

Т е м а № 2. «Зенитная управляемая ракета 9М39»

Занятие № 11. «Методы приёма
оптических сигналов».

Вопросы занятия:

1- ый вопрос: Метод прямого фотодетектирования.

2- ой вопрос: Гетеродинный метод приема.

3-ий вопрос: Динамический метод приема.

1- ый вопрос: Метод прямого фотодетектирования

Все известные методы приема оптических сигналов разделяются на статические и динамические.

Методы приема и преобразования оптических сигналов в электрические, при которых измеряются средние значения выходных токов или напряжений фотоприемника, называются **статическими**.

Методы приема и преобразования оптических сигналов в электрические, при которых регистрируются отдельные импульсы тока или напряжения на выходе фотоприемника, называются **динамическими**.

По физическим принципам регистрации и первичной обработки информации, содержащейся в оптическом сигнале, различают следующие методы приема оптического излучения: **прямой, гетеродинный, балансный, синхронный** и некоторые другие. Наибольшее применение на практике получили прямой и гетеродинный методы.

Прямой метод приема оптических сигналов состоит либо в непосредственной регистрации мощности или энергии излучения, либо в подсчете числа фотонов, составляющих этот сигнал. Если необходимая информация содержится в величине потока энергии излучения, оцениваемого по силе тока или амплитуде напряжения на выходе приемника, то процесс приема и обработки сигнала можно рассматривать как **линейное детектирование**. Если информация содержится в амплитуде электромагнитного колебания, а регистрируется квадратичная функция (поток, энергия, освещенность), то приемная система (приемник) выступает в качестве **квадратичного детектора**.

Конструктивно, в случае регистрации потока, прямой прием (статический метод) достаточно прост. Несколько сложнее прямой метод, основанный на подсчете числа фотонов (динамический метод), поскольку в этом случае требуются высокочувствительные и малоинерционные измерители.

При гетеродинном приеме составляющую спектра модулированного сигнала, несущую полезную информацию, из высокочастотной области спектра смещают в область сравнительно низких частот, например, из оптической части спектра электромагнитных колебаний в радиодиапазон, где фильтрация, усиление и детектирование (демодуляция) сигнала современными средствами осуществляется значительно проще, чем в оптическом диапазоне. Кроме того, гетеродинный прием в ОЭУ может быть использован для преобразования не самих оптических сигналов, а модулирующих их колебаний.

В том случае, когда частоты колебаний информационного ω_c и вспомогательного ω_g сигналов одинаковы, а фазы совпадают, прием сигнала часто называют **ГОМОДИННЫМ**. При синхронном детектировании выходной сигнал **максимален** при равенстве фаз информационного и вспомогательного сигналов.

Для снижения влияния шумов гетеродина используют *балансный* метод приема.

Метод прямого детектирования реализует энергетический прием, при котором сигнал на выходе фотодетектора пропорционален мощности принимаемого модулированного светового потока.

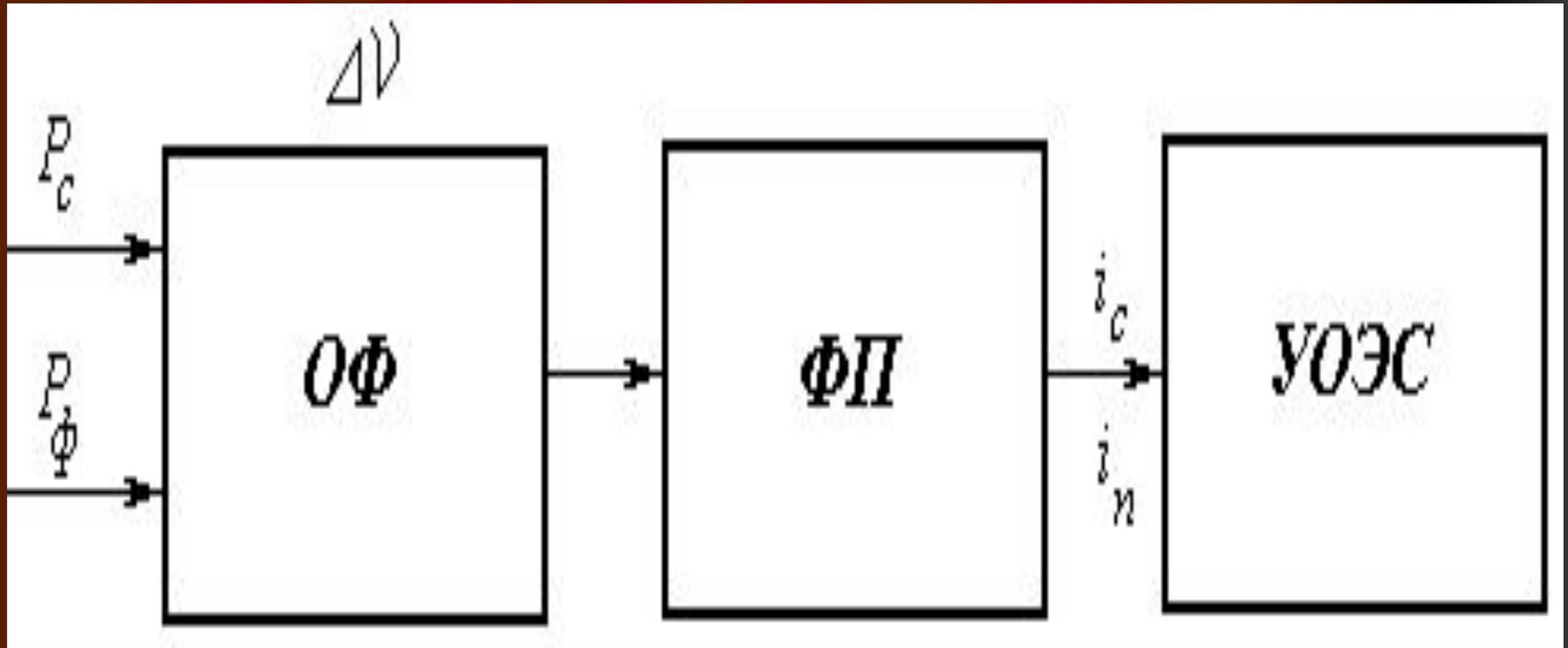


Рис. 1. Структурная схема приемника прямого детектирования

Входной сигнал, представляющий собой смесь полезного сигнала P_c и фона P_f , поступает на оптический фильтр (ОФ) с требуемой полосой пропускания $\Delta\nu$. ОФ предназначен для снижения уровня внешних помех. В фотоприемнике (ФП), размещенном после фильтра, производится преобразование оптического сигнала в электрический ток, и основная часть алгоритма его обработки, таким образом, реализуется на уровне фототока.

Непосредственно за фотопреобразовательной частью приемника следуют различные радиотехнические узлы, такие же, как и в обычном радиоприемнике. На рис. 1. эти элементы объединены в устройство обработки электрических сигналов (УОЭС).

Приемные устройства, у которых в качестве фотоприемника используются ФЭУ, имеющие высокий коэффициент усиления (до 65 дБ) и малый внутренний шум, применяются при необходимости обработки слабых сигналов. В этом случае оптимальный алгоритм обработки электрического сигнала должен строиться по принципу счета фотоэлектронов. Недостатком ФЭУ является относительно узкая полоса пропускания (100-300 МГц) и реализация высоких технических характеристик, как правило, только в диапазоне длин волн видимого излучения.

Данный метод широко применяется в оптических системах передачи информации благодаря простоте схемы приема. Однако при данном методе теряется информация о частоте и фазе оптического излучения, т. е. фотодетектор в этом случае нечувствителен к частотной и фазовой модуляции. Таким образом, для передачи полезной информации при данном методе приема могут быть использованы только разновидности амплитудной модуляции.

Основным **достоинством** приемников, реализующих метод прямого фотодетектирования, является простота технической реализации. По такой схеме построены, например, приемники ИК-излучения оптических головок самонаведения ЗУР ПЗРК «Стрела» и «Игла» всех модификаций.

Основными **недостатками** данного метода приема оптических сигналов являются малая чувствительность, большие информационные потери и трудность реализации спектральной фильтрации полезного сигнала.

Таким образом, несмотря на простоту технической реализации, использование данного метода ограничено из-за значительных информационных потерь при фотодетектировании.

2- ой вопрос: Гетеродинный метод приема.

Основными недостатками прямого метода приема являются относительно низкая чувствительность и трудности в технической реализации задачи спектральной фильтрации. Это связано с чрезвычайно высокой несущей частотой полезного оптического сигнала. Для преодоления этих недостатков требуется понизить несущую частоту сигнала, что и реализуется при гетеродинном методе приема.

Прием оптического сигнала в виде электромагнитного колебания $E_s(t)$, содержащего информацию о наблюдаемом объекте, сопровождающийся сложением этого колебания с дополнительным колебанием $E_g(t)$, создаваемым специальным генератором (гетеродином), называется гетеродинным.

Метод приема, при котором с помощью вспомогательного колебания дополнительного генератора производится линейный перенос спектра полезного оптического сигнала в область значительно более низких частот, называется гетеродинным.

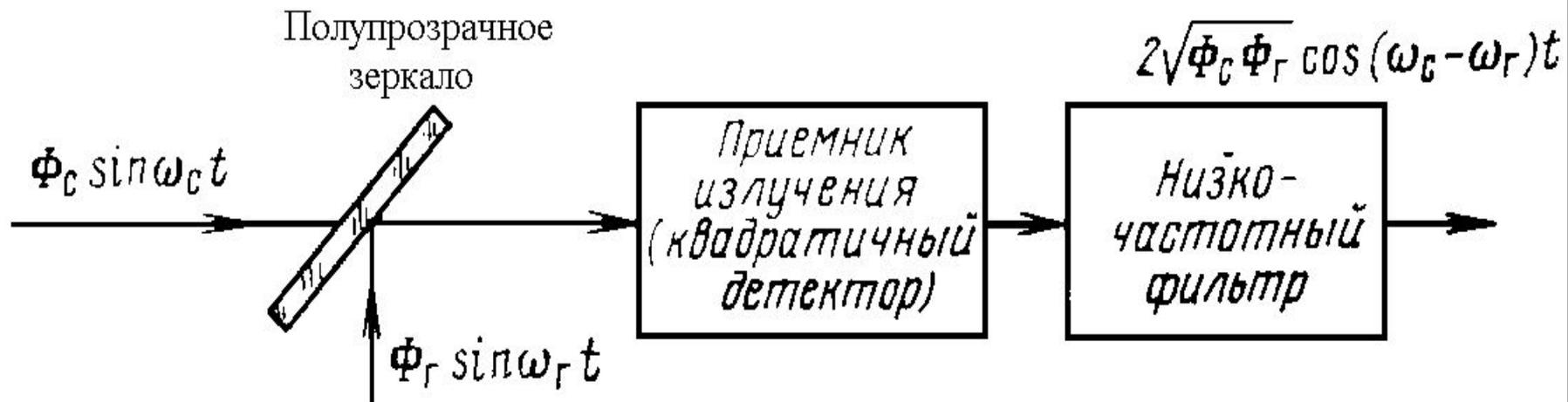


Рис. 2 Структурная схема гетеродинного приемника

При этом методе приема на приемник оптического излучения направляются два пучка лучей - от наблюдаемого излучателя и от вспомогательного генератора (гетеродина), как это показано на рис.2. Опорное колебание Φ_g , создаваемое гетеродином, имеет вид плоской оптической волны с амплитудой, постоянной по всему входному зрачку. Информационный сигнал Φ_c в идеальном случае может быть также представлен в виде плоской однородной волны. Важным является то, что частоты этих ЭМВ отличаются друг от друга на определенную величину. Поток излучения цели Φ_c с частотой ω_c на полупрозрачном зеркале смешивается с потоком излучения гетеродина Φ_g , обладающего частотой ω_g . В результате сложения амплитуд этих колебаний и последующего квадратичного детектирования на выходе приемника оптического излучения образуется напряжение

$$U_{\text{пр}} = U_c + U_g + 2\sqrt{U_c U_g} \cos(\omega_c - \omega_g)t.$$

Амплитуда переменной составляющей на частоте биений $\Delta\omega = (\omega_c - \omega_g)$ пропорциональна величине потоков излучения и цели, и гетеродина. При этом происходит линейный перенос спектра полезного сигнала из области оптического диапазона в область более низких радиочастот, в которой частотная фильтрация и усиление сигнала до требуемой величины легко реализуются.

Сигнал на выходе низкочастотного фильтра при этом описывается следующим выражением

$$U_{\text{ФНЧ}} = S_v k_{\text{э}} \sqrt{U_c U_2} \cos(\omega_c - \omega_2)t,$$

где S_v - чувствительность приемника по напряжению; $k_{\text{э}}$ - коэффициент передачи электронного тракта, включающего фильтр низкой частоты (ФНЧ).

Условием оптимального гетеродинного приема является строгая синфазность колебаний, приходящих на приемник. Для этого фронты Φ_c и Φ_g должны иметь постоянные фазы по всему чувствительному слою приемника.

Отношение сигнал/шум в случае гетеродинного приема можно представить как отношение мощности сигнала P_c на выходе фильтра низких частот, выделяющего разностную частоту, к мощности шума $P_{ш}$ в той же полосе частот. В случае идеальной синфазности информационного и опорного сигналов мощность сигнала на выходе электронного тракта (на выходе фильтра низкой частоты) в полосе частот $\Delta f = \Delta\omega/2\pi$ (3) при этом

$$P_c \equiv \Phi_c \Phi_g,$$

где Φ_c и Φ_g – потоки излучения, создаваемые источником информационного сигнала и гетеродином на приемнике.

Это указывает на **принципиальное достоинство гетеродинного метода приема – возможность увеличения мощности полезного сигнала путем увеличения потока, создаваемого гетеродином.**

Для обеспечения надежной фильтрации разностной частоты в системах с гетеродинным приемом предусматривается контроль частоты гетеродина с её подстройкой для компенсации уходов и нестабильности частоты информационного сигнала. Особенно часто это используется в системах, реализующих гомодинный метод приема, когда опорный гетеродин управляется сигналом, полученным с выхода приемника излучения и обеспечивающим синхронизм колебаний.

При активном методе работы ОЭУ опорным сигналом может служить часть потока излучения, посылаемого к наблюдаемому объекту, выводимая из передающей оптической системы и направляемая непосредственно на приемник.

В тоже время, при значительном уровне фоновых шумов, гетеродинный метод не всегда имеет преимущества перед прямым методом приема.

К приемникам, используемым в гетеродинных системах, предъявляется ряд специфических *требований*: низкая инерционность, малый разброс времени пролета носителей, от которого зависит инерционность приемника и верхний граничный предел его частотной характеристики, высокая квантовая чувствительность в рабочем участке спектра. Кроме того, необходимо, чтобы фаза детектируемого приемником сигнала не зависела от его амплитуды.

Гетеродинный метод приема обладает рядом **достоинств**, к основным из которых можно отнести **высокую чувствительность ОЭУ и возможность увеличения мощности выходного сигнала за счет увеличения мощности гетеродина.**

Однако он имеет и ряд **недостатков**. К основным из них относятся более высокий уровень собственных шумов приемника, трудности в строгом сопряжении фронтов основного и гетеродинного колебаний, дополнительная сложность конструкции, а так же необходимость реализации жестких требований к стабильности частот передатчика и гетеродина.

В ОЭУ, использующих гетеродинный метод приема, в качестве вспомогательных излучателей применяют лазеры, характеристики которых в наибольшей степени удовлетворяют жестким требованиям данного метода.

3-ий вопрос: Динамический метод приема.

По мере снижения уровня внешних шумов, а также при уменьшении длительности полезного сигнала, начинает проявляться дискретная природа помех, таких как, например, радиационный шум приемника. Поэтому наряду со статическим методом приема, при котором регистрируются средние значения выходного тока или напряжения приемника, на практике применяется и динамический метод, при котором регистрируются отдельные импульсы тока или напряжения. Иногда этот метод называют методом счета одиночных электронных импульсов.

При динамическом методе сигнал на выходе приемника характеризуется скоростью импульсов, возникающих при попадании на фоточувствительный слой отдельных квантов излучения. Среднее число фотоэлектронов, возникающих в цепи приемника при попадании на него потока излучения Φ и характеризующее энергию сигнала, определяется выражением

$$\bar{n} = \eta \Phi / h\nu,$$

где η - квантовая эффективность фотоприемника; ν - частота излучения; h - постоянная Планка.

Если в качестве приемника используется фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), то каждый отдельный фотоэлектрон вызывает на аноде лавину вторичных электронов, число которых определяется коэффициентом усиления ФЭУ. Эти электроны заряжают его распределенную выходную емкость C (обычно $C = 4...20$ пФ). Если выходная емкость успевает разрядиться через нагрузку R до прихода следующей лавины электронов, то регистрируются не перекрывающиеся во времени одноэлектронные импульсы, соответствующие приходу на фотокатод отдельных квантов излучения.

Устанавливая определенный уровень срабатывания следующей за приемником электронной схемы, можно подавить значительную часть шумовых импульсов, возникающих вне фотокатода.

Число регистрируемых в единицу времени квантов $1/n = n-1$ задается неравенством $n-1 \geq RC$. При $n-1 < RC$ импульсы перекрываются и на входе регистрируется интегральный фототок, т. е. приемник работает в "токовом" режиме (прямой метод приема).

Если достигнуто разрешение всех импульсов во времени, то вероятность появления n импульсов в единицу времени описывается законом Пуассона (число n флюктуирует около \bar{n}_c):

$$\omega(n, \bar{n}_c) = (\bar{n}_c)^n \exp(-\bar{n}_c) / n!$$

При этом отношение сигнал/шум определяется выражением

$$\mu_n = \frac{(\bar{n}_c \tau_c)^2}{\left[\sqrt{(\bar{n}_c + \bar{n}_{ш}) \tau_c} \right]^2} = \frac{\bar{n}_c^2 \tau_c}{\bar{n}_c + \bar{n}_{ш}},$$

где τ_c – время измерения (длительность); $\bar{n}_{ш}$ – среднее число фотоэлектронов, возникающих вследствие внутренних шумов и воздействия внешнего фона на приемник.

Из последнего выражения можно получить число $\bar{n}_c \min$, соответствующее заданной по техническим условиям вероятности $\omega(n, \bar{n}_c)$.

Достоинством этого метода является то, что при счете импульсов используется вся энергия сигналов, в то время как при прямом и гетеродинном методах, осуществляемых с модуляцией сигнала, часть его энергии теряется. Дискретная регистрация каждого импульса позволяет исключить влияние шума, обусловленного умножительной системой фотоприемника.

Однако при увеличении уровня полезного сигнала эффективность метода счета уменьшается. Это вызвано увеличением вероятности наложения одного импульса на другой, что может произойти, если при некоторой длительности импульса t_c выполняется условие $n t_c > 1$. По этой причине метод счета используется для приема только слабых оптических сигналов.

Перспективным направлением применения метода счета импульсов является оптическая локация, где интервал времени регистрации, в течение которого может появиться группа пришедших от излучателя (отражателя) фотонов, мал по сравнению со средним интервалом времени между двумя одноэлектронными импульсами фона.