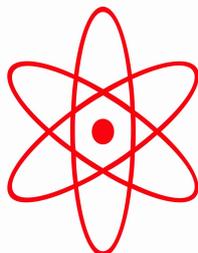


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ



РТРУЛ-12

**РАДИОПРИЁМНЫЕ И ПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА.
ИЗУЧЕНИЕ ПРИЕМО – ПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА
С НАЛИЧИЕМ ШИМ МОДУЛЯТОРА И ОПТИЧЕСКОГО
КАНАЛА СВЯЗИ.**

Тула, 2010 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.

РАДИОПРИЁМНЫЕ И ПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА.

ИЗУЧЕНИЕ ПРИЕМО — ПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С НАЛИЧИЕМ ШИМ МОДУЛЯТОРА И ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ.

Цель работы: ознакомление с теоретическими основами и практическими навыками работы различных элементов приема — передающего устройства с ШИМ модулятором и оптическим каналом связи.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Введение.

Общие сведения о радиоприемных устройствах.

Радиоприемное устройство предназначено для приема каких-либо сообщений или сигналов, поступающих к нему в виде радиоволн. Оно состоит из приемной антенны, приемника и оконечного прибора.

Приемная антенна извлекает из окружающего пространства очень небольшую часть энергии проходящих радиоволн и направляет ее в радиоприемник.

В приемнике осуществляется выделение полезных колебаний и преобразование их к такому виду, который необходим для работы оконечного прибора.

При помощи оконечного прибора воспроизводится, регистрируется или иным способом используется принятая информация. В качестве оконечных приборов применяют акустические или электронно-лучевые устройства, буквопечатающие, фотопечатающие и пишущие аппараты, а также механизмы управления различных автоматических и счетно-решающих систем.

Информация на входе приемника заключена в модулированных колебаниях высокой частоты. Их называют высокочастотными сигналами. Только один из них полезный. Это тот сигнал, который принимается приемником в данный момент. По отношению к нему все остальные сигналы являются помехами.

После значительного усиления избирательными усилителями принятые высокочастотные колебания детектируются. В результате детектирования получают низкочастотные сигналы. Именно они и являются носителями полезной информации, так как способны привести в действие оконечный прибор. Но для этого низкочастотные (информационные) сигналы должны иметь определенную мощность или напряжение. Поэтому в приемнике после детектора обычно имеется усилитель низкой частоты или видеусилитель.

Общие сведения о модуляции.

Гармонические колебания тока, напряжения или электромагнитного поля характеризуются тремя параметрами: амплитудой, частотой и начальной фазой. Так, например, уравнение гармонического тока имеет следующий вид:

$$i = I_m \sin (\omega t + \varphi). \quad (1.1)$$

Непрерывные колебания с постоянной амплитудой, частотой и начальной фазой не могут содержать какой-либо информации. Такие колебания могут лишь свидетельствовать о факте своего существования. Для передачи информации (информационных сигналов) необходимо как-то изменять параметры электромагнитных колебаний, излучаемых антенной радиопередающего устройства.

Процесс изменения любого из параметров гармонического колебания в соответствии с передаваемой информацией называется модуляцией.

При непрерывных методах передачи информационных сигналов модуляция может быть амплитудной (АМ), частотной (ЧМ), фазовой (ФМ) либо импульсной.

В случае одновременного изменения двух параметров гармонического колебания имеет место смешанная модуляция, например амплитудно-фазовая (АФМ) или амплитудно-частотная (АЧМ).

При импульсном методе работы передатчика его антенной излучаются кратковременные радиоимпульсы, отделенные друг от друга сравнительно большой временной паузой. В этом случае в соответствии с передаваемой информацией изменяется какой-либо из параметров излучаемых радиоимпульсов.

При импульсном методе работы передатчика его антенной излучаются кратковременные радиоимпульсы, отделенные друг от друга сравнительно большой временной паузой. В этом случае в соответствии с передаваемой информацией изменяется какой-либо из параметров излучаемых радиоимпульсов.

Для целей радиолокации используется простейшая разновидность импульсной модуляции, при которой в пространство излучаются радиоволны постоянной частоты, амплитуды, длительности и скважности (рис.1).

Кроме импульсной модуляции, в некоторых радиолокационных устройствах применяют также частотную модуляцию.

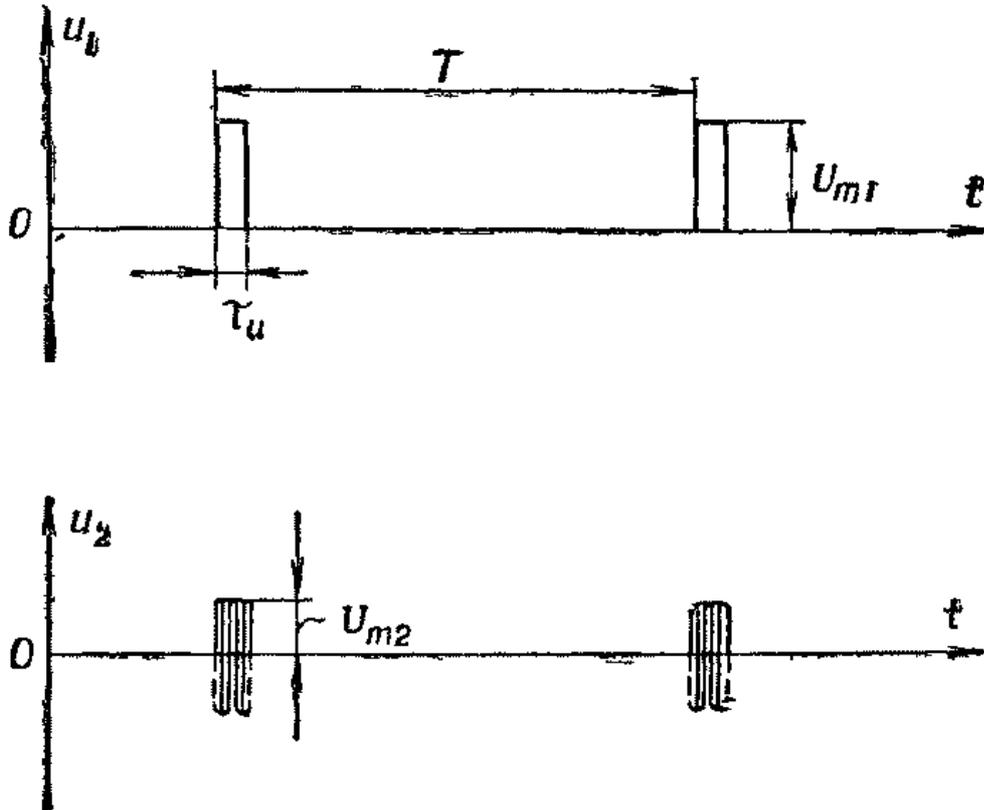


Рис. 1 Импульсная модуляция, используемая в РЛС:

u_1 — видеопульсы; u_2 — радиопульсы

В любом радиотехническом устройстве приходится встречаться с преобразованием электрических колебаний. Чтобы использовать высокочастотные колебания для передачи сигналов, необходимо каким-либо образом воздействовать на них, передавая их в виде отдельных посылок определенной длительности либо изменяя их амплитуду, фазу или частоту в соответствии с передаваемым сигналом. При приеме этих колебаний необходимо на основании изменения одного из параметров высокочастотных колебаний или длительности посылок восстановить передаваемый сигнал. Происходящие при этом процессы изменения формы, частоты или фазы будем в дальнейшем - называть преобразованием колебаний. Виды преобразований и типовые схемы преобразователей электрических колебаний чрезвычайно многочисленны и разнообразны.

Все виды преобразований можно разделить на два основных типа:

линейные, и нелинейные. Первые, осуществляемые в линейных цепях, подчиняющихся закону Ома, могут приводить, только к изменениям амплитудных и фазовых соотношений в спектре сложного сигнала. В нелинейных цепях происходят более сложные преобразования, приводящие к изменению самого состава спектра сигнала, т. е. появлению на выходе таких составляющих, которых не было во входном сигнале. К линейным относятся цепи, параметры которых не зависят от действующих в них токов и напряжений. В нелинейных же цепях изменение токов и напряжений приводит к изменениям их активных и реактивных сопротивлений, вследствие чего напряжения и токи оказываются не пропорциональными один другому, а связанными более сложными зависимостями. Одно и то же устройство часто может играть роль как линейного, так и нелинейного элемента в зависимости от способа его использования. Рассмотрим более подробно импульсную модуляцию, изучаемую в данном эксперименте.

Импульсная модуляция.

Существуют следующие основные методы модуляции импульсов:

1) амплитудная импульсная модуляция (АИМ);
 2) широтная импульсная модуляция (ШИМ), в процессе которой происходит изменение ширины импульсов, т. е. их длительности;

3) фазовая импульсная модуляция (ФИМ), в процессе которой изменяется фазовый сдвиг, или время излучения радиоимпульсов внутри тактовых интервалов;

4) частотная импульсная модуляция (ЧИМ), в процессе которой происходит изменение частоты радиоимпульсов.

Графики, иллюстрирующие различные виды импульсной модуляции, приведены на Рис. 2

Иногда используется также специальный вид импульсной кодовой модуляции, при которой плавная кривая сигнала заменяется ступенчатой, т. е. применяется так называемое квантование сигнала (Рис. 3). При импульсно-кодовой модуляции число, амплитуда, длительность, фазовый сдвиг или полярность излучаемых импульсных сигналов зависят в каждый данный отрезок времени от дискретного уровня квантованного сигнала.

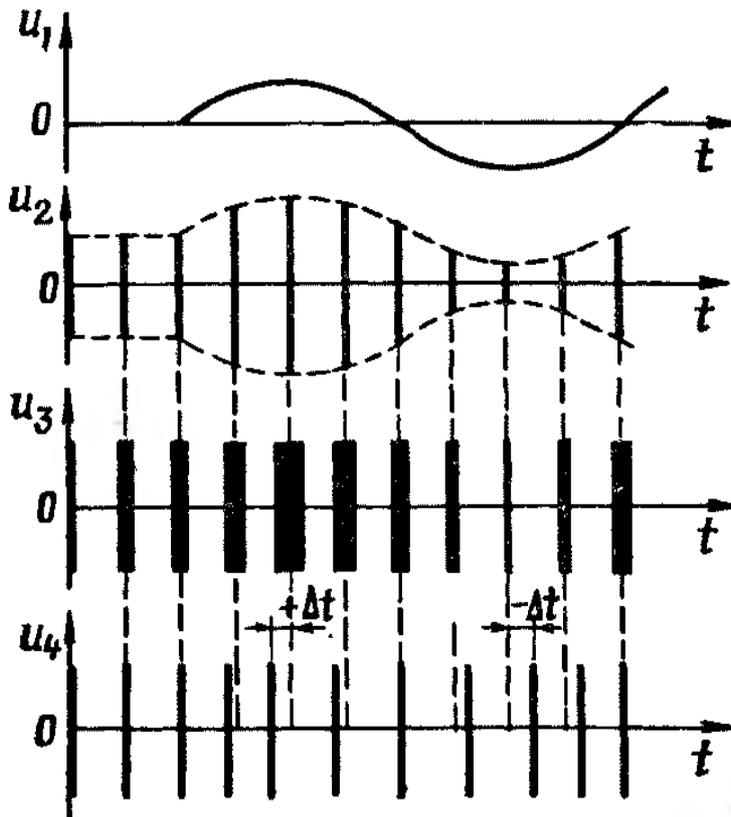


Рис. 2 Различные виды импульсной модуляции:

u_1 — модулирующий сигнал; u_2 — промодулированные импульсы при АИМ; u_3 — промодулированные импульсы при ШИМ; u_4 — промодулированные импульсы при ФИМ

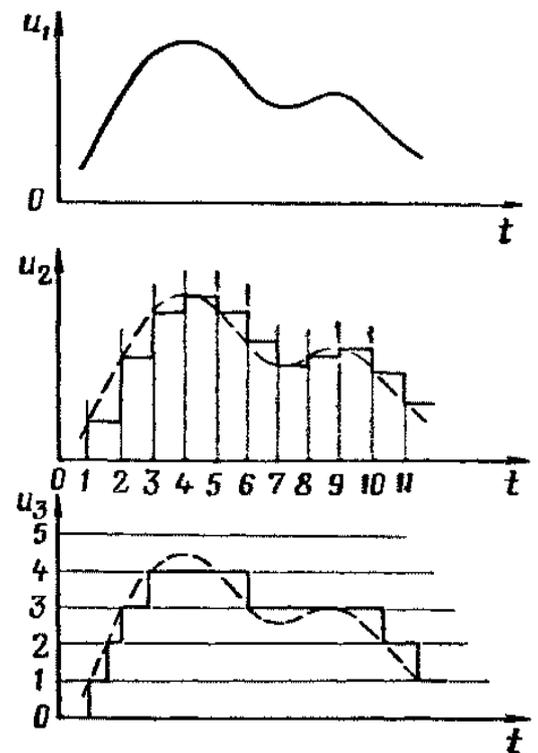


Рис. 3 Квантование сигнала:

u_1 — исходный сигнал; u_2 — сигнал, квантованный по времени; u_3 — сигнал, квантованный по уровню

Исторически первым видом импульсной модуляции был предложенный в 1927 г. А. Н. Щукиным метод широтно-импульсной модуляции, сокращенно ШИМ. Колебания при ШИМ имеют вид, представленный на рис. 4. Импульсы высокочастотных колебаний излучаются через одинаковые промежутки времени Δt , причем длительность каждого из них соответствует значениям модулирующего сигнала в момент излучения. При таком виде модуляции амплитуда импульсов не изменяется, что позволяет срезать в приемном устройстве помехи, искажающие амплитуды принятых импульсов. Его недостатком является необходимость выбора полосы пропускания по самому короткому импульсу. При этом она получается излишне широкой для всех остальных более длительных импульсов. Расширение же полосы пропускания приемника приводит к приему большого количества помех.

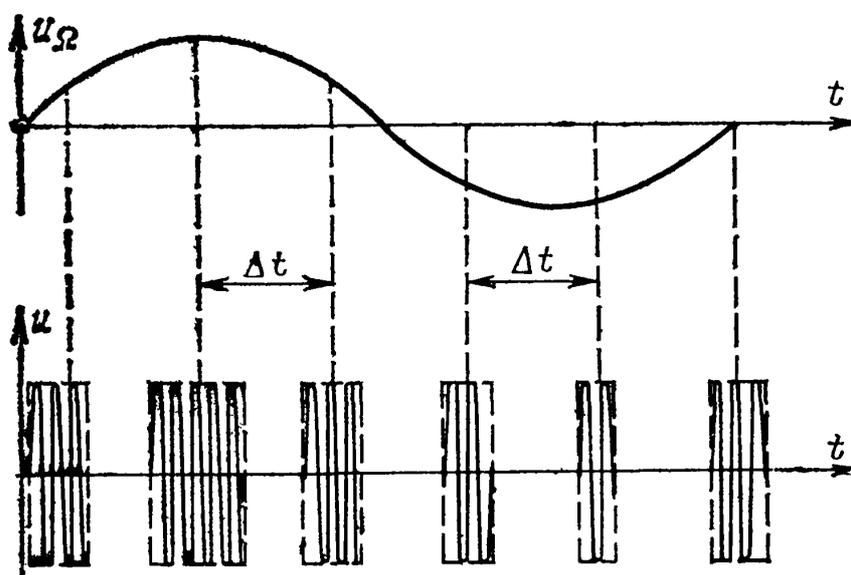


Рис. 4 . Колебания при ШИМ

Фактически, широтно-импульсная модуляция (ШИМ, [англ.](#) Pulse-width modulation (PWM)) — приближение желаемого сигнала (многоуровневого или непрерывного) к действительным бинарным сигналам (с двумя уровнями - вкл/выкл), так, что, в среднем, за некоторый отрезок времени, их значения равны. Формально, это можно записать так:

$$\int_{t_1}^{t_2} x(t) dt = \sum A * \Delta T_i$$

где $x(t)$ - желаемый входной сигнал в пределе от t_1 до t_2 , а ΔT_i - продолжительность i -го ШИМ импульса, каждого с амплитудой A . ΔT_i подбирается таким образом, что суммарные площади (энергии) обеих величин приблизительно равны за достаточно продолжительный промежуток времени, равны также и средние значения величин за период:

$$\frac{\int_{t_1}^{t_2} x(t) dt}{t_2 - t_1} = \frac{\sum A * \Delta T_i}{t_2 - t_1}$$

Управляемыми "уровнями", как правило, являются параметры питания силовой установки, например, напряжение импульсных преобразователей регуляторов постоянного напряжения или скорость электродвигателя. Для импульсных источников $x(t) = U_{const}$ стабилизации.

ШИП — широтно-импульсный преобразователь, генерирующий ШИМ-сигнал по заданному значению управляющего напряжения. Основное достоинство ШИМ — высокий КПД его усилителей мощности, который достигается за счёт использования их исключительно в ключевом режиме. Это значительно уменьшает выделение мощности на силовом преобразователе (СП).

ШИМ есть импульсный сигнал постоянной частоты и переменной скважности, то есть отношения периода следования импульса к его длительности:

Таким образом, для импульсного сигнала справедливы следующие соотношения:

$$S = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{D}$$

где S — скважность, D — коэффициент заполнения, T — период импульсов, τ — длительность импульса. С помощью задания скважности (длительности импульсов) можно менять среднее напряжение на выходе ШИМ.

Генерируется аналоговым компаратором, на отрицательный вход которого подаётся опорный сигнал в виде «пилы» или «треугольника», а на положительный — собственно сам модулируемый непрерывный аналоговый сигнал. Частота импульсов соответствует частоте «зубьев» пилы. Ту часть периода, когда входной сигнал выше опорного, на выходе получается единица, ниже — ноль.

В цифровой технике, выходы которой могут принимать только одно из двух значений, приближение желаемого среднего уровня выхода при помощи ШИМ является совершенно естественным. Схема настолько же проста: пилообразный сигнал генерируется N -битным счётчиком. Цифровые устройства (ЦШИП) работают на фиксированной частоте, обычно намного превышающей реакцию управляемых установок (передискретизация). В периоды между фронтами тактовых импульсов, выход ЦШИП остаётся стабильным, на нём действует либо низкий уровень либо высокий, в зависимости от выхода цифрового компаратора, сравнивающего значение счётчика с уровнем приближаемого цифрового сигнала $V(n)$. Выход за много тактов можно трактовать как череду импульсов с двумя возможными значениями 0 и 1, сменяющимися друг-друга каждый такт T . Частота появления единичных импульсов получается пропорциональной уровню приближаемого сигнала $\sim V(n)$. Единицы, следующие одна за другой, формируют контур одного, более широкого импульса. Длительности полученных импульсов переменной ширины $\sim V(n)$, кратны периоду тактирования T , а частота равна $1/(T \cdot 2N)$. Низкая

частота означает длительные, относительно T , периоды постоянства сигнала одного уровня, что даёт невысокую равномерность распределения импульсов.

Описанная цифровая схема генерации подпадает под определение однобитной (двухуровневой) импульсно-кодовой модуляции (**ИКМ**). 1-битную ИКМ можно рассматривать в терминах ШИМ как серию импульсов частотой $1/T$ и шириной 0 либо T . Добиться усреднения за менее короткий промежуток времени позволяет имеющаяся передискретизация. Высоким качеством обладает такая разновидность однобитной ИКМ, как импульсно-плотностная модуляция (pulse density modulation), которая ещё именуется импульсно-частотной модуляцией.

Восстанавливается непрерывный аналоговый сигнал арифметическим усреднением импульсов за много периодов при помощи простейшего фильтра низких частот. Хотя обычно даже этого не требуется, так как электромеханические составляющие привода обладают индуктивностью, а объект управления (ОУ) — инерцией, импульсы с выхода ШИП сглаживаются и ОУ, при достаточной частоте ШИМ-сигнала, ведёт себя как при управлении обычным аналоговым сигналом.

На рис. 5 наведена схема широтно-импульсного модулятора. На логических элементах U1.1 и U1.2 собран генератор прямоугольных импульсов частотой 48 кГц, на U1.3 и U1.4 – одновибратор, скважность его зависит от входного напряжения U_{in} . Полоса частот модулятора от 0 до 16 кГц, коэффициент нелинейных искажений около 1%, зависит от начального смещения на транзисторе Q1 и задаётся переменным резистором.

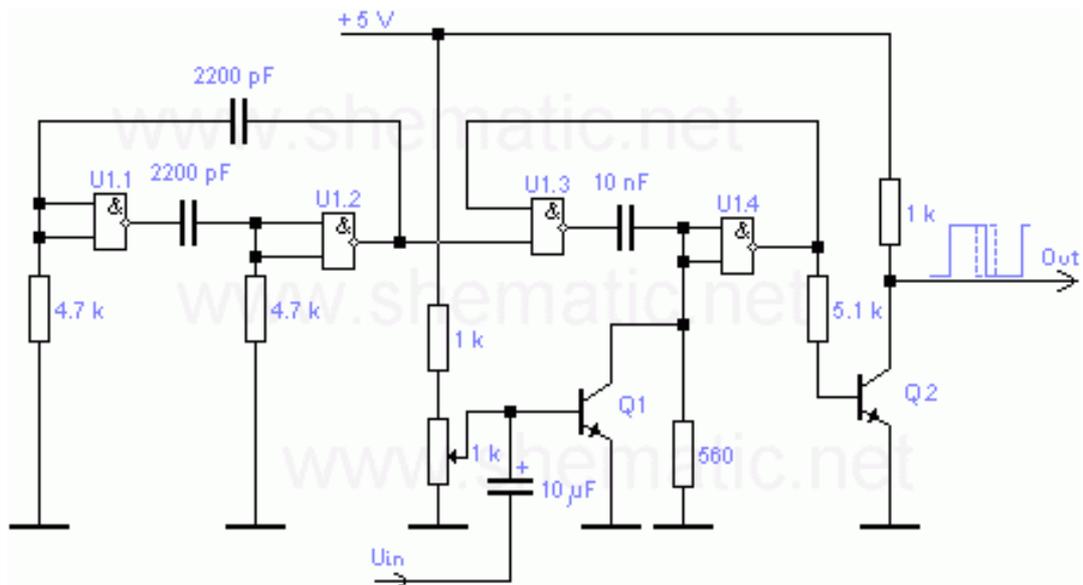


Рис. 5 Широтно-импульсный модулятор на логических элементах.

Детектирование колебаний.

Так как при широтно-импульсной модуляции изменяется постоянная составляющая, а при амплитудной модуляции — амплитуда сигнала, то детектирование ШИМ сигналов осуществляется так же как и обычных АМ сигналов, поэтому кратко рассмотрим основные принципы работы АМ детектора.

Амплитудные детекторы предназначены для выделения из амплитудно-модулированного или ШИМ сигнала полезной составляющей.

Амплитудные детекторы применяются для детектирования немодулированных или амплитудно-модулированных колебаний. Такие колебания могут быть непрерывными или импульсными.

Частотные детекторы применяются для детектирования частотно-модулированных колебаний. Они представляют собой совокупность преобразователя модуляции с амплитудным детектором.

Амплитудный детектор бывает необходим и для других целей. Без амплитудного детектирования невозможно осуществить процесс преобразования частоты, а он совершенно необходим в супергетеродинном радиоприемнике. Амплитудные детекторы применяются также в системах автоматической подстройки частоты гетеродина приемника и в системах автоматической регулировки усиления.

Во всех случаях процесс детектирования основан на использовании нелинейных свойств какого-либо электронного прибора. Ламповые детекторы бывают диодные, сеточные и анодные. Полупроводниковые детекторы бывают диодные и транзисторные.

О свойствах детектора судят по его параметрам. Основными параметрами детектора являются коэффициент передачи напряжения K_{Π} и входное сопротивление $R_{вх}$. Чем они больше, тем лучше детектор.

Полупроводниковый диод отличается от вакуумного диода наличием обратной проводимости. Поэтому входное сопротивление детектора на полупроводниковом диоде сравнительно мало. Данное обстоятельство вынуждает применять слабую связь полупроводникового детектора с контуром предыдущего каскада (УПЧ или УВЧ). Она бывает трансформаторной или автотрансформаторной. Значительно реже используется полное включение контура.

Простейшая схема диодного детектора на полупроводниковом диоде изображена на Рис. 6. Она выполнена с последовательным включением нагрузки. Нагрузка представлена резистором R_{Π} и конденсатором C_{Π} . На практике параллельно этим элементам будет включено входное сопротивление следующего каскада $R_{вх. сл}$. Поэтому полное сопротивление нагрузки

$$R_{\Pi.п} = \frac{R_{\Pi} \cdot R_{вх. сл}}{R_{\Pi} + R_{вх. сл}} \quad (4.1)$$

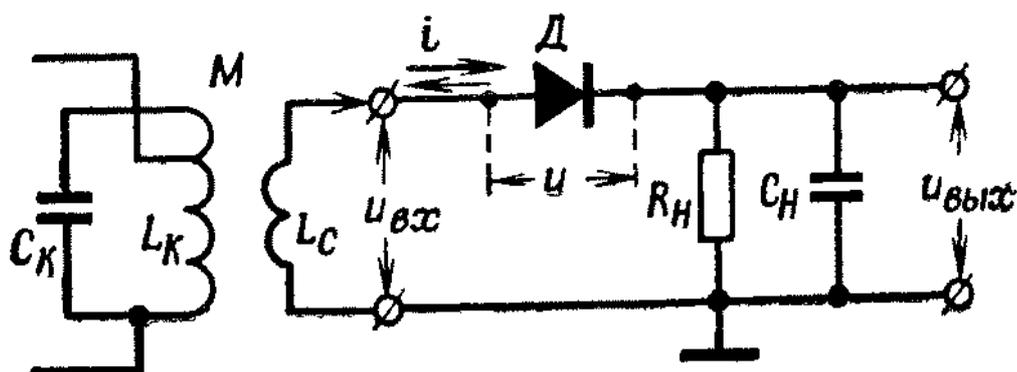


Рис. 6 . Простейшая схема диодного детектора на полупроводниковом диоде

Если следующий за детектором каскад ламповый, то $R_{вх}$ сл $\gg \gg R_{н}$ и $R_{нц} \approx R_{н}$, а если он транзисторный, то $R_{нц} < R_{н}$.

Для определения качественных показателей детектора необходимо знать характеристику диода и величину входного напряжения, которое при расчетах допустимо считать немодулированным. Типичная характеристика полупроводникового диода изображена на Рис. 7. Обычно для детектирования используются точечные германиевые диоды. Кремниевые диоды применяются значительно реже ввиду большей величины прямого сопротивления.

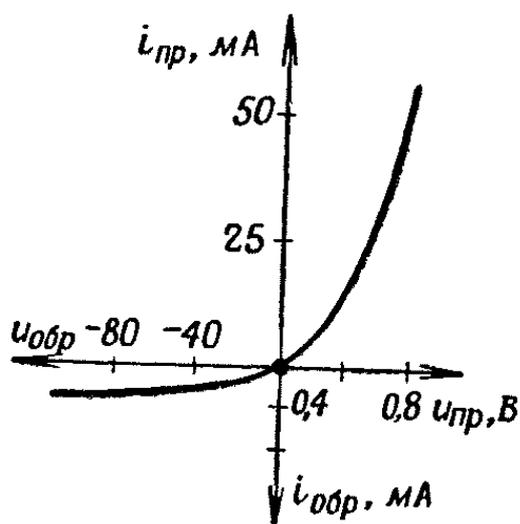


Рис. 7 Типичная характеристика полупроводникового детекторного диода

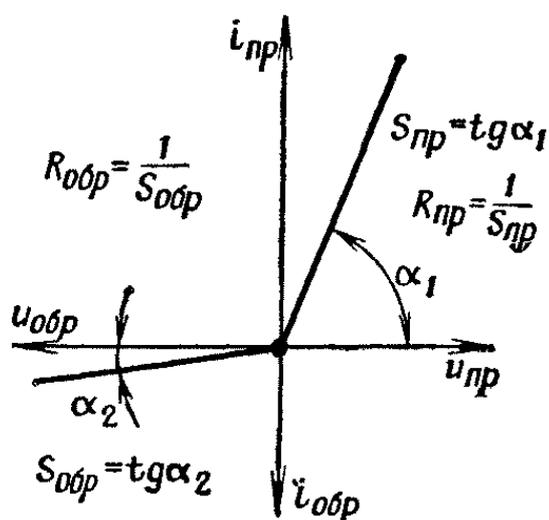


Рис. 8 Идеализированная характеристика полупроводникового детекторного диода

Если амплитуда входного напряжения достаточно велика (единицы вольт), то детектор работает в режиме, который условно на-

зывают «линейным». Если амплитуда входного напряжения мала (милливольты), то детектор работает в режиме, который называют «квадратичным».

В «линейном» режиме результаты детектирования практически не зависят от формы характеристики диода. Они определяются только крутизной ее прямолинейного участка и обратным сопротивлением диода. Поэтому при детектировании сильных (больших) сигналов характеристику диода можно изображать в идеализированном виде (Рис. 8). Поскольку практически $S_{пр} \gg S_{обр}$, то при детектировании больших сигналов коэффициент передачи детектора получается примерно 0,5—0,8. При этом он не зависит от амплитуды детектируемого сигнала.

В этих условиях входное сопротивление детектора имеет величину

$$R_{вх} \approx \frac{R_{н. п} \cdot R_{обр.}}{3 R_{н. п} + 2 R_{обр.}} \quad (4.2)$$

Если следующий за детектором каскад выполнен на транзисторе, то в большинстве случаев $R_{н. п} \ll R_{обр.}$. Тогда с достаточной точностью

$$R_{вх} \approx \frac{R_{н. п}}{2}. \quad (4.3)$$

Наиболее часто входное сопротивление детектора на полупроводниковом диоде получается порядка сотен ом.

Физические процессы, происходящие в детекторе при детектировании амплитудно-модулированных колебаний, показаны на

Рис. 9 Из рисунка видно, что среднее значение тока диода изменяется по закону модуляции детектируемого сигнала. Следовательно, и выходное напряжение соответствует огибающей высокочастотного сигнала.

В переносных и карманных транзисторных приемниках напряжение на входе детектора обычно мало. Поэтому режим детектирования оказывается квадратичным. В этом режиме детектор имеет сравнительно большое входное сопротивление (тысячи ом), но очень небольшой коэффициент передачи напряжения. При этом $K_{п}$ зависит от характеристики диода и амплитуды входного напряжения. Наиболее часто $K_{п} = 0,1—0,4$. Величина входного сопротивления квадратичного детектора может быть найдена приблизительно по уравнению

$$R_{вх} \approx \frac{R_{н. п} \cdot R_{обр.}}{R_{н. п} + 2 R_{обр.}}$$

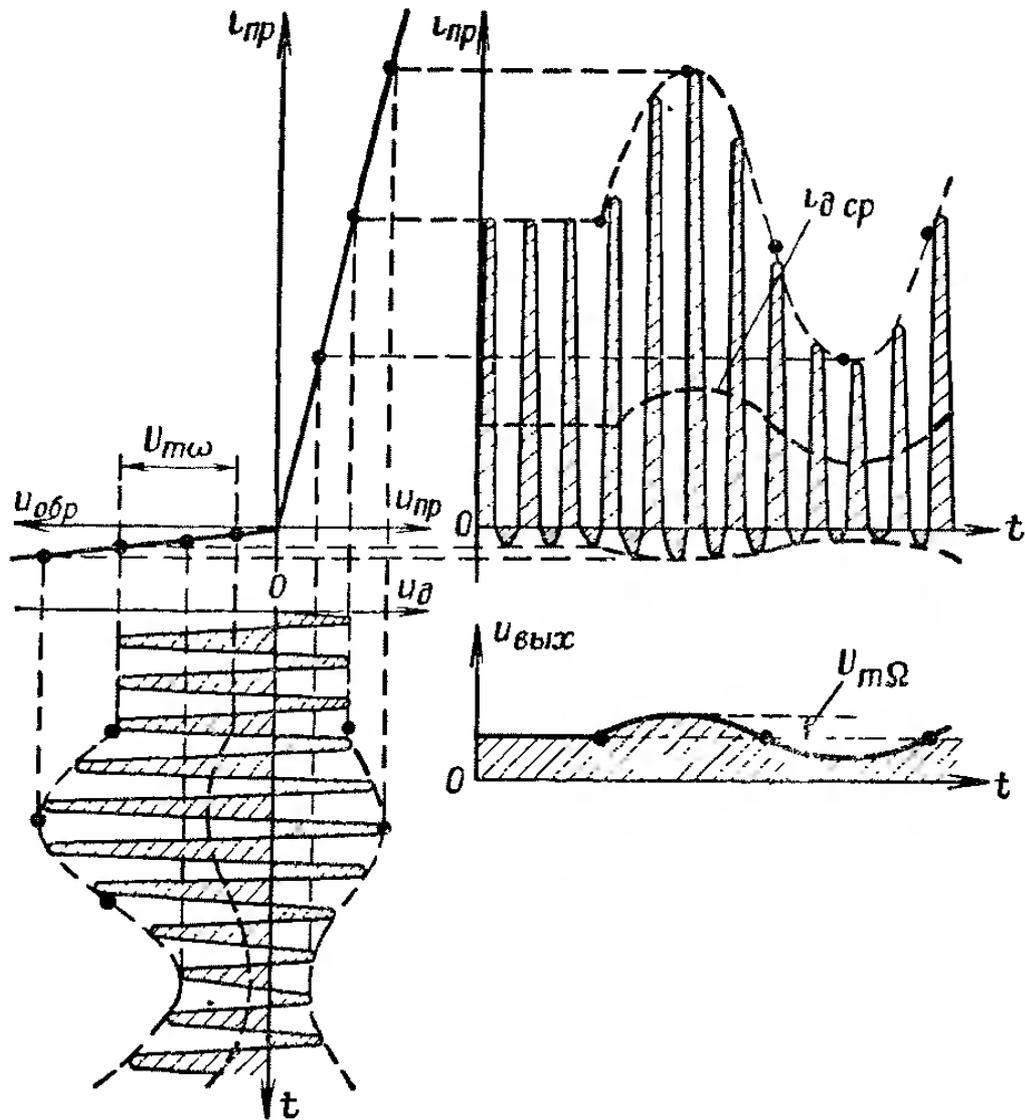


Рис. 9 Графики процесса детектирования амплитудно-модулированных колебаний полупроводниковым диодом

Искажения информационного сигнала в детекторе.

Выделяемый в детекторе информационный сигнал может оказаться искаженным. Если информационный сигнал сложный, то искажения могут быть нелинейные и частотные.

а) **Нелинейные искажения.** Основная причина нелинейных искажений заключается в инерционности детектора, из-за которой огибающая детектируемого напряжения может воспроизводиться неточно. Поясним сказанное примером. На Рис. 10 видно, что напряжение на нагрузке детектора u_H обусловлено процессом заряда и разряда конденсатора C_H . Заряд происходит через диод, а разряд через резистор R_H . Если элементы C_H и R_H выбраны правильно, то усредненное напряжение u_H соответствует огибающей детектируемого колебания. Но частота огибающей и глубина модуляции не постоянны. На практике они могут изменяться в широких пределах.

На Рис. 11 показан процесс образования напряжения u_H при достаточно высокой модулирующей частоте и значительной глубине модуляции. Там видно, что напряжение u_H во время разряда конденсатора C_H изменяется медленнее, чем уменьшается амплитуда входного напряжения. Напряжение на нагрузке детектора не успевает следовать за изменениями амплитуды высокочастотного колебания. В этом случае напряжение на выходе детектора не соответствует огибающей входного напряжения. Информационный сигнал получается искаженным.

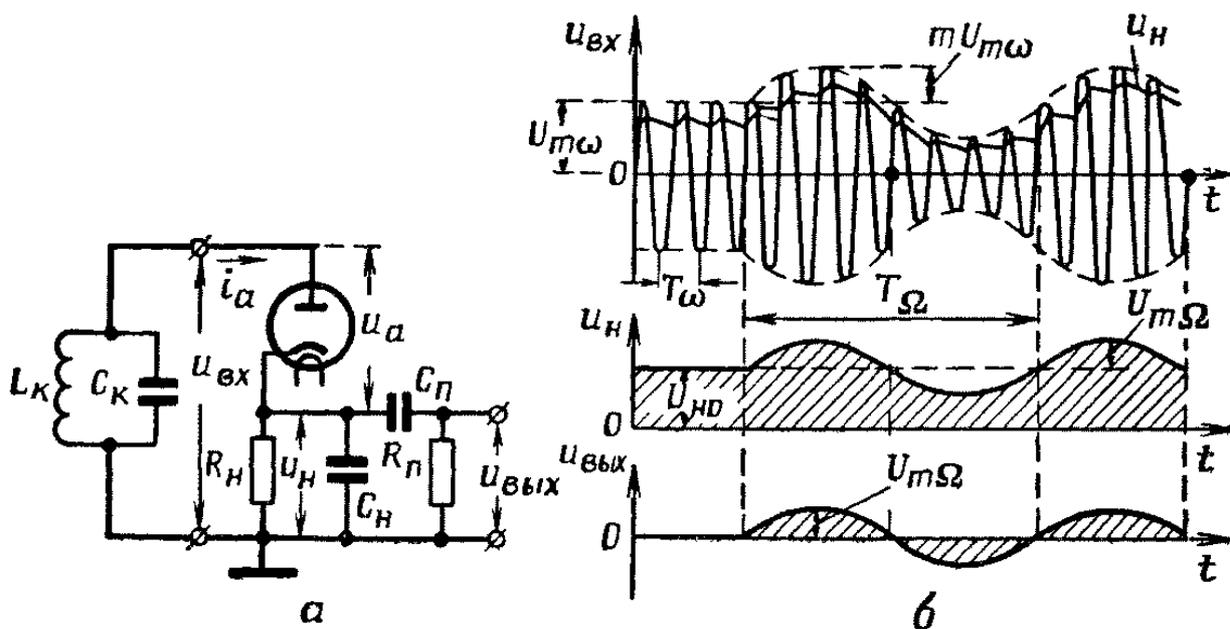


Рис. 10 Схема диодного детектора приемника связи и графики процесса преобразования модулированного напряжения высокой частоты в напряжение звуковой частоты

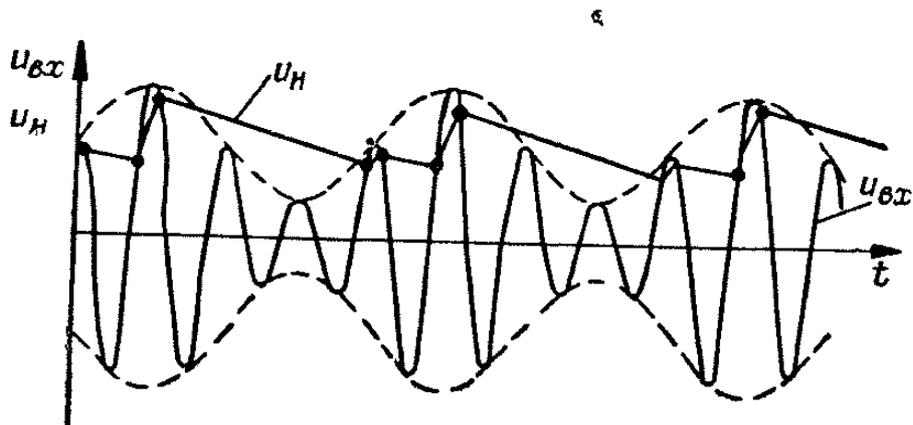


Рис. 11 Нелинейные искажения в диодном детекторе

Аналитически доказано, что рассматриваемые искажения отсутствуют, если постоянная времени нагрузки детектора соответствует неравенству

$$C_{н} \cdot R_{н} < \frac{\sqrt{1 - m^2}}{2\pi \cdot F_{в} \cdot m}, \quad (4.4)$$

где m — коэффициент глубины модуляции детектируемого напряжения;

$F_{в}$ — высшая частота информационного сигнала (высшая частота модуляции).

Соотношение (4.4) называют условием безынерционности диодного детектора. Оно верно для любого диодного детектора. В детекторе на полупроводниковом диоде сопротивление $R_{н}$ обычно бывает порядка тысяч ом, а емкость $C_{н}$ порядка тысяч пикофард.

Нелинейные искажения информационного сигнала могут возникать по причине значительного различия в величине нагрузки для постоянного тока диода и для его переменной составляющей звуковой частоты. Если входное сопротивление следующего каскада мало (транзисторный каскад), то $R_{н.п}$ может быть значительно меньше $R_{н}$. В этом случае входное сопротивление простейшей схемы детектора (Рис. 6) очень мало (уравнение (4.3)). Поэтому приходится применять очень слабую связь с контуром предыдущего каскада. Но тогда сигнал на входе детектора оказывается столь малым, что детектирование получается квадратичным. Оно сопровождается значительными нелинейными искажениями выделяемого сигнала.

Передача информации по средствам открытых лазерных каналов.

С момента своего изобретения лазеры зарекомендовали себя как «готовые решения ещё не известных проблем». В силу уникальных свойств излучения лазеров, они широко применяются во многих отраслях науки и техники, а также в быту (проигрыватели компакт-дисков, лазерные принтеры, считыватели штрих-кодов, лазерные указки и пр.). В промышленности лазеры используются для резки, сварки и пайки деталей из различных материалов. Высокая температура излучения позволяет сваривать материалы, которые невозможно сварить обычными способами (к примеру, керамику и металл). Луч лазера может быть сфокусирован в точку диаметром порядка микрона, что позволяет использовать его в микроэлектронике (так называемое лазерное скрайбирование). Лазеры используются для получения поверхностных покрытий материалов (лазерное легирование, лазерная наплавка, вакуумно-лазерное напыление) с целью повышения их износостойкости. Широкое применение получила также лазерная маркировка промышленных образцов и гравировка изделий из различных материалов. При лазерной обработке материалов на них не оказывается механическое воздействие, поэтому возникают лишь незначительные деформации. Кроме того весь технологический процесс может быть полностью автоматизирован. Лазерная обработка потому характеризуется высокой точностью и производительностью.

В настоящее время бурно развивается так называемая лазерная связь. Известно, что чем выше несущая частота канала связи, тем больше его пропускная способность. Поэтому радиосвязь стремится переходить на всё более короткие длины волн. Длина световой волны в среднем на шесть порядков меньше длины волны радиодиапазона, поэтому посредством лазерного излучения возможна передача гораздо большего объёма информации. Лазерная связь осуществляется как по открытым, так и по закрытым световодным структурам, например, по оптическому волокну. Свет за счёт явления полного внутреннего отражения может распространяться по нему на большие расстояния, практически не ослабевая.

Лазерные устройства могут осуществлять передачу любого сетевого потока. Передатчик преобразует электрические сигналы в модулированное излучение лазера в инфракрасном диапазоне с длиной волны 600 — 900 нм и мощностью до 40 мВт. В качестве среды распространения лазерная связь использует атмосферу. Затем лазерный луч попадает в приемник, имеющий максимальную чувствительность в диапазоне длины волны излучения. Приемник производит преобразование излучения лазера в сигналы используемого электрического или оптического интерфейса. Так осуществляется связь с помощью лазерных систем.

Будем рассматривать передачу информации на Земле и в космосе, так как здесь имеется принципиальное отличие – в космосе нет атмосферы, т. е. межзвездный газ настолько разрежен, что рассеивание по сравнению с земным практически не происходит, да и о погоде не приходится говорить. Для передачи информации оптический сигнал модулируют и передают специальной установкой, в свою очередь в месте назначения приемник улавливает сигнал. Если канал имеет большую протяженность имеет смысл ретранслировать передающий сигнал. Схема приведена на рис. 12.

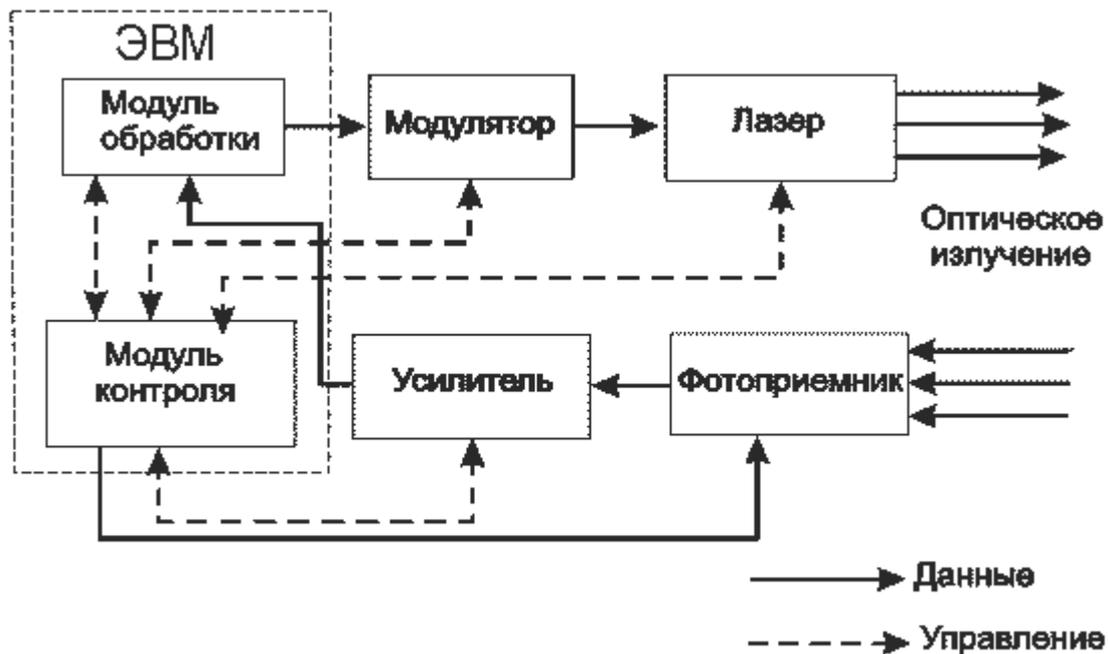


Рис. 12. Организация лазерного канала связи.

Модуляция - это изменение параметров светового луча в зависимости от управляющего (модулирующего) сигнала, несущего информацию, при этом различают две основные формы модуляции: внешнюю и прямую. При внешней модуляции поляризованный световой луч проходит вне источника света в модулятор, в котором в такте передаваемого сигнала изменяется амплитуда или фаза излучения. Модулятор работает на основе электрооптического эффекта. При прямой модуляции излучение модулируется непосредственно за счет возбуждения источника света, т.е. источник света сам излучает модулированный свет. Прямая модуляция может быть реализована только в светодиодах и инжекционных лазерах, что достигается путем модуляции тока накачки.

Обнаружение модулированного излучения при одновременной демодуляции, т. е. воспроизведение передаваемой информации, осуществляется с помощью оптоэлектронных приемников (детекторов). Применяемые фотодетекторы должны иметь следующие характеристики:

- высокую чувствительность в спектральном диапазоне применяемого источника света;
- высокое временное разрешение;
- малые шумы;
- нечувствительность к температуре;
- простую возможность соединения со световодом;
- большой срок службы;
- низкую стоимость.

Применяются специальные фотодиоды, которые наиболее полно удовлетворяют этим требованиям.

Из-за потерь и дисперсии в световоде возникает ослабление и искажение распространяющегося импульса, так что после определенного расстояния необходима регенерация импульса. Эта регенерация осуществляется в ретрансляторе. Задача этого устройства состоит в том, чтобы осуществить усиление, а также формирование (регенерацию) импульса. Принцип действия такого устройства состоит в том, что входящий оптический сигнал в приемнике преобразуется в электрические импульсы, а затем происходит их усиление, а также формирование в электронном усилителе.

Регенерированный и усиленный сигнал служит затем в качестве управляющего сигнала в источнике света передатчика, который снова передает сигнал по следующей волоконно-оптической линии. Регенерация импульсов должна повторяться через определенное расстояние в линии передачи. Допустимое максимальное расстояние между двумя ретрансляторами зависит от параметров системы, в частности от скорости передачи двоичных единиц информации, источника света и применяемого типа световода.

В системах оптических линий связи используются инфракрасные лазеры, которые генерируют свет в диапазоне около 200 ТГц, что соответствует длине волны порядка 1 мкм. Такой диапазон не требует лицензирования не только в России, но и во всем мире. Имеющееся на рынке оборудование работает на одной из двух длин волн – 850 или 1550 нм. Лазеры, излучающие длину волны 850 нм, намного дешевле, чем для волн 1550 нм, и поэтому предпочтительны для связи на дистанции до 100 м.

Однако если речь идет о более дальних расстояниях, мощном и в то же время безопасном для глаз излучении, то на первый план выходят длинноволновые лазеры. Инфракрасное излучение на длине волны 1550 нм поглощается роговицей глаза и не доходит до сетчатки. Нормами допускается мощность почти на два порядка больше, чем для 850-нанометровых лазеров. Это позволяет увеличить длину канала примерно в 5 раз при сохранении устойчивой связи, а при использовании на коротких расстояниях – значительно повысить скорость передачи данных.

Как и всякая технология, беспроводная оптика имеет сильные и слабые стороны. Нужно признать, что на устойчивость и производительность канала

существенное влияние оказывают и состояние окружающей атмосферы, и особенности распространения в ней инфракрасного луча (см. таблица 1).

Таблица 1. Данные приведенные для длины волны 850 нм.

Погодные условия	Общий коэффициент затухания $k \cdot 10^{-9}$	Затухания (Дб/км)
Ясная погода	0,027	0-3
Слабый дождь	0,108	3-6
Сильный дождь	0,162	6-17
Снег	0,189	6-26
Легкий туман	0,216	20-30
Густой туман	0,291	50-100
Облачность	0,406	300-400

Дальность связи оценивается следующим соотношением:

$$D = \sqrt{\frac{P_t S_r t}{\pi P_r \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \quad (5.1)$$

где P_t и P_r - мощность лазерного излучателя и пороговая мощность фотоприемного устройства, S_r - площадь апертуры фотоприемного устройства, α – угол расходимости лазерного излучения t - суммарный коэффициент потерь лазерного излучения за счет поглощения и рассеяния в атмосфере, оптических системах и других элементах канала. Существует несколько способов повышения уровня надежности беспроводной оптической связи:

- увеличение мощности передатчика или чувствительности приемника;
- уменьшение угловой расходимости светового пучка;
- сокращение расстояний, на которых осуществляется беспроводная связь.

Передачики оптического диапазона.

Основой оптического передатчика может являться как лазер (газовый или полупроводниковый) - оптический квантовый генератор (ОКГ), создателями которого являются лауреаты Нобелевской премии за 1964 г. Н.Г. Басов (Россия), А.М. Прохоров (Россия), Ч.Х. Таунс (США), так и обычный светодиод. В основе работы лазеров лежит явление вынужденного или индуцированного излучения, возникающее в веществе в результате согласованного по частоте и направлению одновременного испускания электромагнитных волн огромным числом атомов и молекул под действием внешнего электромагнитного поля. Принцип устройства и структурная схема лазера, поясняющая его работу, приведены на рис.13.



Рис. 13. Принцип устройства и структурная схема лазера.

Активная среда лазера служит для преобразования подводимой к ней извне энергии от генератора накачки в энергию электромагнитного поля. Взаимодействуя с активной средой, электромагнитные колебания усиливаются за счет вынужденного излучения электронов.

Классифицировать лазеры можно по нескольким признакам:

- в зависимости от диапазона волн: ультрафиолетового, инфракрасного и видимого излучения;
- по режиму работы: непрерывного и импульсного излучения;
- по агрегатному состоянию активной среды: газовые, твердотельные, жидкостные, полупроводниковые;
- по методу накачки: путем электронного, оптического и других методов возбуждения.

В качестве примера укажем, что мощность твердотельных импульсных лазеров достигает 1000 МВт при длительности импульса в 30 нс, газовых лазеров непрерывного излучения – 10 кВт. В системах оптической связи наиболее предпочтительно использование полупроводниковых лазеров из арсенида галлия, имеющих в непрерывном режиме работы мощность до 10 Вт,

а импульсном - до 100 Вт.

Лазеры применяются для следующих целей:

- в оптических системах связи в космическом пространстве;
- волоконно-оптических линиях связи, в которых луч лазера распространяется по волоконному световоду;
- устройствах высокоточного измерения расстояний;
- оптических системах обработки информации;
- светолокации;
- в качестве высокоточного оружия.

Излучения передатчиков оптического диапазона (сокращенно - оптические передатчики) занимают диапазон волн 0,01 – 100 мкм, который подразделяется на четыре поддиапазона:

- ультрафиолетовый - 0,01...0,38 мкм;
- видимый - 0,38...0,77 мкм;
- инфракрасный - 0,77...10,0 мкм;
- субмиллиметровый - 0,40...100,0 мкм.

По устройству оптический передатчик, структурная схема которого приведена на рис. 14, представляет собой совокупность радиоэлектронных и оптических элементов и блоков.

В оптическую часть передатчика входят: лазер, модулятор света и оптические линзы, фокусирующие и ориентирующие луч света в требуемом направлении. В радиотехническую часть передатчика входят: СВЧ усилитель, согласующее устройство, связывающее вход модулятора с выходом усилителя, и кодер, служащий для кодирования передаваемого сообщения.

Преимущества оптического передатчика состоят:

- в возможности передачи с высокой скоростью как цифровой (109 бит/с и выше), так и аналоговой (десятки гигагерц) информации исключительно большого объема;
- высокой когерентности и острой направленности излучения, что позволяет существенно снизить мощность передатчика;
- высокой помехозащищенности, особенно при использовании волоконных световодов.



Рис. 14. Структурная схема оптического передатчика

Рассмотрим более подробно работу оптической системы связи в космическом пространстве. Ее применение для передачи информации на большие расстояния в околоземном пространстве из-за сильного влияния атмосферы на луч света может приводить к столь сильному затуханию в канале связи, что прием сигнала может стать невозможным. Зато весьма эффективно применение оптических систем связи в космическом пространстве, где затухание и расходимость луча света незначительны. В такой глобальной системе связь между спутниками вне земной атмосферы осуществляется с помощью оптической лазерной системы, а передача информации на Землю - в радиодиапазоне. Структура такой комбинированной оптико-радиоэлектронной системы приведена на рис. 15.

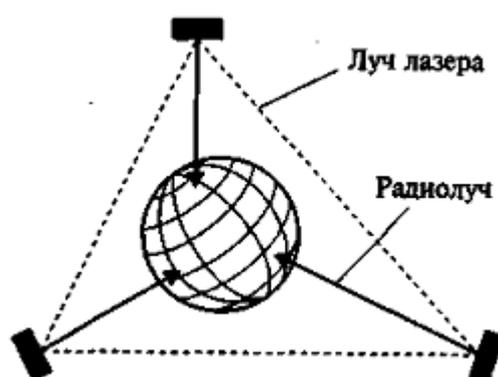


Рис. 15. Структура комбинированной оптико-радиоэлектронной системы глобальной связи

В оптических передатчиках, как и радиопередающих устройствах, возможно осуществление различных видов модуляции, в том числе амплитудной, частотной, фазовой, поляризационной и импульсной. При этом возможна модуляция путем непосредственно воздействия на лазер, или с помощью внешнего модулятора, устанавливаемого на пути лазерного луча.

Оптический модулятор это устройство по вводу информации в световую волну путем управления одним из ее параметров. Классифицировать модуляторы света можно в зависимости:

- от управляемого параметра световой волны, как и в радиодиапазоне; различают амплитудную, фазовую, частотную и поляризационную модуляцию. При каждом из названных видов модуляции соответствующий параметр световой волны, например, амплитуда, изменяется в соответствии с законом модулирующего сигнала. В зависимости от формы сигнала различают аналоговую, цифровую и импульсную модуляцию;

- физического принципа, лежащего в основе работы устройства; различают электрооптические, магнитооптические, акустооптические модуляторы и основанные на управлении интенсивностью света.

Рассмотрим подробнее названные физические эффекты. Работа модулятора света внешнего типа основана на взаимодействии когерентного излучения со средой с управляемыми оптическими свойствами: коэффициентом

преломления, влияющим на фазовую скорость световой волны, или коэффициентом поглощения, определяющим интенсивность проходящего света. Фаза луча, прошедшего через кристалл, изменяется на величину

$$\varphi = (2\pi/\lambda)Ln,$$

где λ - длина волны света в вакууме; L - длина кристалла; n - коэффициент преломления среды.

При возможности управления значением n можно осуществлять фазовую модуляцию световой волны, преобразуя ее затем в амплитудную. Такое изменение значения n реализуется на основе электрооптического, магнитооптического и акустооптического эффектов. Электрооптический эффект. При этом эффекте наблюдается зависимость у некоторых типов кристаллов (один из них называется КДП) коэффициента преломления n от напряженности внешнего электрического поля E (рис. 16, а). Есть кристаллы с линейной зависимостью $n = kE$, особенно удобные для модуляции света. Разместив такой кристалл в зазоре коаксиального резонатора, возбуждаемого СВЧ сигналом, можно модулировать луч света. Такое устройство, показанное на рис. 16, б, и есть один из вариантов электрооптического модулятора света.

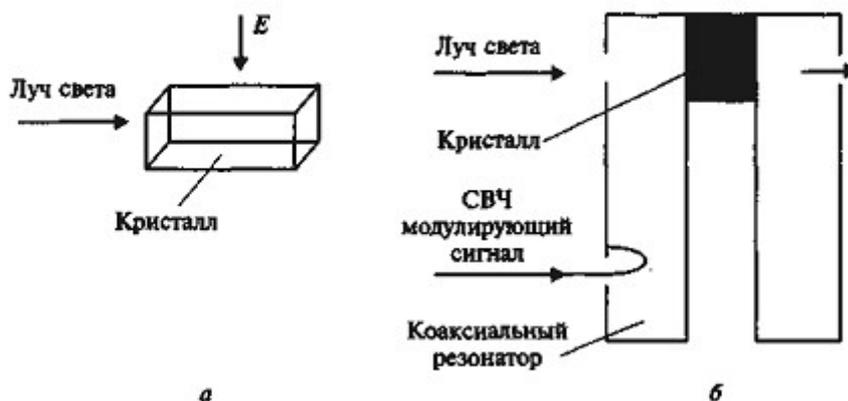


Рис. 16. Вариант электрооптического модулятора света.

Рассмотрим магнитооптический эффект. При этом эффекте наблюдается зависимость у некоторых типов кристаллов (один из них называется ЖИГ) коэффициента преломления n от напряженности внешнего магнитного поля H (рис. 17).

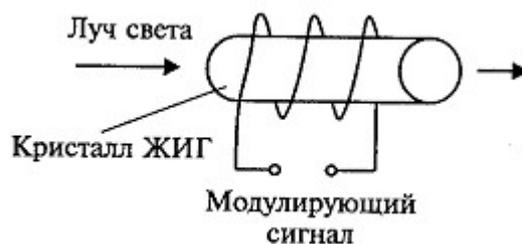


Рис. 17. Магнитооптический модулятор света.

Пропустив свет через такой кристалл, и управляя внешним магнитным полем с помощью соленоида, можно создать магнитооптический модулятор света. Лазерные диоды и их модуляция. Источником лазерного излучения небольшой мощности могут служить изготовленные по определенной технологии полупроводниковые структуры. Такие очень малые по размерам и высокой надежности лазерные диоды особенно удобны для применения в оптических интегральных схемах и волоконно-оптических устройствах. Принцип действия амплитудной модуляции лазерного диода поясняет рис. 18.

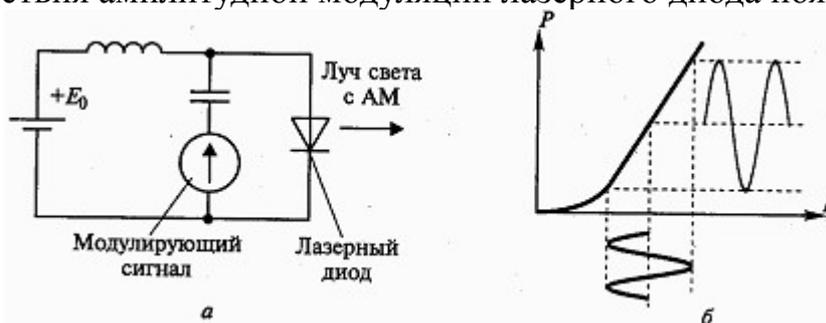


Рис. 18. Принцип действия амплитудной модуляции светодиода или лазерного диода.

К лазерному диоду приложено постоянное напряжение E_0 и модулирующий высокочастотный сигнал (рис. 18, а). Характеристика зависимости интенсивности лазерного излучения диода от тока $P=f(I)$ показана на рис. 18, б. В соответствии с законом модулирующего сигнала меняется интенсивность лазерного излучения, т. е. осуществляется амплитудная модуляция (АМ). Схема, приведенная на рис. 18, а, пригодна при частоте модулирующего сигнала до 100 МГц. При СВЧ модулирующем сигнале лазерный диод располагается в резонаторе или сопрягается с микрополосковыми линиями.

Приём сигналов в оптическом диапазоне длин волн.

Приемники оптического диапазона волн строятся с использованием прямого усиления сигналов и супергетеродинного метода приема.

Структурная схема приемника прямого усиления, работающего в оптическом диапазоне, изображена на Рис. 19. На входе приемника включен оптический фильтр (ОФ), ограничивающий спектр оптических колебаний, передаваемых от антенны к усилителю оптических сигналов. Оптические фильтры представляют собой линзовые системы, ослабляющие паразитную фоновую радиацию. Они обладают большой прозрачностью в области частотного спектра принимаемого сигнала и малой прозрачностью за пределами этого спектра. Системы оптической фильтрации основыва-

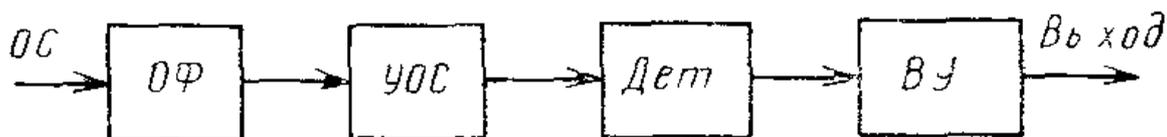


Рис. 19

ются на использовании пространственных свойств сфокусированных полей, в частности их поляризации или частотных свойств самих линз. Реализуемые частотные фильтры имеют полосу пропускания порядка сотен гигагерц. В качестве антенны в оптическом диапазоне используется телескоп.

Усилителем оптических сигналов (УОС) может служить квантово-механический усилитель либо недовозбужденный лазер соответствующего диапазона волн. Далее оптический сигнал поступает к детектору (Дет), преобразующему оптические сигналы в электрические, повторяющие закон модуляции входных оптических сигналов. В качестве детектора используются фотоэлектрические преобразователи: полупроводниковые (фотосопротивления, фотодиоды) либо вакуумные (фотоэлементы, фотоэлектронные умножители — ФЭУ). После детектора следует видеоусилитель (ВУ), на выходе которого должен быть достигнут необходимый уровень мощности.

С целью упрощения приемника часто отказываются от применения УОС и после оптического фильтра включают фотодиод или ФЭУ.

Найдем предельное значение чувствительности $P_{c \min}$ приемника оптического диапазона, имеющего на входе фотодетектор. Понятие коэффициента шума приемников оптического диапазона неприемлемо, так как вследствие квантовой природы света с увеличением сигнала увеличивается и шум, определяемый дискретностью кванта. Поэтому коэффициент шума не является достаточной характеристикой чувствительности приемника. Фотодетекторы характеризуют квантовой эффективностью η , определяемой отношением числа электронов, излучаемых при действии одного кванта энергии оптических колебаний, т. е.

$$\eta = n_{\text{эл}}/p_{\text{фот}}, \quad (16.1)$$

где $n_{\text{эл}}$ — число фотоэлектронов на выходе фотодетектора; $p_{\text{фот}}$ — число фотонов, действующих на фотодетектор. У современных фотодиодов квантовая эффективность $\eta \approx 0,8 \div 0,9$.

Допустим, что на поверхность фотодетектора попадает оптический сигнал. Мощность колебания равна P_c . Тогда число фотонов, действующих на фотодетектор в одну секунду,

$$p_{1\text{ф}} = P_c/hf, \quad (16.2)$$

где hf — энергия кванта оптического колебания; h — постоянная Планка; f — частота оптического колебания.

Выходной ток фотодиода будет равен заряду электрона, умноженному на число фотоэлектронов, излученных поверхностью фотозлектрического преобразователя в одну секунду:

$$I_c = e n. \quad (16.3)$$

Учитывая соотношения (16.1) и (16.2), получаем

$$I_c = e \eta P_c/hf. \quad (16.4)$$

При действии постоянного уровня мощности оптического излучения P_c на выходе фотодетектора будет существовать постоянная составляющая тока I_0 , определяемая формулой (16.4), и сопутствующий этой постоянной составляющей шумовой ток, обусловленный дискретностью носителей заряда (дробовый шум).

Эффективное значение шумового тока

$$I_{\text{ш.эфф}} = \sqrt{2 e I_0 \Delta f_{\text{эфф}}}. \quad (16.5)$$

Обозначим отношение сигнал-шум $\gamma = I_c/I_{\text{ш.эфф}}$. Учитывая, что $I_0 = I_c$, находим

$$\gamma = I_c/\sqrt{2 e I_c \Delta f_{\text{эфф}}} = \sqrt{I_c/2 e \Delta f_{\text{эфф}}}. \quad (16.6)$$

После подстановки в формулу (16.6) вместо I_c его значения и решения относительно P_c

$$P_{c \min} = 2 \gamma^2 hf \Delta f_{\text{эфф}}/\eta. \quad (16.7)$$

При заданном отношении сигнал-шум γ — чувствительность приемника оптического диапазона улучшается с уменьшением эффективной полосы пропускания тракта и с увеличением квантовой эффективности. При увеличении рабочей частоты f чувствительность детекторного приемника ухудшается.

Заметим, что расчет шумовых характеристик приемника, приводящий к формуле (16.7), выполнен без учета шума видеоусилителя и шума темнового тока фотодиода. В реальных условиях чувствительность оптического приемника окажется несколько хуже, чем рассчитанная по формуле (16.7).

Эквивалентная шумовая схема входа детекторного приемника оптических сигналов изображена на Рис. 20. Детектор оптичес-

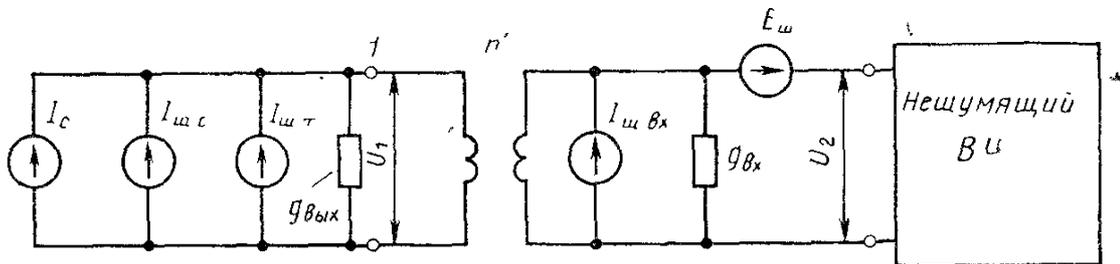


Рис. 20

ских сигналов (фотодетектор) представлен тремя генераторами тока: I_c , $I_{ш.с}$, $I_{ш.т}$ и выходной проводимостью $g_{вых}$. Ток I_c обусловлен оптическим сигналом, действующим на фотодетектор, и представляет собой полезный эффект детектирования. Согласно соотношению (16.4)

$$I_c = \eta P_c e/hf. \quad (16.8)$$

Одновременно с полезным результатом детектирования в выходной цепи детектора возникает шумовой ток, обусловленный дискретностью носителей зарядов

$$I_{ш.с}^2 = 2 e I_c \Delta f_{эфф}. \quad (16.9)$$

Кроме того, в выходной цепи детектора существует шумовой ток, величина которого не зависит от действующего сигнала. Этот ток определяется темновым током фотодиода I_T , т. е. током в отсутствие оптического сигнала. Шумовой ток, обусловленный этим темновым током,

$$I_{ш.т}^2 = 2 e I_T \Delta f_{эфф}. \quad (16.10)$$

В современных фотодетекторах ток I_T не превышает 1—100 пА. Последующий тракт усиления представлен двумя шумовыми генераторами:

$$I_{\text{ш,вх}}^2 = 4 kT_0 (\alpha g_{\text{вх}}) \Delta f, \quad E_{\text{ш}}^2 = 4 kT_0 R_{\text{ш}} \Delta f, \quad (16.11), (16.12)$$

входной проводимостью $g_{\text{вх}}$ и нешумящим видеоусилителем. Между детектором и последующим трактом в качестве согласующего устройства включен идеальный трансформатор с коэффициентом трансформации $n = U_2/U_1$.

Найдем квадрат отношения сигнал-шум на входе видеоусилителя:

$$\gamma^2 = U_c^2/U_{\text{ш}}^2.$$

Напряжение сигнала

$$U_c = I_c n / (g_{\text{вых}} + n^2 g_{\text{вх}}). \quad (16.13)$$

Квадрат суммарного напряжения шума

$$U_{\text{ш}}^2 = [(I_{\text{ш,с}}^2 + I_{\text{ш,т}}^2 + n^2 I_{\text{ш,вх}}^2) n^2 / (g_{\text{вых}} + n^2 g_{\text{вх}})^2] + E_{\text{ш}}^2. \quad (16.14)$$

Учитывая соотношения (16.13) и (16.14), квадрат отношения сигнал-шум определится как

$$\gamma^2 = I_c^2 / \{ I_{\text{ш,с}}^2 + I_{\text{ш,т}}^2 + n^2 I_{\text{ш,вх}}^2 + E_{\text{ш}}^2 [(g_{\text{вых}}/n) + n g_{\text{вх}}]^2 \}.$$

При значениях $n \rightarrow 0$ и $n \rightarrow \infty$ отношение сигнал-шум стремится к нулю. Существует оптимальный коэффициент трансформации $n_{\text{опт,ш}}$, при котором отношение сигнал-шум максимальное. Дифференцируя знаменатель выражения и приравнявая его нулю, получаем

$$\begin{aligned} n_{\text{опт,ш}} &= \sqrt[4]{g_{\text{вых}}/g_{\text{вх}}} / \sqrt[4]{1 + I_{\text{ш,вх}}^2/E_{\text{ш,вх}}^2 g_{\text{вх}}^2} = \\ &= \sqrt[4]{g_{\text{вых}}/g_{\text{вх}}} / \sqrt[4]{1 + \alpha/R_{\text{ш}} g_{\text{вх}}}. \end{aligned}$$

Коэффициент трансформации $n_{\text{опт,ш}}$ отличается от $n_{\text{опт}} = \sqrt{g_{\text{вых}}/g_{\text{вх}}}$, необходимого для режима согласования детектора с видеоусилителем. Это отличие зависит от произведения $R_{\text{ш}} g_{\text{вх}}$. При большом $R_{\text{ш}} g_{\text{вх}}$ оптимальный коэффициент трансформации $n_{\text{опт,ш}}$ практически не отличается от $n_{\text{опт}}$.

В режиме согласования, когда $n = n_{\text{опт}}$, с учетом соотношений (16.8) — (16.12)

$$\gamma^2 = P_c \eta / 2 h f \Delta f (1 + I_T/I_c + \alpha g_{\text{вых}}/20 I_c + R_{\text{ш}} g_{\text{вых}} g_{\text{вх}}/5 I_c).$$

Для получения большого отношения сигнал-шум необходимо уменьшать темновой ток диода I_T и выходную проводимость фотодетектора и применять в качестве видеоусилителей приборы с минимальным произведением $R_{ш}g_{вх}$. При достаточно большой мощности сигнала, т. е. такой, что удовлетворяются следующие неравенства: $I_c \gg I_T$, $I_c \gg \alpha g_{вх}/20$, $I_c \gg R_{ш}g_{вх}g_{вх}/5$,

$$\gamma^2 \approx P_c \eta / 2 h f \Delta f, \quad (16.15)$$

отношение сигнал-шум не будет зависеть от уровня шума видеоусилителя. Этот результат является специфическим и свойственным приему сигналов оптического диапазона. Он обусловлен тем, что вследствие квантового характера излучения с увеличением полезного излучения P_c увеличивается шум фотодетектора, принимающего это излучение. Из соотношения (16.15) следует целесообразность использования более низких частот оптического диапазона для улучшения отношения сигнал-шум.

Следует заметить, что применение современных ФЭУ в качестве детектора и видеоусилителя позволяет получить чувствительность приемника, мало отличающуюся от рассчитанной по формулам (16.7) и (16.15).

Структурная схема приемника оптических сигналов супергетеродинного типа изображена на Рис. 21. Оптический сигнал (ОС),

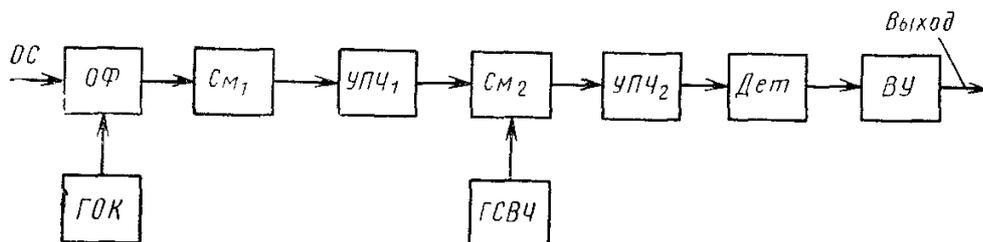


Рис. 21.

принятый телескопом, пропускается через оптический фильтр (ОФ), устраняющий помехи от посторонних засветок. После оптического фильтра сигнал подается на вход фотосмесителя ($СМ_1$). К нему же поступают колебания от местного генератора оптических колебаний (ГОК). В результате совместного действия этих колебаний образуются изменения выходного тока с частотой, равной разности частот указанных колебаний. Разность частот выбирают в области сантиметровых волн. Далее следует тракт, свойственный приемнику сантиметрового диапазона. Если полоса спектра модулирующих сигналов относительно велика, то используется ЛБВ в качестве усилителя первой промежуточной частоты (УПЧ₁). Далее преобразованный сигнал поступает на второй смеситель ($СМ_2$) и затем на усилитель второй промежуточной частоты (УПЧ₂). После соответствующего усиления и выделения спектра желательного сигнала колебания детектируются в детекторе (Дет)

и подаются на видеоусилитель (ВУ). С выходных зажимов видеоусилителя колебания поступают к устройствам преобразования электрических сигналов в сообщения. В многоканальной системе передачи сообщений к выходным зажимам видеоусилителя включают соответствующие цепи разделения каналов.

При использовании приемника на ретрансляционной станции к выходным зажимам подключают регенератор сигналов.

Супергетеродинный метод приема позволяет реализовать чувствительность приемника оптических сигналов, близкую к вычисленной по формуле (16.7), и, кроме того, использовать стандартную аппаратуру разделения каналов в системах многоканальной связи. Однако для реализации этой чувствительности необходимо: согласовать фронт волны ГОК и фронт волны ОС, плоскости поляризации волн ГОК и ОС, типы мод оптических колебаний сигнала и гетеродина.

Можно показать, что квадрат отношения сигнал-шум на выходе фотосмесителя

$$I_c^2/I_{ш.эфф}^2 = (A_c/A) \eta (P_c/hf \Delta f_{эфф}) \cos \varphi (\sin \pi d \alpha/\lambda)/(\pi d \alpha/\lambda),$$

где A_c — общая перекрываемая площадь поперечных сечений лучей сигнала и гетеродина в плоскости фотосмесителя; A — большая из площадей поперечных сечений лучей сигнала и гетеродина; η — квантовая эффективность; d — диаметр поперечного сечения пучка сигнала; λ — длина волны принимаемого ОС; h — постоянная Планка; $\Delta f_{эфф}$ — ширина полосы приемника; α — угол между фронтами волн сигнала и гетеродина; φ — угол между плоскостями поляризации волн гетеродина и сигнала; P_c — мощность сигнала.

Вследствие сильного влияния метеоусловий на работу наземных открытых линий оптической связи в настоящее время наибольшее распространение для наземных систем связи получили световодные или волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). Эти линии защищены от фоновых засветок и, кроме того, благодаря применению световодов обладают стабильными характеристиками передачи сигналов. Внедрение линий оптической связи в практику пока ограничивается трудностями получения однородных световодов большой длины.

Структурные схемы приемников световодных линий связи не отличаются от структурных схем приемников открытых линий связи. В приемниках световодных линий конец световода непосредственно сочленяется с поверхностью фотодиода, обеспечивающего детектирование либо преобразование частоты оптических колебаний

На линиях световодной связи преимущественно используются импульсные методы модуляции: ВИМ, ИКМ, Δ -модуляция. Эти виды модуляции позволяют существенно упростить модуляторы передатчика и осуществить регенерацию принятых сигналов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

Приборы и оборудование.

Эксперимент проводится на учебной модели приема — передающего устройства с наличием ШИМ — модулятора и оптического канала связи. В качестве излучателя используется набор полупроводниковых светодиодов (светодиодов с узкой спектральной характеристикой, имеющей ярко выраженный максимум при определенной длине волны). Роль приемника излучения играет фотодиод, максимум чувствительности приходится на область видимого света.

Принципиальная блок-схема установки РТРУЛ-12 приведена на рис. 22.

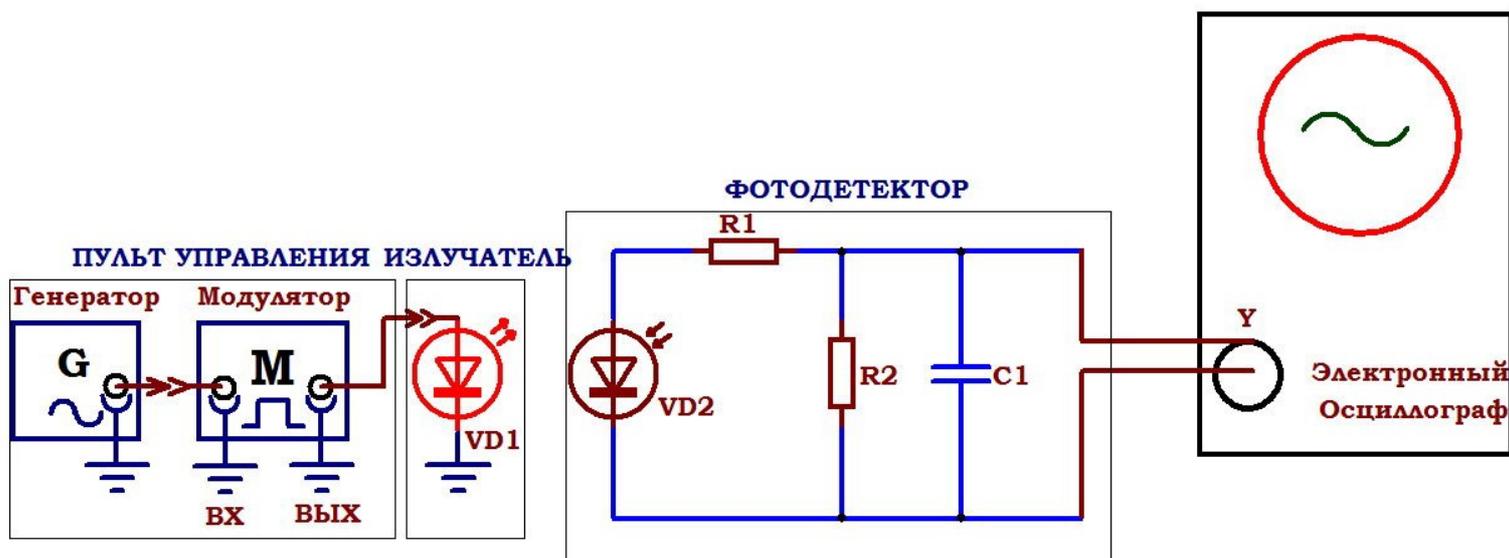


Рис. 22. Блок — схема установки для изучения оптического канала связи.

Генератор гармонического синусоидального сигнала G с перестраиваемой частотой соединяется с помощью переключателя со входом «ВХ» модулятора M. Частота генератора изменяется с помощью ручки «ЧАСТОТА ГЕНЕРАТОРА». Модулятор представляет собой ШИМ — генератор, скважность импульсов которого меняется по закону модулирующего сигнала (в данном случае синуса). Частоту модулятора ступенчато можно изменять с помощью кнопки «ЧАСТОТА МОДУЛЯТОРА» (только при выключенном модуляторе). Модулятор включается/отключается нажатием кнопки «МОДУЛЯТОР ВКЛ/ВЫКЛ». Промодулированный сигнал подается с помощью соединительного экранированного кабеля на один из входов «ИЗЛУЧАТЕЛЯ» (один из светодиодов). Откуда по воздушному оптическому каналу попадает на соосно расположенный с излучателем «ФОТОДЕТЕКТОР». В качестве емкости C1 используются различные конденсаторы из комплекта, подключаемые к клеммам «C1» фотодетектора. Протектированный сигнал с помощью соединительного провода типа «ТЮЛЬПАН — BNC» подается на резистивный вход Y осциллографа, на экране которого должен наблюдаться восстановленный синус, искажения которого будут зависеть от качества детектирования (емкости C1) и параметров передающего устройства (частоты генератора, частоты

модулятора, подключенного светодиода).

Длины волн излучения светодиодов.

Окраска линии (светодиод)	Длина волны из- лучения λ , нм
1. Фиолетовый	410
2. Синий	450
3. Зеленый	540
4. Желтый	580

Порядок выполнения.

1. Перед включением установки в сеть необходимо убедиться в целостности сетевых и соединительных проводов. Все соединительные провода и контрольные точки использовать следует только по назначению, запрещается замыкать выходы контрольных точек.
2. Включить установку в сеть ~ 220 В с помощью прилагаемого силового сетевого кабеля евро-стандарта. Поставить переключатель сеть на панели учебного модуля в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный индикатор «СЕТЬ».
3. Установить ручку «АС – GND – DC» осциллографа в положение «DC» либо «АС». Вращением ручки «ЧАСТОТА ГЕНЕРАТОРА» установить минимально возможную частота синусоидального сигнала.
4. Подключить выход «ГЕНЕРАТОР» с помощью соединительного провода типа «ТЮЛЬПАН — BNC» ко входу Y осциллографа.
5. Вращением ручек VOLTS/DIV и TIME/DIV (ВОЛЬТ/ДЕЛ и ВРЕМЯ/ДЕЛ) и ручек POSITION осей X и Y на электронном осциллографе добиться визуально наиболее удобного изображения сигнала. Для дополнительной синхронизации можно использовать ручку LEVEL. Ручка «Y-LINE-EXT» метода синхронизации должна находиться в положении Y (внутренняя синхронизация). При этом следует учитывать, что оси X (время) и Y (амплитуда) откалиброваны правильно (т. е. подписи у ручек VOLTS/DIV и TIME/DIV верны) только при повернутых до упора ручках плавной регулировки VOLT VAR. и TIME VAR.
6. Оценить по клеткам визуально частоту синусоидального сигнала. Вследствие низкой частоты луч на экране осциллографа будет медленно описывать синусоиду.
7. Отключить соединительный провод типа «ТЮЛЬПАН — BNC» от выхода «ГЕНЕРАТОР» учебной установки и соединить перемычкой генератор со входом модулятора. Модулятор должен быть выключен (кнопка «МОДУЛЯТОР ВКЛ/ВЫКЛ» отжата).
8. С помощью кнопки «ЧАСТОТА МОДУЛЯТОРА» установить минимально возможную частоты ШИМ модулятора по показаниям LCD индикатора.
9. Включить ШИМ нажатием кнопки «МОДУЛЯТОР ВКЛ/ВЫКЛ» при этом на LCD дисплее должен отобразиться «!». Подключить соединительный провод типа «ТЮЛЬПАН — BNC» к выходу модулятора и наблюдать на экране осциллографа за плавным изменением скважности прямоугольных сигналов. Определить частоту ШИМ (остаётся неизменной) и сравнить с показаниями LCD индикатора на учебной установке.
10. Плавно вращая ручку «ЧАСТОТА ГЕНЕРАТОРА» наблюдать на экране осциллографа за скоростью изменения скважности импульсов ШИМ.
11. Отключить ШИМ нажатием кнопки «МОДУЛЯТОР ВКЛ/ВЫКЛ». Установить с помощью кнопки «ЧАСТОТА МОДУЛЯТОРА» частоту ШИМ 4 кГц.

12. Подключить к выходу модулятора с помощью соединительного экранированного кабеля типа «тюльпан — тюльпан» один из входов «ИЗЛУЧАТЕЛЬ» (один из светодиодов). Расположить фотодетектор соосно на одной линии с излучающим лазерным светодиодом на расстоянии $\sim 5 - 10$ см, таким образом, чтобы световой поток от лазерного диода попадал на чувствительный приемник — фотодиод.
13. Вращением ручки «ЧАСТОТА ГЕНЕРАТОРА» установить близкую к максимально возможной (но не максимальную) частоту генератора.
14. Включить модулятор нажатием кнопки «МОДУЛЯТОР ВКЛ/ВЫКЛ».
15. Подключить конденсатор максимальной емкости к клеммам «С1» фотодетектора. Сигнал с выхода фотодетектора при помощи соединительного провода типа «ТЮЛЬПАН — BNC» подать на вход Y осциллографа. Ручку VOLTS/DIV осциллографа установить в положение 10 mV либо 5 mV на деление, так как сигнал с фотодиода достаточно слабый. На экране должен наблюдаться протектированный синусоидальный сигнал с некоторыми искажениями рис. 23.

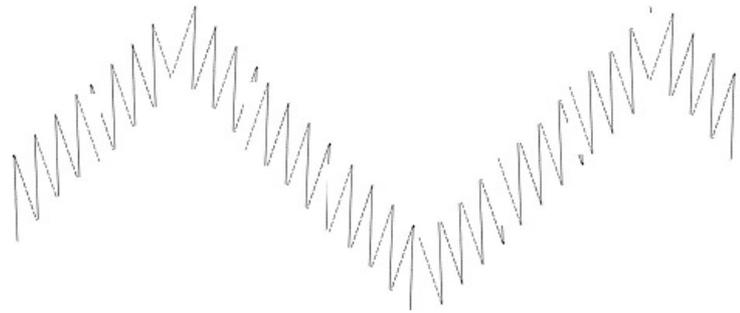


Рис. 23. Протектированный сигнал с выхода фотодетектора.

16. Зарисовать сигнал по клеткам на миллиметровую бумагу. Определить амплитуду, период и частота сигнала. Оценить коэффициент искажений сигнала как отношение амплитуды искажения к амплитуде восстановленного полезного сигнала: $K_{искажений} = \frac{U_{искаж.}}{U_{полез.}}$ (рис. 24).

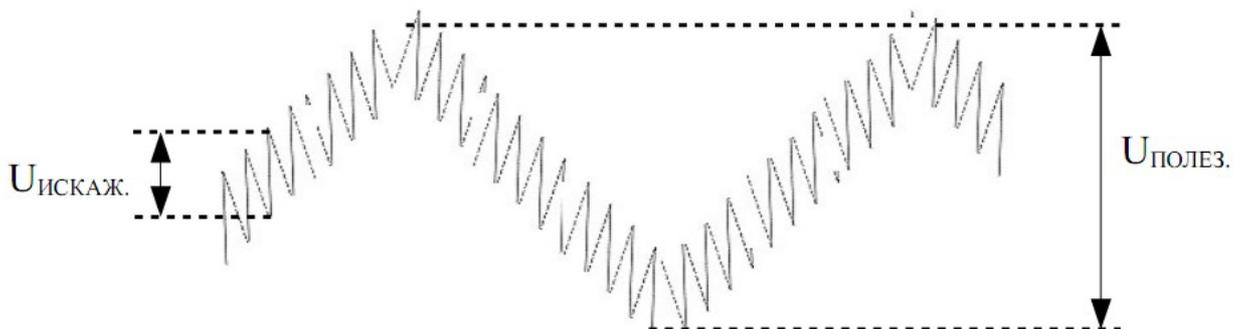


Рис. 24. К определению коэффициента искажения сигнала.

17. Отключить перемычку, соединяющую выход генератора со входом модулятора и подключить к выходу генератора соединительный провод типа «ТЮЛЬПАН — BNC», подав тем самым на вход Y осциллографа сигнал, который необходимо было восстановить в процессе детектирования.

18. Зарисовать сигнал по клеткам на миллиметровую бумагу. Определить амплитуду, период и частота сигнала и сравнить полученные значения со значениями протектированного сигнала. Частоты сигналов должны совпадать, а отношение амплитуды с выхода фотодетектора к амплитуде исходного сигнала позволяет оценить значение передаточной функции

устройства:
$$K_{\text{передачи}} = \frac{U_{\text{вых. фото}}}{U_{\text{ген}}} .$$

19. Отключить ШИМ нажатием кнопки «МОДУЛЯТОР ВКЛ/ВЫКЛ». Установить с помощью кнопки «ЧАСТОТА МОДУЛЯТОРА» частоту ШИМ 31,7 кГц.
20. Повторить пп. 12 — 18 для другой частоты модулятора с конденсатором этого же номинала.
21. Устанавливая низкие частоты ШИМ понаблюдать за процессом детектирования. При низких частотах модулятора полезный сигнал практически исчезает на фоне шумов.
22. На частотах модулятора ШИМ 4 кГц и 31,7 кГц подключать конденсаторы других номиналов к клеммам «С1» и повторить пп. 12 — 18.
23. Подключить к выходу модулятора с помощью соединительного экранированного кабеля типа «тюльпан — тюльпан» другой вход «ИЗЛУЧАТЕЛЬ» (другой светодиод) и повторить пп. 22.
24. Сделать выводы о влиянии частоты модулятора, емкости конденсатора и длины волны излучения на качество детектирования сигнала
- коэффициент передачи
$$K_{\text{передачи}} = \frac{U_{\text{вых. фото}}}{U_{\text{ген}}} .$$
25. По окончании работы отключить электронный осциллограф и учебную установку от сети, поставить все сетевые переключатели в положение «ВЫКЛ».

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Поясните необходимость управления колебаниями радиочастоты передатчика.
2. Что такое модуляция? Назовите виды ее.
3. Что такое амплитудная модуляция? Широко — импульсная модуляция?
4. Назовите способы осуществления амплитудной и ШИМ модуляции.
5. Какие еще виды импульсной модуляции вы знаете?
6. Расскажите о процессе детектирования колебаний.
7. Приведите пример схемы простейшего АМ — детектора и поясните принцип ее работы.
8. Вследствие чего в детекторе возникают нелинейные искажения?
9. Что называют лазерным воздушным каналом связи?
10. Как оценить дальность связи?
11. Назовите способы повышения уровня надежности беспроводной оптической связи.
12. Объясните принципиальную блок-схему установки РТРУЛ-11 для изучения передачи сигналов посредством лазерного канала связи. Какой тип модуляции применен в установке?
13. От каких параметров модулятора и детектора зависит качество полученного полезного сигнала?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Радиопередающие устройства, Учебник для ВУЗов/Под редакцией В.В. Шахгильдяна - М.: Радио и связь, 2003.-560 с.
2. Ворона В.А. Радиопередающие устройства. Основы теории и расчета: Учебное пособие для вузов. _ М.: Горячая линия – Телеком. – 384 с.
3. Проектирование радиопередатчиков: Учебное пособие для вузов/Под редакцией В.В. Шахгильдяна, - М.: Радио и связь, 2003.-656 с.
4. Устройства генерирования и формирования радиосигналов/Под редакцией Г.М. Уткин, В.Н. Кулешова и М.В. Благовещенского,- М.: Радио и связь, 1994.
4. Каганов В.И. Радиопередающие устройства: Учебник для сред. проф. Образования. М.: ИРПО: Изд. Центр <Академия>, 2002.-188 с.
5. Каганов В.И. Радиотехника + компьютер + Matcad. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. - 416 с.
6. Карлашук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. М.: Солон-Р, 2000.-506 с.
7. В.П. Бакалов, А.А. Игнатов, Б.И. Крук. Основы теории электрических цепей и электроники: Учебник для высших учебных заведений.- М.: Радио и связь, 1989. - 525 с.
8. И.С. Гоноровский. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для высших заведений. – М.: Радио и связь, 1996. - 512с.
9. Клоков В.В., Павликов С.Н Проектирование радиопередающего устройства с частотной модуляцией: Учебно-методическое пособие. – Владивосток, МГУ, 2008. – 75с.

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»**