

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

Занятие № 7. Общие сведения о радиопередающих устройствах, используемых в системах вооружения ЗРВ.

Учебные вопросы

1. Радиопередающее устройство РЛС.
2. Радиоприемное устройство РЛС.
3. Принципы построения систем автоматического регулирования.

1. Радиопередающее устройство РЛС.

Радиопередающее устройство (РПУ) РЛС представляет собой комплекс оборудования, предназначенный для формирования и излучения радиолокационных сигналов. В РПУ происходят три основных процесса:

- генерация колебаний сверхвысокой частоты (СВЧ), т. е. их создание;
- усиление колебаний СВЧ до необходимой мощности;
- управление параметрами колебаний СВЧ (амплитудой, частотой или фазой) в соответствии с передаваемой информацией.

Радиопередающим устройством (радиопередатчиком) называется однокаскадное или многокаскадное устройство, предназначенное для создания колебаний высокой частоты требуемой мощности и излучения в пространство этих колебаний в виде электромагнитных волн.

Структура и функции передатчика определяются требованиями, предъявляемыми к нему. Требования к передатчикам РЛС во многом сходны, во всех станциях необходимо сформировать ЗС:

- на заданной несущей частоте (частотах);
- с заданным законом (законами) модуляции;
- с заданной мощностью.

Следовательно, во всех РПУ использован сходный принцип построения (рис. 1).

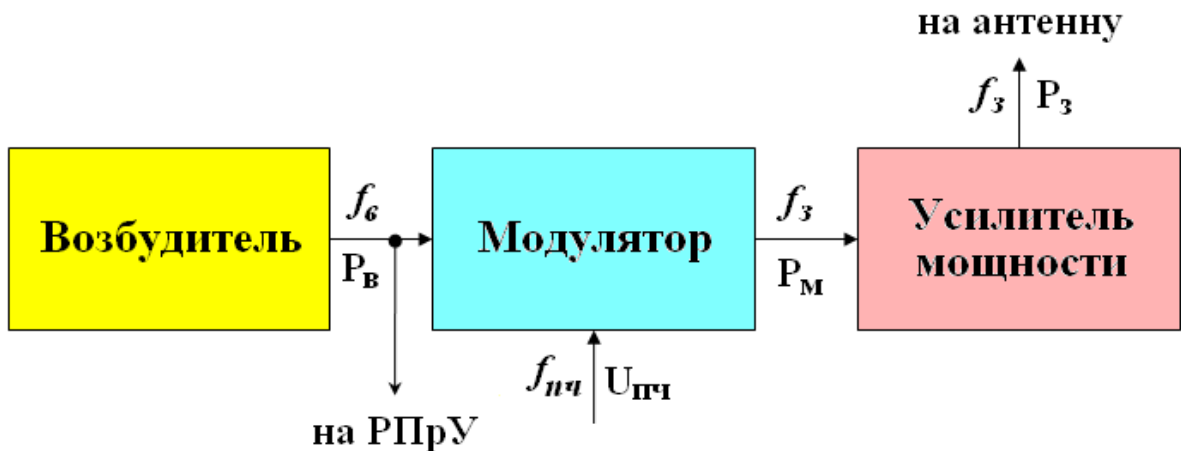


Рис.1. Структурная схема радиопередающего устройства РЛС

Возбудитель это задающий генератор, который обеспечивает формирование стабильного по частоте непрерывного сигнала малой мощности с параметрами f_v и P_v . Основными факторами, влияющими на выбор схемы возбудителя для конкретного РПУ, являются: частотный диапазон и требования к стабильности частоты передатчика, а также количество рабочих частот передающего канала.

Модулятор это функциональный узел обеспечивающий усиление сигнала возбудителя и ввод в него заданного закона модуляции или его части (например, модулятор обеспечивает изменение частоты сигнала, а преобразование непрерывного сигнала в импульсный осуществляется в последующих каскадах РПУ). Основными факторами, влияющими на выбор схемы модулятора для конкретного РПУ, являются: требуемый закон или законы модуляции ЗС, требования к стабильности частоты передатчика, возможности РПУ по перестройке частоты.

Усилитель мощности это функциональный узел обеспечивающий основное усиление сигнала по мощности и в некоторых случаях формирование импульсов из непрерывных колебаний. Основными факторами, влияющими на выбор схемы усилителя мощности для

конкретного РПУ, являются: требуемый закон модуляции ЗС, требования к выходной мощности РПУ, возможности РПУ по перестройке частоты.

Для доплеровских РЛС важной характеристикой радиопередающего устройства является стабильность частоты формируемых колебаний. В первую очередь она зависит от параметров задающего генератора, который может обеспечить достаточно высокую стабильность только при небольшой отдаваемой мощности.

Для повышения стабильности частоты задающий генератор проектируют иногда на более низкой частоте, чем та, на которой работает передатчик. В этом случае вводят дополнительные каскады для умножения частоты.

Возбудитель генератора формирует непрерывное высокочастотное колебание, которое после преобразований поступает на выходной усилитель. С его помощью осуществляется не только усиление зондирующего сигнала по мощности, но и формирование его в виде когерентной пачки прямоугольных радиоимпульсов. Управляющие импульсы, необходимые для коммутации тока луча выходного усилительного каскада, вырабатываются модулятором.

Радиопередающее устройство станции наведения ракет работает в импульсном режиме. Вариант такого передатчика представлен на рисунке 2.

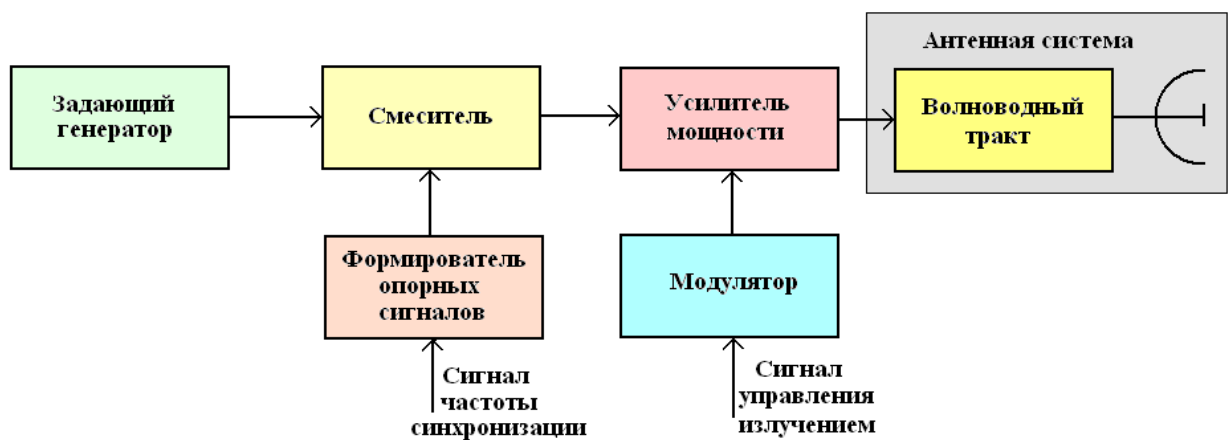


Рис.2. Вариант структурной схемы радиопередающего устройства РЛС управления стрельбой

К РПУ многофункциональной РЛС управления стрельбой в условиях постановки противником помех предъявляется ряд требований:

- формирование различных видов сигналов:
 - при поиске и визировании цели КППРИ;
 - при захвате и визировании ракеты пачка запросных импульсов;
 - при передаче команд управления на борт ракеты их импульсный код;
 - при подсвете цели для бортовой аппаратуры ракеты одиночные радиоимпульсы большой длительности;
- высокая энергия формируемых сигналов, средняя мощность должна составлять единицы киловатт;
- высокая стабильность частоты ЗС для измерения радиальной скорости;
- возможность быстрой смены номинала частоты ЗС в целях повышения скрытности работы и помехоустойчивости РЛС;
- резервирование каскадов РПУ, для повышения надежности.

Диапазон длин волн – сантиметровый.

Задающий генератор СВЧ (возбудитель), обеспечивает формирование стабильного по частоте непрерывного сигнала малой мощности с параметрами f_b и P_b . Реализован на пролетном двухрезонаторном клистроне.

Модулятор это функциональный узел обеспечивающий усиление сигнала возбудителя и ввод в него заданного закона модуляции, модулятор обеспечивает изменение частоты сигнала, а преобразование непрерывного сигнала в импульсный осуществляется в последующих каскадах РПУ. Реализован на пролетном многорезонаторном клистроне.

Усилитель мощности это функциональный узел обеспечивающий основное усиление сигнала по мощности и формирование импульсов из непрерывных колебаний. Реализован на пролетном многорезонаторном клистроне. В РЛС для компенсации уходов частоты РПУ f_b подается на РПрУ в качестве гетеродинного сигнала.

2. Радиоприемное устройство РЛС

Радиоприемное устройство (РПрУ) радиолокационной станции решает следующие основные задачи:

- выделение сигналов, отраженных от воздушных объектов, из множества других сигналов (частотная селекция);
- усиление отраженных сигналов и их преобразование по частоте;
- детектирование высокочастотных сигналов и преобразование их к виду, удобному для отображения на экране индикаторного устройства;
- обработка сигналов с целью подавления помех.

Приемная система радиолокационной станции обнаружения воздушных объектов выполняется, как правило, по схеме супергетеродинного приемника. Структурная схема супергетеродинного приемника приведена на рисунке 1.

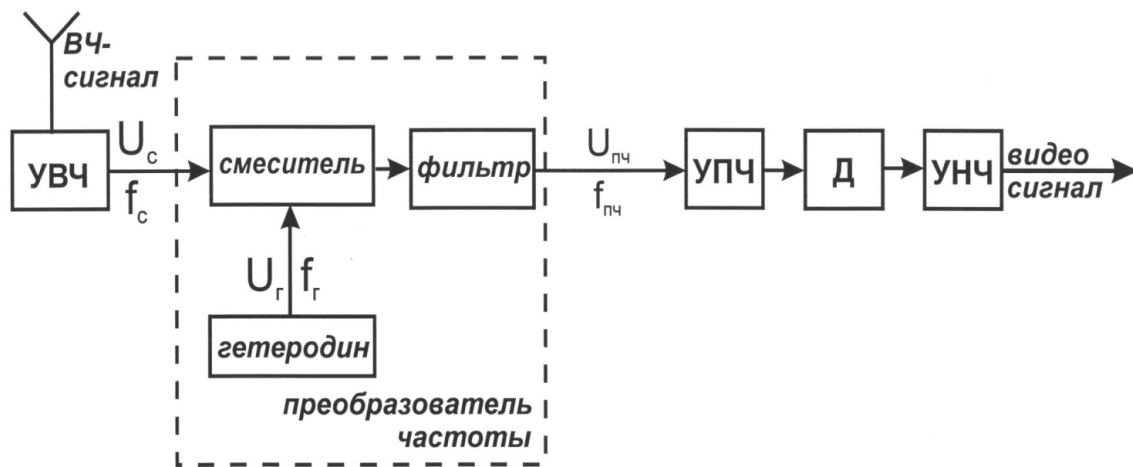


Рис.1. Структурная схема типового супергетеродинного приемника

Отличительной особенностью супергетеродинного приема является перенос спектра принимаемого сигнала из области высокой частоты (единицы - десятки гигагерц) в область промежуточной частоты (единицы - десятки мегагерц) с помощью местного маломощного генератора (гетеродина).

Достоинство - при изменении несущей частоты сигнала нет необходимости менять параметры настройки оптимального приемника, достаточно изменить частоту гетеродина.

Это дает возможность строить приемники радиосигналов с хорошими показателями чувствительности и избирательности, так как основное усиление сигнала осуществляется в постоянном диапазоне частот.

На вход усилителя высокой частоты (УВЧ) поступает смесь сигналов и помех от антенны. УВЧ выполняет предварительную селекцию по частоте, тем самым, обеспечивая защиту приемника от *зеркальных каналов приема* (рис. 2).

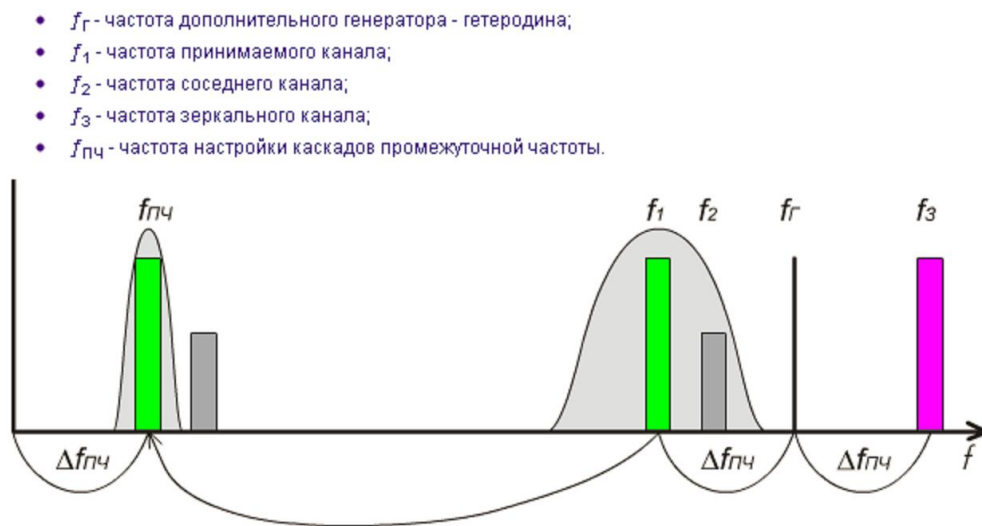


Рис. 2. Принцип частотной селекции в супергетеродинном РПрУ.

Усиление сигналов в УВЧ обеспечивает высокую чувствительность приемника в целом за счет снижения коэффициента шума.

Преобразователем частоты называют устройство, с помощью которого спектр принимаемого сигнала переносится, из области высокой частоты, в область промежуточной частоты. Если преобразование сигнала выполнено без искажений, то сохраняется вся информация, заложенная в параметрах модуляции принимаемого сигнала, а значение промежуточной частоты $f_{ПЧ}$ будет равно

$$f_{ПЧ} = |f_{\Gamma} - f_c|, \quad (1)$$

где f_c и f_r - частоты, соответственно, сигнала и гетеродина.

Усилитель промежуточной частоты (УПЧ) обеспечивает основное усиление и частотную избирательность приемника.

Детектор (Д) выделяет закон модуляции сигнала, т.е. извлекает полезную информацию.

Основные технические характеристики РПрУ:

Чувствительность приемника $P_{пр\ min}$ это минимальная мощность сигнала на его входе, при которой еще возможен устойчивый прием и обнаружение отраженных сигналов с заданной вероятностью.

Различают предельную и реальную чувствительность.

Предельной чувствительностью приемника $P_{пр.min}$ называют такую минимальную мощность сигнала на входе приемника, которая обеспечивает на выходе его линейной части (входе детектора) отношение по мощности сигнала к шуму, равное единице.

$$P_{пр\ min} = kT_0 P_{эф} \nu (t_A - 1 + K_{ш\ пр})$$

где: $t_A = (K_{шA} - 1)/T_0$ - эффективная шумовая температура антенны;

$P_{эф}$ - эффективная (шумовая) полоса пропускания РПрУ;

$K_{ш\ пр}$ - коэффициент шума РПрУ;

ν - коэффициент различимости;

$T_0 = 293\ K$ - стандартная шумовая температура;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}\ Дж/С$ - постоянная Больцмана.

Реальной чувствительностью приемника $P_{р.min}$ называют такую мощность сигнала на его входе, которая обеспечивает на выходе линейной части приемника отношение сигнал/шум, равное коэффициенту различимости q .

Реальная и предельная чувствительность связаны зависимостью:

$$P_{р.min} = P_{пр.min} \times q$$

Коэффициент различимости численно равен минимально допустимому отношению сигнал/шум на выходе линейной части приемника, при котором сигнал на выходе приемника может быть уверенно обнаружен.

Чувствительность приемника тем выше, чем меньше величина $P_{\text{пр. min}}$. В современных приемниках РЛС $P_{\text{пр. min}} = 10^{-13} - 10^{-14}$ Вт.

Чувствительность приемника РЛС ограничивается его собственными шумами. Они возникают в антенно-волноводном тракте, сопротивлениях, электронных лампах и полупроводниковых приборах.

Причинами шумов являются беспорядочное тепловое движение электронов в проводниках, неравномерное излучение электронов катодами в электронных лампах и т.д. С увеличением температуры уровень собственных шумов возрастает. Интенсивность шумов весьма мала. Однако проходя через приемник с большим усилением, они создают на его выходе напряжение, способное привести в действие оконечное устройство. На экране индикатора они наблюдаются в виде шумовой дорожки.

Динамический диапазон приемника показывает отношение максимального и минимального входных сигналов, в пределах которого он еще обеспечивает нормальную работу. Важность динамического диапазона связана с наличием на его входе помех и большого разброса амплитуд полезных сигналов. Количественно динамический диапазон оценивается выраженным в децибелах отношением максимального входного сигнала, обработка которого приемником производится еще с допустимыми искажениями, к чувствительности приемника,:

$$D = 10 \times \lg (P_{\text{пр. max}} / P_{\text{пр. min}})$$

Динамический диапазон приемных систем современных РЛС должен быть не менее 70 - 80 дБ. Его расширение достигается за счет повышения чувствительности приемника, применения схем регулирования усиления и использования специальных усилительных приборов.

Усилительные свойства приемника характеризуются **коэффициентом усиления**. Различают коэффициент усиления по мощности K_p и коэффициент усиления по напряжению K_U .

Коэффициент усиления по мощности – это отношение мощности сигнала на выходе приемника $P_{\text{вых.}}$ к мощности на его входе $P_{\text{вх.}}$:

$$K_P = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}$$

Коэффициент усиления по напряжению определяется аналогично:

$$K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$$

Коэффициент усиления определяется в относительных единицах или децибелах:

$$K_{U\text{дб}} = 20 \lg K_U$$

$$K_{P\text{дб}} = 10 \lg K_P$$

В современных приемниках общее усиление может достигать $K_P = (0,1-10) \times 10^{13}$ или соответственно $K_P = 120 - 140$ дБ.

Избирательность показывает возможность устойчивого приема полезного сигнала в условиях наличия других сигналов. (Избирательность может быть пространственная, частотная, временная и т. п.).

Частотную избирательность позволяет оценить ширина его амплитудно-частотной характеристики. Амплитудно-частотной характеристикой называют зависимость модуля коэффициента усиления от частоты (рисунок 4).

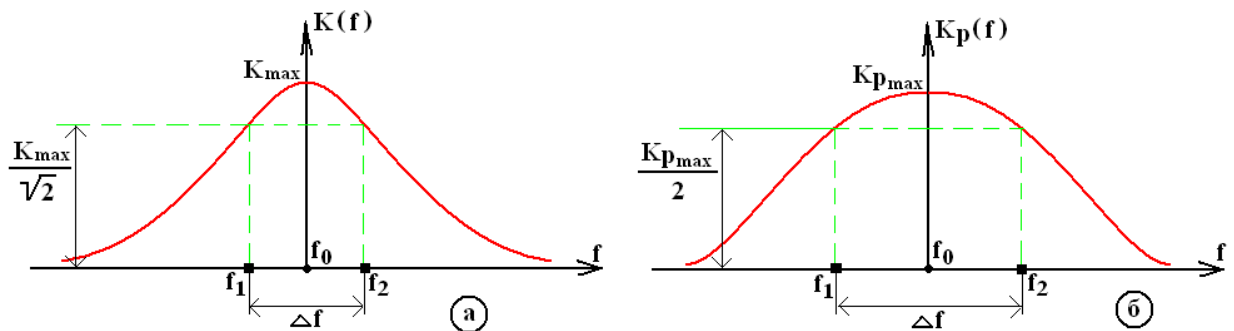


Рис.4. Амплитудно-частотная характеристика

Количественно частотная избирательность приемника характеризуется его **полосой пропускания** Δf . Полоса пропускания определяется как разность частот f_2 и f_1 , для которых K уменьшается в $\sqrt{2}$, а K_P — в два раза от своего максимального значения. Избирательность приемника тем выше, чем ближе форма его амплитудно-частотной характеристики к П-образной.

Диапазон рабочих частот определяется значением крайних частот, обрабатываемых приемником. Он определяется следующими требованиями:

- приемник должен допускать настройку на любую частоту диапазона;
- характеристики приемника в этом диапазоне должны изменяться в заданных пределах.

Зачастую диапазон рабочих частот называют по длине волн, обрабатываемых приемником. В диапазоне СВЧ, например, различают приемники сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов.

Помехоустойчивостью приемника называют его способность обеспечивать достоверное выделение полезного сигнала при действии различного рода помех.

Таким образом, качество выполнения приемной системой задач в составе РЛС определяется ее техническими характеристиками, основными из которых являются: чувствительность, динамический диапазон, коэффициент усиления, избирательность, диапазон рабочих частот, помехоустойчивость.

К основным эксплуатационным характеристикам радиоприемников относятся:

Электромагнитная совместимость (ЭМС) - это возможность совместной работы радиоэлектронной аппаратуры с другой аппаратурой, которая создает мешающее радиоизлучение.

Надежность работы, которая оценивается средним временем или вероятностью безотказной работы. Эта характеристика зависит как от выбранной структурно-функциональной схемы приемника, так и от надежности отдельных элементов схемы, их количества, облегченных режимов работы наиболее важных элементов, в особенности электронных приборов. Главным направлением повышения надежности является использование интегральной техники, а также дублирование и резервирование наименее надежных элементов или целых узлов приемника.

Габариты и масса приемника. Линейные размеры, занимаемый объем, а также масса часто являются одними из основных характеристик

приемников, устанавливаемых на летательных аппаратах, особенно малоразмерных.

Ремонтопригодность, определяющая характер устранения неисправностей, т.е. возможность замены элементов, целых блоков или приемника в целом.

К основным производственно - экономическим характеристикам радиоприемников относятся: стоимость приемника, сроки морального износа, соответствие мировым стандартам, степень унификации.

РПрУ РЛС управления стрельбой

Используется в составе многофункциональной РЛС управления стрельбой в условиях постановки противником помех. Диапазон длин волн – сантиметровый.

Основные требования, предъявляемые к ее РПрУ:

- оптимальная обработка и измерение параметров различных видов сигналов:

- при поиске цели КППРИ;

- при визировании цели КППРИ;

- при захвате и визировании ракеты пачка ответных импульсов;

- при приеме бортовой информации ракеты - ее импульсный код;

- высокая чувствительность;

- возможность быстрой перестройки частоты.

Радиоприемное устройство многофункционального лоатора представляет собой совокупность нескольких специализированных приемников (рис. 5):

- для параллельного обзора пространства по координатам дальность-скорость при поиске целей используется многоканальный корреляционно-фильтровой приемник;

– для измерения координат целей используется корреляционно-фильтровой приемник, реализующий дискриминаторы для всех измеряемых координат;

– для захвата ракет, измерения их координат, приема бортовой информации по линии связи ракета-РЛС используется широкополосный приемник с некогерентным накоплением сигналов.

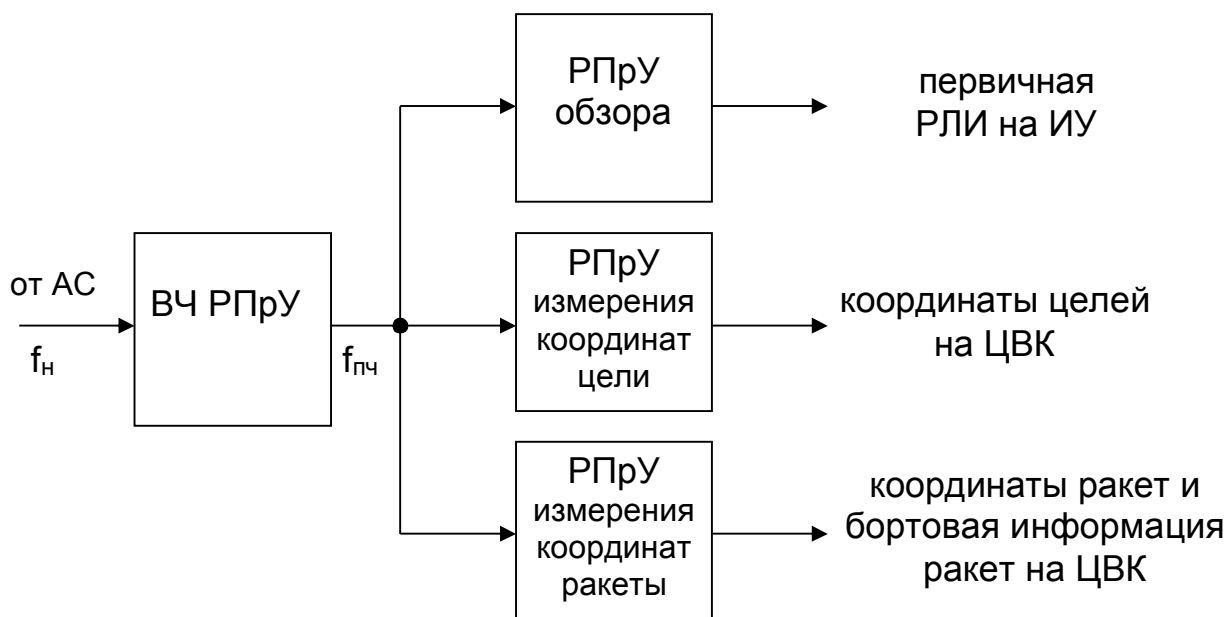


Рис. 7. Структура РПрУ

Перестройка частоты всех приемников осуществляется синхронно с изменением несущей частоты ЗС.

Для защиты от АШП, действующих по боковым лепесткам ДН, в высокочастотной части РПрУ реализован многоканальный квадратурный автокомпенсатор помех. В случае воздействия АШП по главному лепестку ДН, приемник, совместно с вычислительными средствами УУиС, обеспечивает определение направления на помехопостановщик (определяет *пеленг* постановщика помехи).

Для защиты от пассивных помех (ПП) в состав всех каналов целевых приемников включены частотно-временные селекторы.

Во всех приемниках используются цепи автоматической регулировки усиления (АРУ) и автоматической регулировки фазы (АРФ):

- в измерительных приемниках для устранения аппаратных (т.е. вносимых некорректными настройками аппаратуры) ошибок в измерении координат;
- в обзорном приемнике (используется только АРУ по шумам) для стабилизации уровня ложных тревог при автоматическом принятии решения о наличии или отсутствии цели.

3. Принципы построения систем автоматического регулирования (САР)

В РПУ доплеровских РЛС системы автоматического регулирования используются для стабилизации частоты возбуждителя и называются системами автоматической подстройки частоты (АПЧ).

Работу АПЧ рассмотрим на примере подстройки частоты клистронного генератора.

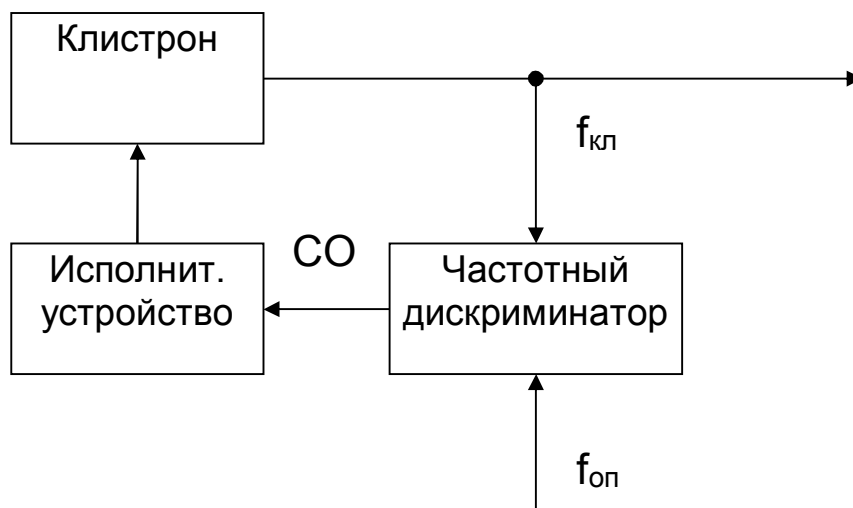


Рис.8. Упрощенная структурная схема АПЧ

Эталоном частоты служит сигнал $f_{оп}$, поступающий от УУиС.

Сигнал ошибки пропорционален разности частот $f_{кл} - f_{оп}$.

Исполнительным устройством служит шаговый двигатель, перемещающий поршень в объемном резонаторе. Частота клистрона изменяется в результате изменения геометрических размеров резонатора.

Системы автоматического регулирования РПрУ позволяют обеспечить требуемую точность определения координат целей в пространстве.

Кроме того, системы автоматического регулирования позволяют в автоматическом режиме (без участия человека) поддерживать требуемые значения коэффициентов усиления и фазовых сдвигов в каналах.

Принципы использования систем автоматического регулирования РПрУ рассмотрим на их примере применения в угловых следящих системах.

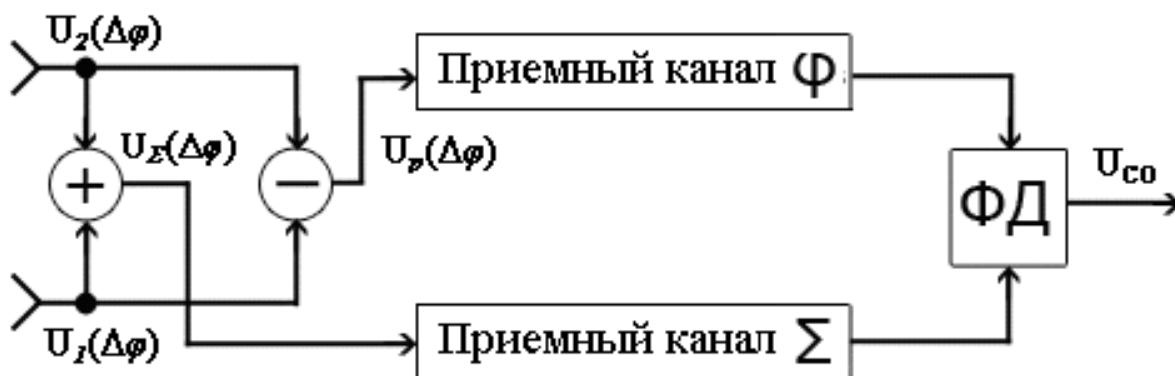


Рис. 9. Структурная схема дискриминатора угловой координаты

Для малых угловых рассогласований ($\varphi\Delta$) дискриминаторная характеристика ССф (рис. 10) выражается соотношением:

$$U_{CO}\varphi\Delta \approx K_{\varphi} \approx \varphi\Delta \cdot K_{ФД} \cdot (K_{\varphi}/K_{\Sigma}) \cdot U_o \cdot \cos(\gamma_{\varphi}-\gamma_{\Sigma})\varphi\Delta \cdot \mu.$$

где: $K_{ФД}$ – коэффициент передачи ФД по напряжению;

K_{φ}, K_{Σ} – коэффициент передачи по напряжению разностного и суммарного каналов;

U_o – амплитуда сигнала опорного канала;

$\gamma_{\varphi}-\gamma_{\Sigma}$ – фазовые сдвиги в разностном и суммарном каналах;

μ – коэффициент, характеризующий суммарную диаграмму направленности антенны;

$\varphi\Delta$ – угол между направлением на цель и равносигнальным.

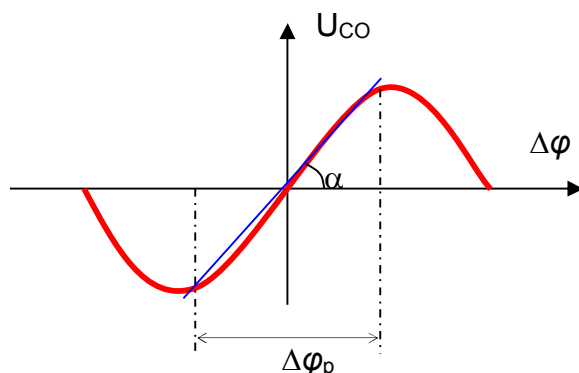


Рис. 10. Дискриминаторная характеристика

Точность измерения угловых координат существенно зависит от соотношения K_φ и K_Σ , стабильности амплитуды U_o , и разности электрических длин приемных каналов ($\gamma_\varphi - \gamma_\Sigma$), которые в процессе функционирования могут меняться по случайному закону.

Для повышения точности измерения необходимо обеспечить:

- равенство коэффициентов передачи K_φ и K_Σ ,
- стабильность U_o ,
- равный фазовый сдвиг в каналах.

Для решения указанных задач в состав РПрУ введены системы автоматического регулирования (рис. 11):

АРУ – автоматической регулировки усиления для поддержания постоянной амплитуды опорного сигнала суммарного канала на входе ФД (U_o);

АВУ – автоматического выравнивания усиления для подстройки коэффициентов передачи каналов Д, фв, фн под коэффициент передачи канала Σ ($K_\varphi = K_D = K_\Sigma$);

АРФ – автоматического регулирования фазы опорного сигнала для выравнивания «электрических длин» каналов фв, фн, Д относительно канала Σ . ($\gamma_D = \gamma_\varphi = \gamma_\Sigma$).

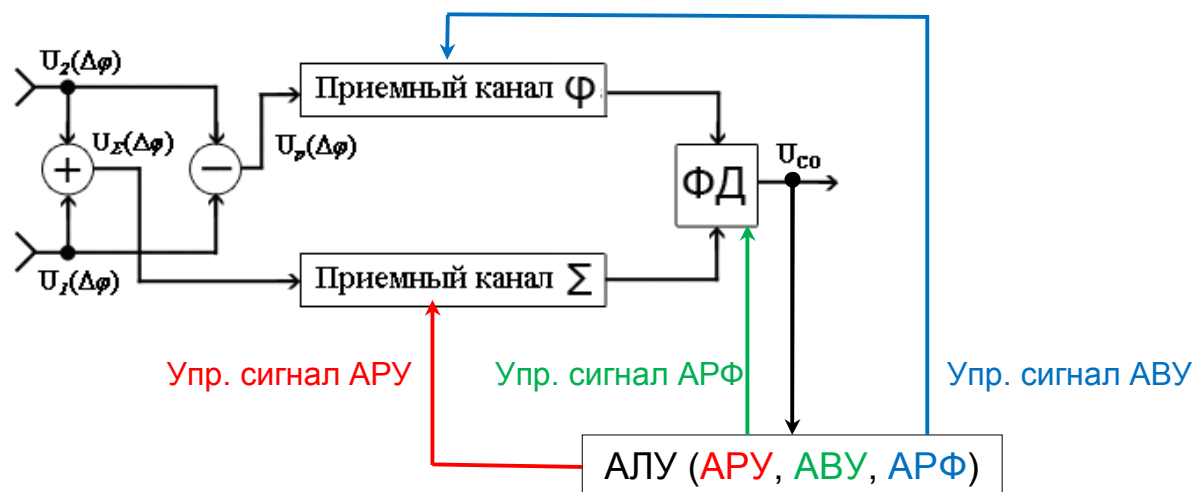


Рис. 11. Системы автоматического регулирования РПрУ