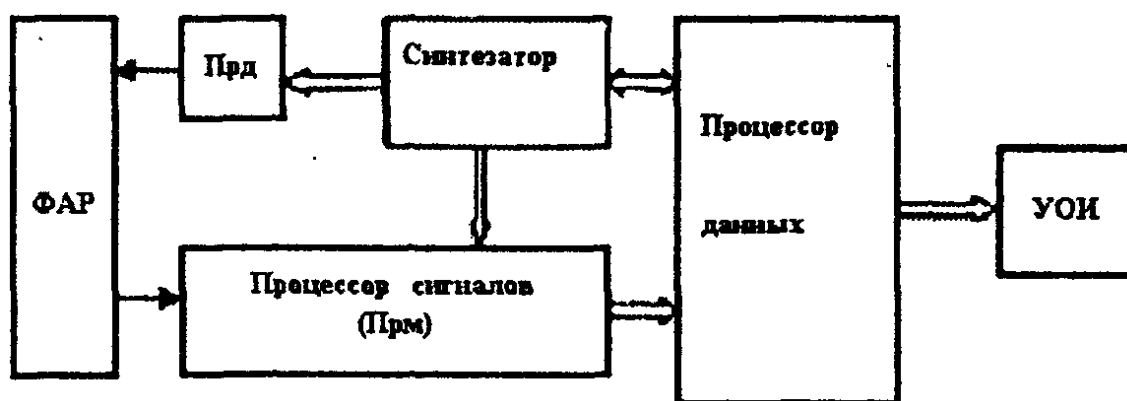


Рис. 3.2. Принцип построения современной импульсной РЛС

Антенна по сигналам от цифровой вычислительной машины (ЦВМ) осуществляет формирование лучей и их перемещение для обзора пространства. Радиопередатчик формирует зондирующие сигналы, которые излучаются антенной. Радиоприемник усиливает слабые отраженные целью и принятые антенной сигналы. Поскольку эти сигналы приходят в смеси с шумами и помехами, то их выделение осуществляется с помощью согласованных фильтров сосредоточенной селекции и цифровых фильтров. Обычно процессор сигналов (приемник) выдает электрические сигналы в цифровом коде. Дальнейшая обработка сигналов выполняется в процессоре данных по заложенным в него программам алгоритмов обработки. Рабочие частоты и временные интервалы в РЛС задаются с помощью синтезатора-синхронизатора. Устройство отображения информации (УОИ) выполняется обычно на индикаторе с электроннолучевой трубкой или на дисплее процессора.

Количество одновременно обнаруживаемых и сопровождаемых целей определяется быстродействием систем обработки информации – выходного устройства, в качестве которого обычно используется цифровой процессор.

Типичное изображение на экране индикатора кругового обзора (ИКО) РЛС управления воздушным движением (УВД) показано на рис. 3.3, а. Здесь можно различить светящиеся радиальные и круговые метки. В центре экрана

«находится» РЛС. Яркие точки — отметки целей. По радиусу можно отсчитать дальность, а по углу поворота радиуса, проходящего через отметку цели, относительно вертикали, проходящей через центр экрана, можно измерить пеленг цели. К каждой отметке на экране «прикреплен» формуляр, который содержит необходимую информацию о бортовом номере, высоте, дальности и азимуте самолета (рис. 3.3, б). На рис. 3.3 для лучшей различимости проведено инвертирование изображения.

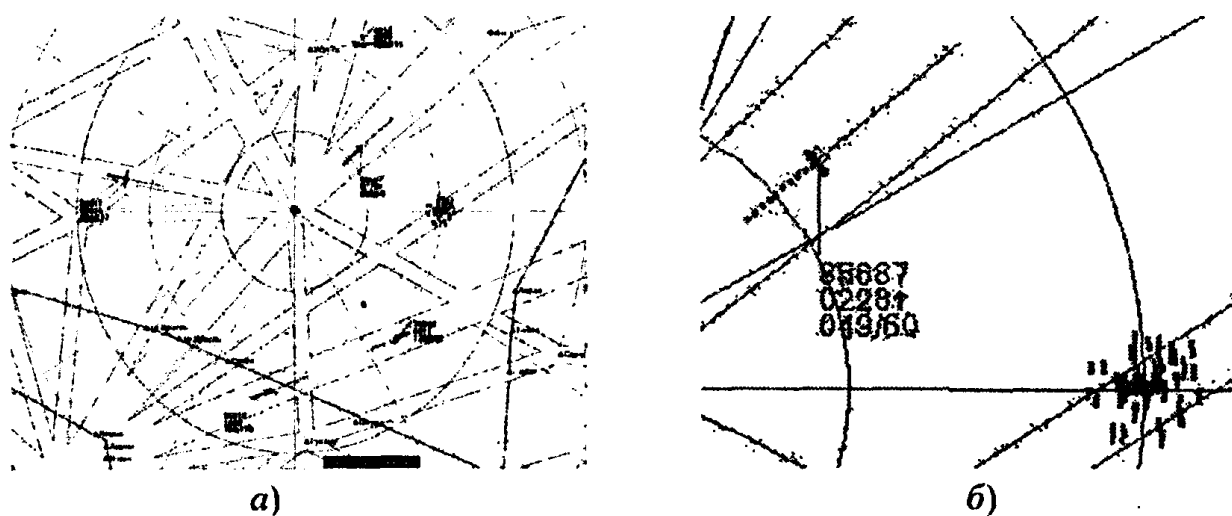


Рис. 3.3. Вид экрана РЛС УВД:

а – общий вид экрана; б – укрупненное изображение фрагмента экрана с формуляром

Таким образом, простейшая РЛС состоит Прд, Прм, антенного устройства, вычислительного устройства и УОИ. Помимо обнаружения объектов, УОИ РЛС выводит и другую информацию о целях, позволяющую идентифицировать объекты.

3. Размещение аппаратуры радиолокационных систем в пространстве.

По характеру размещения частей аппаратуры в пространстве различают однопозиционные, двухпозиционные (бистатические) и многопозиционные РЛС. Последние два типа РЛС отличаются тем, что их аппаратура разнесена в пространстве, и эти РЛС могут функционировать как самостоятельно, так и совместно (разнесенная радиолокация). Благодаря пространственному разнесению элементов в таких системах достигаются большие информативность и помехозащищенность, однако сама система усложняется.

Однопозиционные радиолокационные системы (ОПРЛС) отличаются тем, что вся аппаратура располагается на одной позиции. Такие системы представляют собой РЛС. В ОПРЛС реализуется активный или пассивный вид радиолокации. При активной радиолокации с активным ответом аппаратура запросчика располагается в одной точке пространства, а ответчика – в другой. В зависимости от назначения РЛС и типа используемых сигналов структурные схемы ОПРЛС могут быть конкретизированы и при этом значительно отличаться друг от друга. Рассмотрим в качестве примера работу импульсной активной РЛС обнаружения воздушных целей для УВД, структура которой приведена на рис. 3.4. Устройство управления обзором (управления антенной) служит для просмотра пространства (обычно кругового) лучом антенны, узким в горизонтальной плоскости и широким в вертикальной.

В рассматриваемой ОПРЛС используется импульсный режим излучения, поэтому в момент окончания очередного зондирующего радиоимпульса единственная антенна переключается от Прд к Прм и используется для приема до начала генерации следующего зондирующего радиоимпульса, после чего антенна снова подключается к передатчику и т.д.

Эта операция выполняется переключателем прием-передача (ППП). Импульсы запуска, задающие период повторения зондирующих сигналов и синхронизирующие работу всех подсистем ОПРЛС, генерирует синхронизатор

(Синх). Сигнал с Прм после аналого-цифрового преобразователя (АЦП) поступает на аппаратуру обработки информации – процессор сигналов, где выполняется первичная обработка информации, состоящая в обнаружении сигнала и измерении координат цели. Отметки целей и трассы траекторий формируются при вторичной обработке информации в процессоре данных.

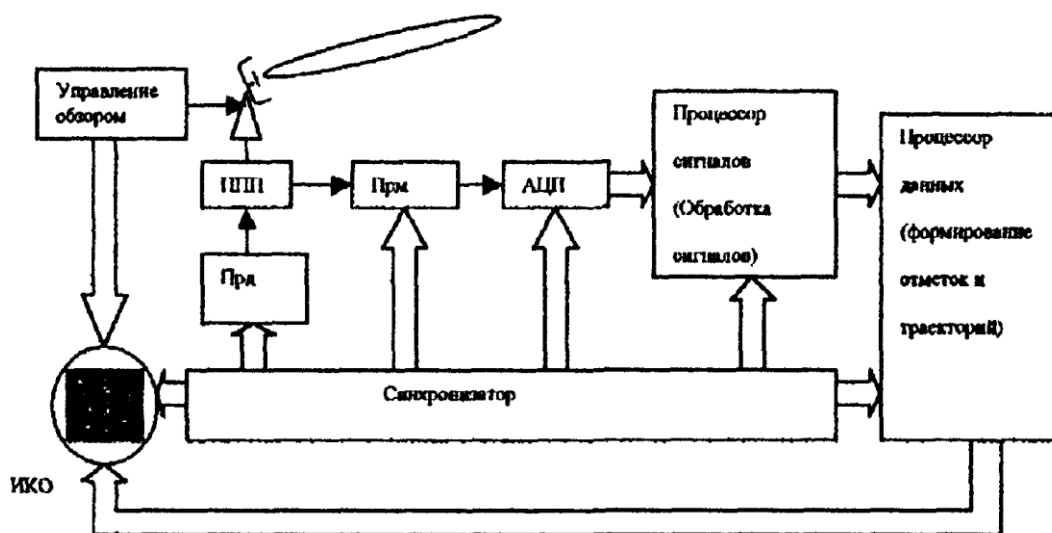


Рис. 3.4. Структурная схема РЛС обнаружения воздушных целей

Сформированные сигналы вместе с информацией об угловом положении антенны передаются для дальнейшей обработки на командный пункт, а также для контроля на ИКО. При автономной работе радиолокатора ИКО служит основным элементом для наблюдения воздушной обстановки. Такая РЛС обычно ведет обработку информации в цифровой форме. Для этого предусмотрено устройство преобразования сигнала в цифровой код (АЦП).

Бистатические радиолокационные системы (БиРЛС) представляют собой РЛС, в которых передающая и приемная части расположены в различных точках пространства (рис. 1.6, г). Такие БиРЛС основаны на активном виде радиолокации.

Многопозиционные радиолокационные системы (МПРЛС) (рис. 3.5) в общем случае объединяют однопозиционные (ОПРЛС1 и ОПРЛС2),

бистатические (БиРЛС1 — БиРЛС6) и пассивные (ПРЛС1 — ПРЛС4) РЛС, расположенные в различных точках пространства (позициях). Расстояние между позициями РЛС называется базой (Б).

На рис. 3.6 показана структура МПРЛС, имеющей общую передающую и три разнесенные приемные позиции. Такую МПРЛС называют *полуактивной*. Частным случаем полуактивной системы является БиРЛС. МПРЛС имеют несколько баз, которые обозначаются B_{jk} , где индексы j и k соответствуют номерам или названиям позиций. Следует отметить, что в зависимости от тактического назначения МПРЛС и размещения ее элементов базы системы могут менять положение и размеры при перебазировании системы или при размещении аппаратуры МПРЛС на подвижных объектах, в том числе на атмосферных ЛА. Часто используется смешанное базирование МПРЛС, например, передающая аппаратура на ЛА, а приемная на Земле, и наоборот. Если при перемещении или перебазировании взаимное расположение позиций не изменяется, т.е. $B_{jk} = \text{const}$, то такие МПРЛС называют МПРЛС с *неподвижными базами*. Все другие системы составляют группу МГТРЛС с *подвижными базами*.

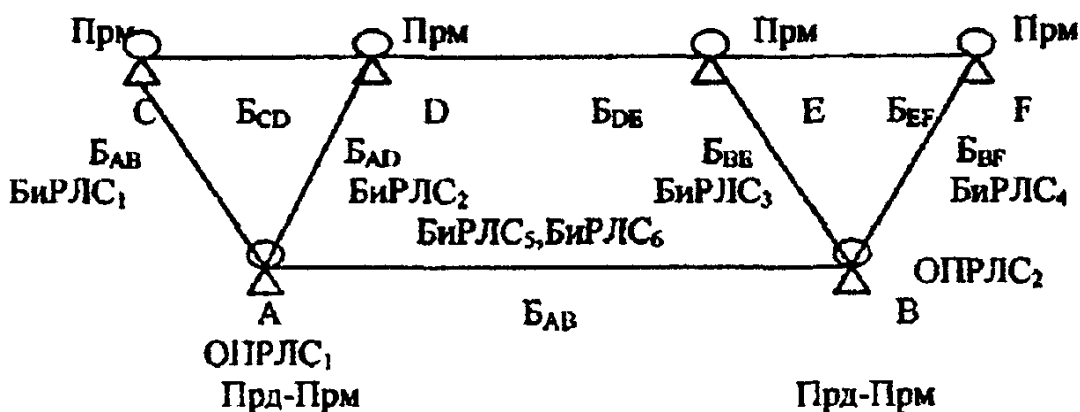


Рис. 3.5. Вариант структуры МПРЛС

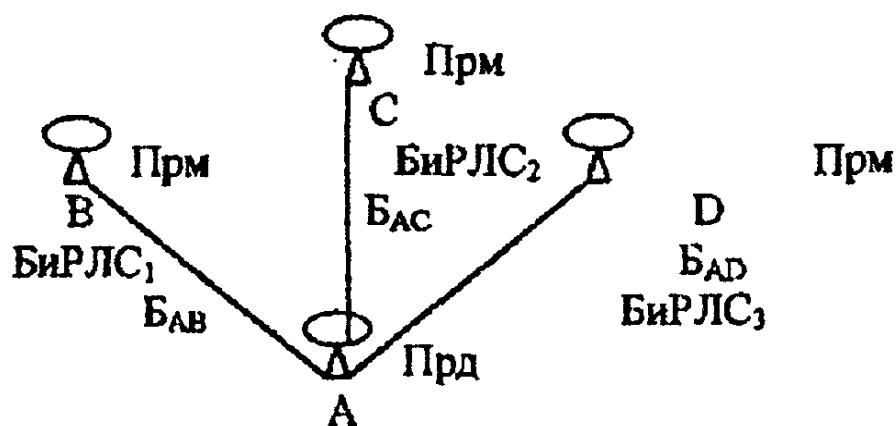


Рис. 3.6. Структура МПРЛС, состоящей из БиРЛС

В современных МПРЛС используются как отдельные виды радиолокации, так и их совокупность, в них также можно применять различные методы определения местоположения целей в пространстве. Эти особенности приводят к большей помехозащищенности системы в целом. При разнесении РЛС в пространстве на каждой позиции может размещаться приемная аппаратура (*пассивная* МПРЛС), приемная и передающая аппаратура (*пассивно-активная* МПРЛС) или аппаратура ОПРЛС (*активная* МПРЛС).

В обобщенной структуре МПРЛС (рис. 3.7) можно выделить основные компоненты системы: аппаратуру разнесенных позиций (П), каналы передачи информации (1), каналы синхронизации (2) и пункт обработки информации ПОИ, где поступающие от разнесенных позиций сигналы и информация объединяются и обрабатываются совместно, что позволяет реализовать ряд преимуществ МПРЛС перед однопозиционной РЛС.

Основные из этих преимуществ: возможность формирования сложных пространственных зон обзора; лучшее использование энергии в системе; большая точность измерения местоположения целей в пространстве; возможность измерения полного вектора скорости целей; повышение помехозащищенности по отношению к активным и пассивным помехам, а также увеличение надежности выполнения тактической задачи.

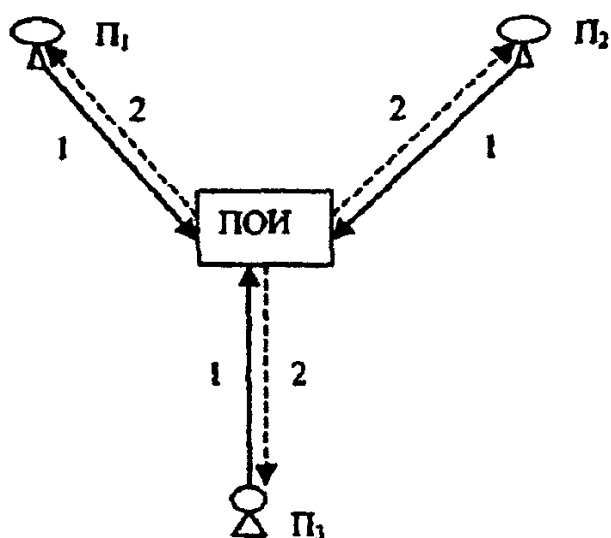


Рис. 3.7. Обобщенная структурная схема МПРЛС

Однако эти преимущества достигаются ценой увеличения сложности и стоимости системы. Возникает необходимость синхронизации работы позиций (в том числе и при обзоре пространства) и организации линий передачи данных. Возрастает и сложность обработки информации из-за большого ее объема. Однако, несмотря на указанные недостатки, МПРЛС получили широкое распространение в практике радиолокации. В зависимости от задачи, решаемой в процессе обработки информации в МПРЛС, различают первичный, вторичный и третичный виды обработки.

Первичная обработка заключается в обнаружении сигнала цели и измерении ее координат с соответствующими качеством или погрешностями. *Вторичная обработка* предусматривает определение параметров траектории каждой цели по сигналам одной или ряда позиций МПРЛС, включая операции отождествления отметок целей. При *третичной обработке* объединяются параметры траекторий целей, полученных различными приемными устройствами МПРЛС с отождествлением траекторий.

В зависимости от использования на разнесенных в пространстве позициях фазовой информации, содержащейся в отраженных от цели сигналах, различают МПРЛС *пространственно-когерентные*, с

кратковременной пространственной когерентностью и пространственно-некогерентные.

Под пространственной когерентностью понимают способность сохранять жесткую связь фаз высокочастотных сигналов на разнесенных позициях. Степень пространственной когерентности зависит от длины волны сигнала, величины баз МПРЛС и размеров цели, а также от неоднородностей параметров трасс распространения радиоволн.

Если цель можно считать точечной, то фазовый фронт волны имеет форму сферы, а принимаемые на разнесенных позициях сигналы жестко связаны по фазе и когерентны. При протяженных целях фазовый фронт формируется в процессе интерференции электромагнитных волн от локальных центров отражения («блестящих» точек) цели. Большая протяженность цели приводит к флуктуациям фазового фронта, которые могут нарушить пространственную когерентность (корреляцию) сигналов, принятых на разнесенных позициях.

При однородной среде распространения и малой базе ($B \rightarrow 0$) сигналы на входе приемных устройств идентичны и когерентны. С увеличением базы сигналы начинают различаться в основном из-за многолепесткового характера диаграммы обратного рассеяния (ДОР) цели. При некотором размере базы

$$Bj = D\lambda / 4l_y, \quad (3.1)$$

где D – дальность до цели, l_y – наибольший размер цели, приемные позиции принимают отраженные от цели сигналы по разным лепесткам ДОР. Эти сигналы независимы и не коррелированы.

Пространственно-когерентные РЛС извлекают всю информацию, содержащуюся в пространственной структуре поля РВ, вплоть до фазовых соотношений. В этих РЛС фазовые набег в каналах приема и обработки сигналов различных пространственных позиций одинаковы в интервалах времени, намного превышающих длительность сигнала (истинно когерентные системы). Поэтому аппаратура позиций синхронизируется во времени, а

также по частоте и фазе высокочастотных колебаний. Разнесенные позиции образуют специфически расположенную ФАР.

Системы с кратковременной пространственной когерентностью имеют постоянство фазовых соотношений в трактах аппаратуры позиций в пределах длительности используемого сигнала (псевдокогерентные системы). При этом можно извлекать информацию о доплеровских частотах по изменению фаз в пределах длительности сигнала, но нельзя осуществлять фазовую пеленгацию, поскольку принимаемые на позициях сигналы некогерентны в один и тот же момент времени. Аппаратура позиций синхронизируется по времени и частоте, но не по фазе.

Пространственно-некогерентные РЛС обрабатывают сигналы после их детектирования, но до объединения в пункте обработки информации МПРЛС. Здесь не требуется синхронизация аппаратуры позиций по частоте и фазе. Нужно отметить, что пространственная некогерентность не противоречит временной когерентности сигналов, поступающих в аппаратуру каждой позиции. Поэтому на каждой позиции можно измерять радиальную составляющую скорости по доплеровскому сдвигу частоты.

В пункте обработки информации возможно объединение когерентных сигналов (когерентное объединение), видеосигналов, обнаруженных отметок и единичных замеров (результатов однократного измерения параметров сигнала и других элементов), а также объединение траекторий.

Когерентное объединение – наивысший уровень объединения информации. Радиочастотные сигналы от позиций МПРЛС поступают на центральный пункт обработки информации, где выполняются все операции обнаружения, отождествления и определения параметров движения цели и ее местоположения. Система, в которой осуществляется когерентное объединение сигналов, обладает наибольшими возможностями, так как в ней можно использовать пространственную когерентность сигналов, при которой отсутствуют случайные изменения разности фаз сигналов, принимаемых на позициях МПРЛС. Такая система отличается наибольшей простотой аппа-

ратуры приемных позиций, однако усложняется ПОИ и требуются широкополосные линии передачи сигналов с высокой пропускной способностью.

Объединение траекторий – низший уровень объединения информации. С позиций сигналы поступают после вторичной обработки и отбраковки ложных отметок целей, поэтому большинство вычислительных операций выполняется на позициях МПРЛС, аппаратура которых наиболее сложна. Аппаратура центра обработки информации упрощается, и линии связи работают в наиболее легких условиях.

Таким образом, по характеру размещения частей аппаратуры в пространстве различают однопозиционные, двухпозиционные (бистатические) и многопозиционные РЛС. В МПРЛС обработка информации производится в несколько этапов, а затем объединяется. Чем выше уровень объединения информации, т.е. чем меньше информации теряется на приемных позициях до совместной обработки, тем выше энергетические и информационные возможности МПРЛС, но тем сложнее аппаратура центрального пункта обработки и выше требования к пропускной способности линий передачи информации.

Заключение

1. Радиолокационные средства характеризуются широтой и многообразием применения.

2. Простейшая РЛС состоит Прд, Прм, антенного устройства, вычислительного устройства и УОИ.

3. Помимо обнаружения объектов, УОИ РЛС выводит и другую информацию о целях, позволяющую идентифицировать объекты.

4. По характеру размещения частей аппаратуры в пространстве различают однопозиционные, двухпозиционные (бистатические) и многопозиционные РЛС.

5. В МПРЛС обработка информации производится в несколько этапов, а затем объединяется. Чем выше уровень объединения информации, т.е. чем меньше информации теряется на приемных позициях до совместной обработки, тем выше энергетические и информационные возможности МПРЛС, но тем сложнее аппаратура центрального пункта обработки и выше требования к пропускной способности линий передачи информации.

Контрольные вопросы:

1. Классификация РЛС.
2. Структурная схема и функционирование простейшей РЛС.
3. Структурная схема и функционирование современной импульсной РЛС.
4. Структурная схема и функционирование РЛС обнаружения воздушных целей.
5. Структуры построения МПРЛС.
6. Обработка информации в МПРЛС.

Задание на самостоятельную подготовку:

1. Изучить материалы лекции.
2. Подготовиться к контрольной работе по контрольным вопросам.

Литература:

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004.
2. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М.: Советское радио, 1975.