

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 18.01.2022 20:57:13  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

  
О.Г. Локтионова  
« 15 » 02  
Юго-Западный государственный университет, 2018 г.  


## ОСНОВЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

Методические указания  
для проведения лабораторных работ по курсу  
«Теоретические основы технологий беспроводной связи»  
по направлению подготовки 11.03.02.

Курск 2018

УДК 621.3.095

Составитель А.Е.Севрюков, А.Лопез

Рецензент

Доктор физико-математических наук, профессор *А.А. Гуламов*

**Основы беспроводной связи:** методические указания для проведения лабораторных работ по курсу «Теоретические основы технологий беспроводной связи» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. А.Е.Севрюков. Курск, 2018. 30 с.

Содержат методические указания по выполнению лабораторных работ «Основы беспроводной связи» по курсу «Теоретические основы технологий беспроводной связи».

Методические указания соответствуют требованиям типовой программы, утвержденной УМО по направлению подготовки Инфокоммуникационные технологии и системы связи, рабочей программы дисциплины «Теоретические основы технологий беспроводной связи».

Предназначены для студентов направления подготовки 11.03.02 заочной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано печать 15.02 Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,74. Уч.-изд. л.1,58. Тираж 100 экз. Заказ 1906. Бесплатно  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## **ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

1. Выполнению каждой лабораторной работы предшествует самостоятельная предварительная подготовка студента путём изучения по литературе необходимых разделов курса, выполнения расчётов, изучения описания лабораторного макета, задания и порядка выполнения соответствующей лабораторной работы. Подготовленный студент должен также отчётливо представлять, что и как он будет делать, и какие результаты ожидаются в каждом из пунктов работы (мысленный эксперимент).

2. В начале лабораторного занятия каждый студент представляет преподавателю рабочий листок с результатами предварительной подготовки по выполняемой работе: расчетами, схемами отдельных измерений по каждому пункту лабораторного задания и др.

3. К выполнению работы допускаются только подготовленные студенты. Поэтому в начале занятия преподаватель проводит проверку готовности каждого студента путем устного собеседования или с помощью технических средств в объеме материала, указанного в описании лабораторной работы.

4. Студенты, не допущенные к выполнению лабораторной работы, остаются в лаборатории для дополнительной подготовки.

5. В процессе выполнения работы результаты эксперимента аккуратно оформляются в рабочих листках в виде таблиц, графиков и т.д. Результаты каждого пункта должны иметь соответствующие заголовки и пояснения исходных данных, режимов измерений и др.

6. По окончании работы студент (бригада) представляет рабочий листок преподавателю для проверки и отметки о выполнении в журнале. Самовольный уход студентов из лаборатории не допускается.

7. По результатам лабораторной работы каждый студент должен оформить отчёт и защитить работу. Студенты, хорошо подготовившиеся к работе и успешно выполнившие её, могут защитить эту работу в конце занятия (при наличии времени) по рабочим листкам без последующего оформления отчёта.

8. При выполнении работы не рекомендуется часто включать и выключать питание электронных приборов. Питание всех приборов, применяющихся в лабораторной работе, выключается студентами только после выполнения всех пунктов лабораторного задания с разрешения преподавателя.

9. Студенты, пропустившие лабораторное занятие без уважительной причины или не допущенные к выполнению лабораторной работы, выполняют её в специально установленное время (как правило, в конце семестра).

10. Студенты заочного факультета обязаны получить зачёт по лабораторным работам до конца той лабораторно–экзаменационной сессии, в которой выполнялись лабораторные работы. В противном случае все лабораторные работы должны проделываться и защищаться заново во время следующей лабораторно – экзаменационной сессии.

11. При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать правила техники безопасности.

12. Рабочее место в лаборатории должно быть оставлено в полном порядке: приборы должны стоять на положенных местах, провода аккуратно сложены, стулья ставятся вплотную к столу.

## **ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТОВ**

1. Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

- а) Название лаборатории.
- б) Фамилию и инициалы студента.
- в) Номер группы.
- г) Наименование работы.
- д) Номер лабораторной работы.
- е) Перечень приборов.
- ж) Предварительные расчеты.
- з) Структурную схему макета.
- и) Результаты измерений в виде таблиц, графиков и расчётов.
- к) Выводы по работе и оценку результатов.
- л) Дату выполнения работы и личную подпись.

2. При выполнении отчёта не следует переписывать с начала все пункты лабораторного задания, а затем приводить таблицу с результатами всех измерений. Результаты различных измерений необходимо представить в виде нескольких самостоятельных таблиц и графиков. Каждая таблица и каждый график должны иметь свой заголовок и исходные данные эксперимента.

3. При выполнении численных расчетов надо записать формулу определяемой величины, сделать соответствующую численную подстановку и произвести вычисления, а не писать сразу готовый результат.

4. Результаты со всеми промежуточными вычислениями сложных нелинейных зависимостей следует приводить в виде таблицы.

5. Все графики необходимо выполнять на миллиметровой бумаге или обычной бумаге в клетку. Оси координат на графиках должны быть обозначены и промасштабированы. Масштаб следует выбирать таким образом, чтобы координаты любой точки графика могли быть определены быстро и с удовлетворительной точностью.

6. Нанесение на графике точек, соответствующих расчетным или экспериментальным данным, должно быть выполнено отчетливо и аккуратно.

7. Кривая, проводимая через экспериментальные точки, должна быть плавной, без резких искривлений и углов. Кривая не обязательно должна проходить через каждую отдельную точку. Её следует провести через большую часть точек так, чтобы наилучшим образом аппроксимировалась экспериментальная зависимость.

8. Если на графике имеется несколько кривых, каждая кривая должна быть снабжена соответствующими надписями.

9. Осциллограммы, характеризующие один и тот же процесс, например, напряжение на входе и выходе четырехполюсника, следует располагать строго друг под другом с общим началом отсчета и с соблюдением масштабов по осям координат. То же относится и к спектральным диаграммам.

10. Необходимо пользоваться общепринятыми условными обозначениями величин и сокращениями названий.

## Лабораторная работа №1

### **«Исследование системы связи для передачи сигналов с импульсно-кодовой модуляцией. Исследование процессов коммутации и оценка помехозащищенности систем связи с временным разделением каналов, использующих сигналы с АИМ и ИКМ.»**

#### **Цель работы**

1. Изучение принципов построения системы связи с временным разделением каналов и импульсно - кодовой модуляцией (ИКМ).
2. Изучение принципов разделения каналов в системе связи с ИКМ.
3. Изучение принципов восстановления сигнала с ИКМ.
4. Изучение принципов построения устройств, позволяющих осуществлять пространственную коммутацию каналов систем связи.
5. Качественная оценка помехозащищенности систем связи при АИМ и ИКМ.

#### **Краткая характеристика исследуемых цепей и сигналов**

Для проведения измерений используются:

- лабораторная установка " Изучение принципов временного разделения каналов";
- двухканальный осциллограф С1-93.

Для проведения исследований в лабораторной установке используются три контрольных сигнала. При этом вход одного из каналов остается свободным. Это соответствует поступлению на кодер отсчета с нулевой амплитудой. Ему соответствует определенная кодовая комбинация, которая аналогично остальным присутствует в групповом сигнале.

На приемном конце линии связи расположено пороговое устройство ПУ, которое включается тумблером, выведенным на переднюю панель лабораторной установки. Оно позволяет повысить помехозащищенность каналов связи. Следует помнить, что работа установки при использовании ИКМ сигналов возможна только при включенном пороговом устройстве.

На приемном конце групповой сигнал поступает на вход демультимплектора. В нем происходит разделение каналов. Электронные ключи демультимплектора управляются синхронно с ключами мультиплектора. На время действия одной из кодовых комбинаций соответствующий ключ демультимплектора соединяет линию связи со входом декодера ДК. В результате на его вход поступает требуемая кодовая комбинация  $F_{kj}$   $i$  (индекс  $j$  соответствует номеру канала ).

В декодере происходит восстановление АИМ сигнала - каждой кодовой комбинации  $F_{kj}$   $i$  ставится в соответствие отсчетный импульс  $F_j$   $i$  определенной длительности и амплитуды. Положение отсчета во времени жестко связано с моментом окончания действия кодовой комбинации. Эта последовательность отсчетов поступает на ФНЧ, где происходит восстановление исходного аналогового сигнала  $F_j(t)$ .

Входы I, II осциллографа используются в режиме работы с внешней синхронизацией, сигнал которой вырабатывается в установке.

### Домашнее задание

1. Изучите основные разделы темы по конспекту лекций и литературе:

- **Шелухин О.И., Лукьянцев Н.Ф.** Цифровая обработка и передача речи / Под ред. О.И. Шелухина. – М.: Радио и связь, 2000. – 454 с.
- **Маковеева М.М., Шинаков Ю.С.** Системы связи с подвижными объектами: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
- **Прокис Дж.** Цифровая связь / Пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 797 с.
- **Кшиштоф Веселовский** Системы подвижной связи./ Пер. с польск. под ред. А.И.Ледовского -М.: Горячая линия - Телеком, 2006 – 536 с.
- **Ипатов В.П.** Системы мобильной связи. Учебное пособие для вузов -М. Горячая линия - Телеком, 2003 – 272 с.

### Основы теории

*Дискретизация и равномерное квантование.* Все системы связи с подвижными объектами являются цифровыми. Поэтому речевой сигнал, являющийся аналоговым сигналом, в таких системах передается с помощью методов цифровой модуляции. Соответствующая укрупненная структурная схема линии передачи представлена на рис. 3.

На входе и на выходе цифровой линии передачи в этой схеме должен быть цифровой сигнал. Поэтому между «Источником речевого сигнала» и этой линией должен быть преобразователь «Аналоговый сигнал → Цифровой сигнал» (АЦП).

Так как «Получателю речевого сигнала» должен быть представлен сигнал в аналоговой форме, то между линией и получателем также должен быть преобразователь «Цифровой сигнал → Аналоговый сигнал» (ЦАП).

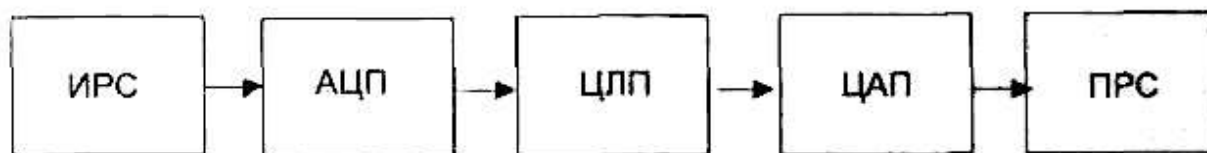


Рис. 3. Типичная схема цифровой линии передачи речевого сигнала: ИРС - источник речевого сигнала; АЦП - аналогово-цифровой преобразователь; ЦЛП - цифровая линия передачи; ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь; ПРС - получатель речевого сигнала

Эти два преобразователя являются важными элементами современных и будущих систем связи с подвижными объектами. Рассмотрим некоторые

теоретические основы современных методов решения соответствующих задач, которые наиболее часто применяются на практике.

Обычно преобразование аналогового сигнала  $U(t)$  в цифровой  $U_d(t)$  осуществляется в два этапа. На первом этапе выполняется дискретизация по времени, в результате которой формируются отсчеты  $U(t_i)$ ,  $i = \dots, -1, 0, +1, \dots$  аналогового сигнала в дискретные моменты времени с интервалом дискретизации  $t_i - t_{i-1} = \Delta t$ . На втором – квантование по уровню каждого отсчета, в результате которого непрерывная случайная величина  $U(t_i)$  преобразуется в дискретную случайную величину  $U_d(t_i)$  с конечным числом возможных значений  $\{u_{dk} \mid k=1, 2, \dots, N\}$  и распределением вероятностей

$$p_k = P\{U_d(t_i) = u_{dk}\} = \int_{u_{k-1}}^{u_k} W(u; t_i) du, \quad (7)$$

где  $u_k$  – уровни квантования;  $u_{dk} = (u_k + u_{k-1})/2$  – выходные уровни;  $\Delta u = u_k - u_{k-1}$  – шаг квантования.

Квантование называют равномерным, если шаг квантования не зависит от его номера  $k$ . При квантовании фактически происходит замена аналоговой случайной величины  $U(t_i)$  дискретной случайной величиной  $U_d(t_i)$  с ошибкой квантования  $e(t_i) = U(t_i) - U_d(t_i)$ . При квантовании в соответствии с правилом (7) ошибка квантования принимает значения из интервала  $[-\Delta u/2, +\Delta u/2]$  и является непрерывной случайной величиной, для которой обычно принимают равномерное распределение на указанном интервале. В этом случае ее среднее значение  $M\{e(t_i)\} = 0$ , а дисперсия  $\sigma_e^2 = \frac{(\Delta u)^2}{12}$ . Уменьшая шаг квантования, дисперсию ошибки квантования можно уменьшать до требуемого значения.

Интервал дискретизации  $\Delta t$  обычно выбирается в соответствии с теоремой отсчетов Котельникова, согласно которой частота дискретизации  $f_d \geq 2f_v = 2 \cdot 3400 = 6800$  Гц, где  $f_v$  – верхняя граничная частота. Основными параметрами квантователя – устройства, выполняющего операцию квантования, являются: число выходных уровней  $N$ , их значения  $u_{dk}$  и шаг квантования  $\Delta u$ . Значения этих параметров стараются выбрать таким образом, чтобы при прочих равных условиях минимизировать значение дисперсии  $\sigma_e^2$  ошибки квантования. Обычно выходные уровни представляются кодовыми словами с  $n$  двоичными символами из алфавита  $A = \{0, 1\}$ , т.е. в цифровой форме. Поэтому случайная последовательность  $\{U_d(t_i), i = \dots, -1, 0, +1, \dots\}$  является цифровой. Квантователь с кодовыми словами длиной  $n$  может иметь  $N = 2^n$  выходных уровней.

Часто последовательность квантованных отсчетов речевого сигнала представляют в виде

$$U_d(t_i) = U(t_i) + e(t_i), \quad (8)$$

что позволяет ошибку квантования рассматривать как аддитивный шум. В этом случае можно ввести еще один полезный параметр квантователя, который называют *отношением сигнал-шум квантования* (ОСШК, дБ):



$$\text{ОСШК} = 10^{\lg\left(\frac{\sigma^2}{\sigma_e^2}\right)}. \quad (9)$$

*Неравномерное квантование.* Мощность ошибки квантования можно уменьшить, если вместо равномерного использовать неравномерное расположение уровней квантования. Чтобы пояснить, как найти наиболее эффективное расположение уровней квантования, введем обозначение для характеристики квантователя следующим образом:

$$U_{\Delta}(t_i) = f_{\text{кв}}[U(t_i)].$$

$$\sigma_e^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [u - f_{\text{кв}}(u)]^2 W(u, t_i) du \cong \sum_{k=1}^N \int_{u_{k-1}}^{u_k} [u - u_{\Delta k}]^2 W(u, t_i) du. \quad (10)$$

Из этого равенства следует, что для уменьшения дисперсии шума квантования уровни квантования необходимо располагать более плотно в тех местах, где плотность вероятности речевого сигнала имеет наибольшие значения. Уменьшение шага квантования приводит к уменьшению максимального значения ошибки квантования. Там, где плотность вероятности принимает меньшие значения, шаг квантования можно увеличить, сохранив общее число  $N$  уровней квантования неизменным. Если плотность вероятности  $W(u, t_i)$  известна, то можно найти оптимальное расположение уровней квантования, которое обеспечивает минимальное значение дисперсии шума квантования при фиксированном значении  $N$  [4].

На практике неравномерное квантование осуществляется с помощью последовательности преобразований, представленных на рис. 4. Здесь речевой сигнал сначала подвергается низкочастотной фильтрации в фильтре низкой частоты с частотой среза  $f_{\text{max}} = 3,4$  кГц (для уменьшения помех из-за наложения спектров при дискретизации [1]). Затем осуществляются дискретизация и равномерное квантование при большом числе разрядов  $n = 12$ . И далее выполняется цифровая компрессия (сжатие диапазона мгновенных значений), при которой число разрядов в выходных словах снижается до 8. Если биты каждого кодового слова выдаются на выход преобразователя последовательно, то выходной поток битов имеет скорость 64 кбит/с.

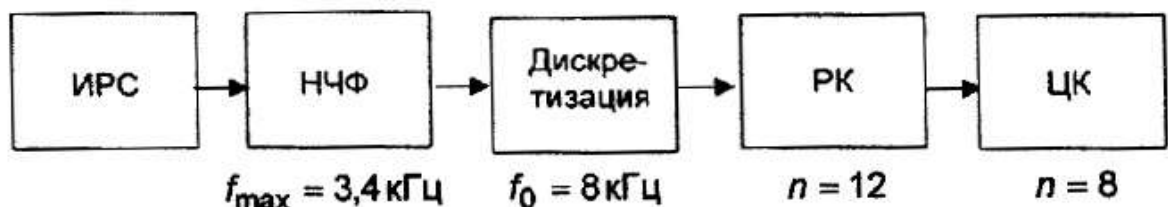


Рис. 4. Неравномерное квантование речевого сигнала:

ИРС - источник речевого сигнала; НЧФ - низкочастотная фильтрация; РК - равномерное квантование; ЦК - цифровая компрессия (командирование)

*Адаптивное квантование.* Как уже отмечалось, речевой сигнал является нестационарным случайным процессом. Наиболее простым признаком этого служит изменчивость дисперсии речевого сигнала во времени. Результаты

статистических измерений свидетельствуют о том, что динамический диапазон возможных значений дисперсии может составлять 40 дБ и более. Если не принять каких-либо мер, то на интервалах времени, на которых уровень сигнала низкий, относительная ошибка квантования  $\delta(t_i) = e(t_i)/\sigma$  может иметь значительно большую дисперсию, чем на интервалах с высоким уровнем сигнала. В результате качество цифровой передачи речевого сигнала существенно снижается.

Один из возможных способов устранения этого недостатка состоит в том, чтобы применять адаптивное квантование, как это показано на рис. 5. В этом случае шаг квантования изменяется в соответствии с изменением текущего значения дисперсии сигнала.

Такой способ передачи речевого сигнала получил название *адаптивной ИКМ*. Следует отметить, что в этом случае кроме кодовых слов, представляющих цифровые отсчеты сигнала, необходимо передавать значения оценок текущей дисперсии речевого сигнала, которые являются фактически масштабирующими множителями.

Поскольку дисперсия сигнала изменяется сравнительно медленно, нет необходимости передавать значения ее оценок с той же частотой, что и значения речевого сигнала. Обычно последовательность отсчетов сигнала разбивается на блоки, для каждого блока формируется только одна оценка текущей дисперсии.

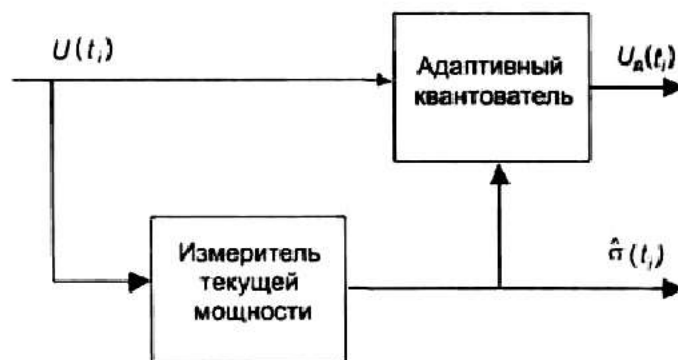


Рис. 5. Адаптивное квантование речевого сигнала

На практике наиболее часто используется *адаптивная блочная ИКМ*, предусматривающая следующие преобразования. Отсчеты  $n$ -разрядного АЦП разбиваются на блоки по  $N_{\text{бл}}$  отсчетов. В каждом блоке находится отсчет с максимальным значением модуля. Для этого отсчета определяется номер  $k$  максимального значащего разряда, который записывается в виде еще одного двоичного кодового слова с  $t$  разрядами, представляющего собой масштабирующий множитель. Все более старшие разряды всех отсчетов данного блока будут нулевыми и их нет необходимости передавать. Поэтому все  $N_{\text{бл}}$  отсчетов данного блока передаются кодовыми словами только с  $k$  разрядами; к этим кодовым словам добавляется кодовое слово масштабирующего множителя. Результирующая битовая скорость в такой системе передачи равна

$$R = f_d(k + m/N_{\text{бл}}). \quad (11)$$

На практике часто используют следующие значения:  $f_d = 8$  кГц,  $n = 10 \dots 13$ ,  $k = 6 \dots 8$ ,  $N_{\text{бл}} = 8 \dots 16$ ,  $m = 6 \dots 8$ . Средняя скорость передачи при этом оказывается равной  $32 \dots 56$  кбит/с при прочих равных условиях.

*Векторное квантование.* Рассмотренные выше способы неравномерного и адаптивного квантования называют *скалярными*, так как кодированию по очереди подвергается каждый отсчет речевого сигнала независимо от остальных отсчетов. Получающиеся при этом скорости кодирования расположены достаточно далеко от границы Шеннона. Приближения скорости кодирования к границе Шеннона можно добиться с помощью *векторного квантования*, которое широко используется в цифровых сотовых системах связи. Сущность его состоит в том, чтобы не квантовать отдельные отсчеты сигнала последовательно один за другим, а преобразовывать одновременно несколько отсчетов сигнала (блок) в совокупность кодовых слов. Более высокая эффективность такого преобразования (более низкая битовая скорость) по сравнению со скалярным квантованием достигается за счет учета статистической зависимости между отсчетами сигнала.

Техническая реализация векторного квантования сопровождается задержкой отсчетов сигнала во времени, поскольку для определения выходных слов необходимо накопить весь блок входных отсчетов. Все возможные выходные слова векторного квантователя (их число конечно) хранятся в кодовой книге. Для каждого входного вектора отсчетов осуществляется поиск в кодовой книге такого выходного вектора, который оказывается наиболее близким к входному.

*Адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция.* Еще один способ использования сильной корреляции между соседними отсчетами речевого сигнала реализуется при применении адаптивной дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (АДИКМ).

На практике АДИКМ реализуется с применением различных алгоритмов предсказания: вместо кодирования разности соседних отсчетов кодируется разность между значением очередного отсчета и предсказанным его значением. Эту разность обычно называют ошибкой предсказания, значение которой переводится в цифровую форму и передается по линии связи. Предсказание основывается на знании ковариационной функции речевого сигнала.

На рис. 6 представлена упрощенная структурная схема кодера АДИКМ, которая используется в системе беспроводного телефона стандарта СТ2.

Основным элементом кодера является адаптивный квантователь, который преобразует входные отсчеты в четырехбитовые кодовые слова. Шаг квантования зависит от динамического диапазона входных отсчетов квантователя и изменяется во времени в зависимости от изменений динамического диапазона отсчетов ошибки предсказания. Практически эта адаптация обеспечивается путем нормирования отсчетов сигнала ошибки с помощью масштабного множителя  $Y(t_i)$ , значение которого определяется на

основании предсказания динамического диапазона очередного отсчета на входе квантователя.

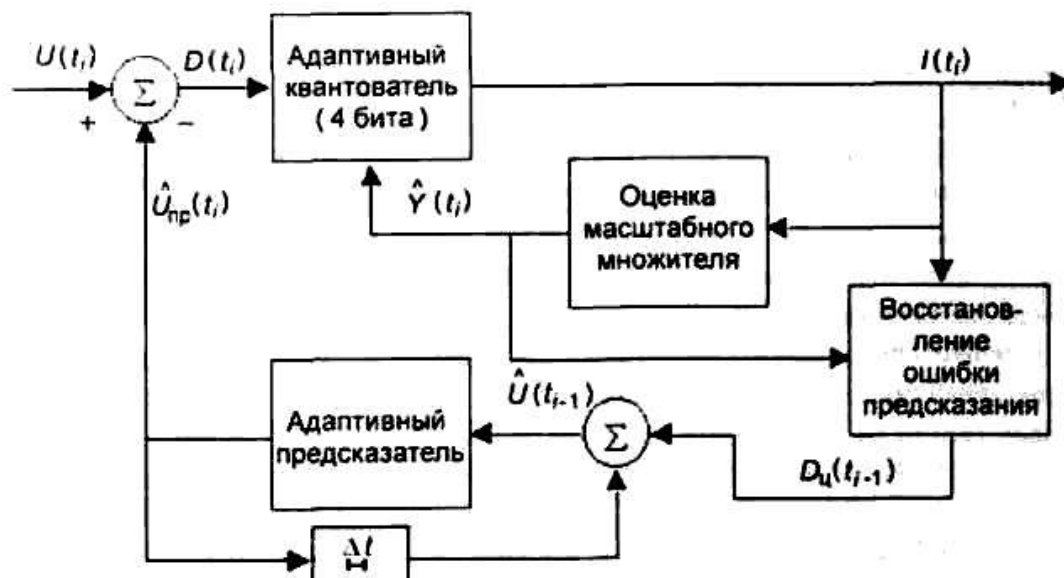


Рис. 6. Схема кодера АДИКМ с предсказанием

Другим важным элементом кодера является адаптивный предсказатель, который формирует оценку предсказания  $\hat{U}_{\text{пр}}(t_i)$  на основе предшествующих восстановленных значений  $\hat{U}(t_{i-1}), \hat{U}(t_{i-2}), \dots$  отсчетов речевого сигнала. Оценка  $\hat{U}(t_{i-1})$  получается путем суммирования предсказанного значения  $\hat{U}_{\text{пр}}(t_{i-1})$  и восстановленного цифрового значения ошибки предсказания  $D_{\text{ц}}(t_{i-1})$ .

Следует заметить, что данный кодер управляется сигналами двух петель обратной связи: оценкой предсказания  $\hat{U}_{\text{пр}}(t_i)$  значения очередного отсчета речевого сигнала  $U(t_i)$ , и оценкой  $\hat{Y}(t_i)$  очередного значения масштабного множителя квантователя. Обе оценки формируются в конечном счете только из значений четырехбитового сигнала  $I(t_i)$ , передаваемого по линии связи. В декодере приемника выполняются обратные преобразования. Таким образом, кодер АДИКМ и декодер АДИКМ управляются одинаковыми сигналами.

Поэтому для восстановления отсчетов речевого сигнала в приемнике по линии связи кроме отсчетов нормированной ошибки предсказания  $I(t_i)$  необходимо передавать текущее значение шага квантования (или нормирующего множителя). Шаг квантования передается также в цифровой форме; частота следования этих значений обычно намного ниже частоты следования отсчетов речевого сигнала.

*Кодирование речевого сигнала в частотной области.* Кодирование в частотной области позволяет учесть особенности восприятия речи человеком и также приводит к эффективным алгоритмам кодирования. В кодерах этого класса речевой сигнал подвергается полосной фильтрации несколькими узкополосными фильтрами, которые выделяют несколько частотных компонентов; затем эти компоненты квантуются и кодируются отдельно с учетом некоторых критериев восприятия сигналов каждой полосы.

Достоинством такой схемы кодирования является возможность динамического изменения числа используемых битов и их перераспределения между разными частотными компонентами при их кодировании.

*Квантование является нелинейной операцией*, сопровождаемой появлением широкополосной помехи. Ухо человека неодинаково воспринимает различные участки спектра помехи квантования, имея экспоненциально убывающую чувствительность с ростом частоты. Поэтому можно существенно повысить качество кодирования в узких полосах частот. При полосовом кодировании спектр речевого сигнала делится на 4 или 8 полос с помощью набора фильтров, сигнал каждой полосы переносится на нулевую частоту, дискретизируется по времени в соответствии с теоремой отсчетов Котельникова (частота дискретизации при этом намного ниже частоты дискретизации исходного сигнала) и кодируется с различной точностью в соответствии с принятым критерием восприятия. Способы деления спектра сигнала на полосы могут быть разными. Например, полосы выбираются так, чтобы обеспечить равные вклады в значение критерия разборчивости. Этот критерий приводит к делению полосы, как показано в табл. 1.

Таблица 1

Номер полосы частот речевого сигнала	Полоса частот, Гц	Количество битов
1	200...700	4
2	700...1310	3
3	1310...2020	2
4	2020...3200	1

Другой способ разбиения состоит в том, чтобы выбрать все полосы равными и сигнал каждой полосы кодировать с разным числом битов, пропорциональным значимости соответствующей полосы для восприятия речи.

На рис. 7 показан пример возможной реализации кодирования речевого сигнала в частотной области. Входной сигнал  $s(t)$  фильтруется набором фильтров, имеющих полосы пропускания  $\Delta\Omega_n$  с нижней и верхней частотами среза соответственно  $\omega_{1n}$  и  $\omega_{2n}$ . Сигнал  $s_n(t)$  с выхода фильтра с номером  $n$  умножается на гармонический сигнал  $\cos(\omega_{1n}t)$ ; получающееся колебание подается на вход фильтра низкой частоты с полосой пропускания  $(0, \Delta\Omega_n)$ . Сигнал  $r_n(t)$  на выходе этого фильтра является низкочастотной версией сигнала  $s_n(t)$  и может быть представлен в следующем виде:

$$r_n(t) = [s_n(t) \cos(\omega_{1n}t)] \otimes h_n(t), \quad (12)$$

где знак  $\otimes$  обозначает операцию свертки.

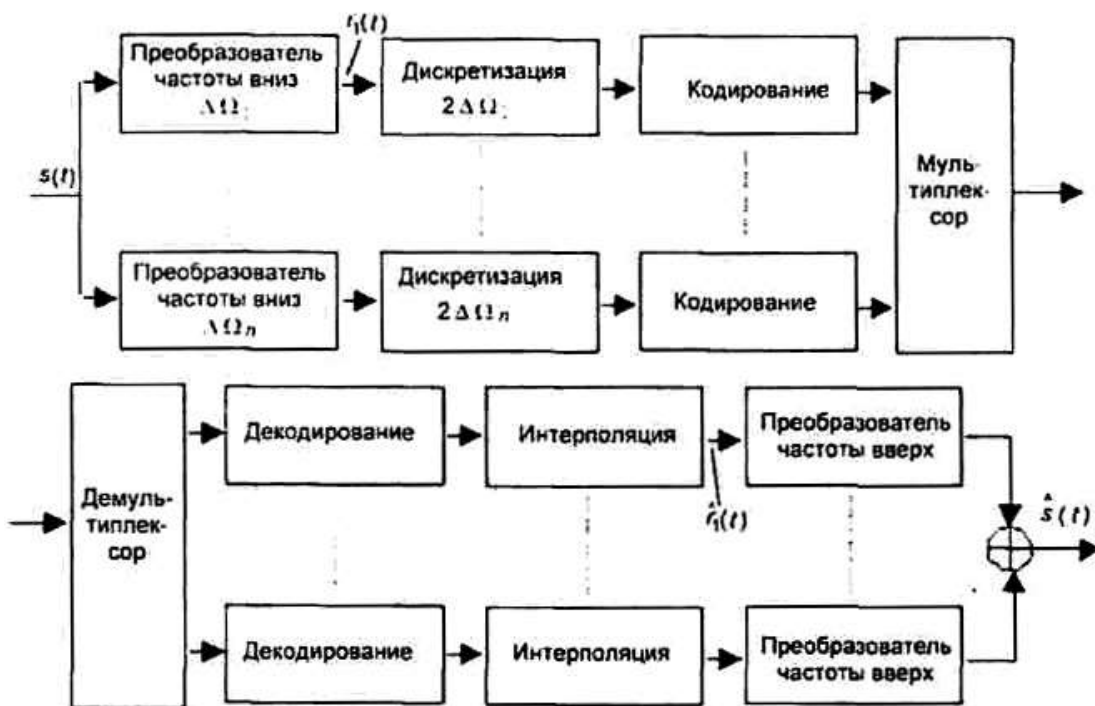


Рис. 7. Функциональная схема многополосного кодека речевого сигнала

Сигнал  $r_n(t)$  дискретизируется с частотой дискретизации  $2\Delta\Omega_n$ , кодируется и путем мультиплексирования с другими аналогичным образом закодированными узкополосными сигналами вставляется в общий цифровой поток. В приемнике этот поток демультимплексируется в отдельные каналы, сигналы которых декодируются и переносятся в соответствующие полосы частот, в результате чего формируется оценка сигнала  $r_n(t)$  канала с номером  $n$ .

### Методические указания

Изучить схему установки, вынесенную на лицевую панель и найти на ней: электронные ключи; кодеры; мультиплексор; линию связи; генератор шума с потенциометром, регулирующим уровень шумового напряжения; устройство регенерации и тумблер, осуществляющий его включение в линию связи; демультимплексор; декодер; фильтр нижних частот; устройство управления мультиплексором и демультимплексором; выходы генератора контрольных сигналов F1, F2, F3; входы I и II для подключения осциллографа; тумблер включения питания "ВКЛ-СЕТЬ".

Подготовить лабораторную установку к проведению измерений. Для этого:

- Установить тумблеры на устройстве управления в положение "32кГц" и "цикл".
- Нажать кратковременно кнопку "сброс" на устройстве управления.
- **Установить тумблер устройства регенерации УР в линии связи в положение "вкл"**. В данной лабораторной установке передача цифрового ИКМ сигнала осуществляется только при включенном устройстве регенерации.

- Установить потенциометр "уровень шума" в линии связи в крайнее положение против часовой стрелки.
- Соединить выход четвертого кодера со входом 3 мультиплексора. Вход электронного ключа четвертого канала при этом остается свободным.
- Включить питание лабораторной установки и осциллографа.

**Собирать схемы при выключенной установке!**

1. Исследовать процесс формирования цифрового ИКМ сигнала. Для этого выполнить следующие операции:

1.1. С помощью соединительного шнура подключить контрольный сигнал F1 ко входу электронного ключа первого канала. К этой же точке подключить вход I канала осциллографа. Проконтролировать появление осциллограммы контрольного сигнала.

1.2. Подобрать период развертки так, чтобы на экране укладывался приблизительно один период контрольного сигнала.

1.3. Зарисовать осциллограмму контрольного аналогового сигнала.

1.4. Подключить второй канал осциллографа к выходу электронного ключа. Проконтролировать появление на его экране сигнала с амплитудно - импульсной модуляцией.

1.5. Включить метки, нажав соответствующую кнопку на лицевой панели установки, убедиться, что временной интервал между ними соответствует длительности отсчетного импульса.

1.6. Зарисовать осциллограмму сигнала с амплитудно-импульсной модуляцией, поступающего на вход второго канала осциллографа. Расположить ее под осциллограммой контрольного сигнала, сохранив масштаб по временной оси и метки.

1.7. Подключить вход II осциллографа к выходу кодера 1 и зарисовать соответствующую осциллограмму. Следует учесть, что в данной лабораторной установке использовано схемное решение, обеспечивающее на выходе кодера формирование ИКМ сигнала, в котором единицам соответствуют положительные, а нулям - отрицательные импульсы одинаковой амплитуды. При выбранном значении периода развертки осциллографа подробная структура наблюдаемых кодовых комбинаций не может быть проанализирована детально. Поэтому следует отметить только ее длительность, сохранив временные соотношения с предыдущими и метки времени.

1.8. Зарисовать осциллограмму кодовой комбинации. Включить метки времени с интервалом, соответствующим длительности отсчетного импульса. Обратит внимание на то, что он соответствует длительности кодовой комбинации.

2. Исследовать процесс формирования группового сигнала на выходе мультиплексора. Для этого выполнить следующие операции.

2.1. Соединить с помощью шнура выход кодера первого канала со входом 0 мультиплексора. Подключить вход II осциллографа к выходу

мультиплексора и проконтролировать появление кодовой комбинации на его выходе.

2.2. Не снимая установленных ранее соединений, подключить контрольный сигнал F2 и вход I осциллографа ко входу ЭК2 второго канала. Выход кодера 2 соединить со входом 1 мультиплексора.

2.3. Проконтролировать по осциллограмме появление на выходе мультиплексора кодовой комбинации, соответствующей сигналу, передаваемому по второму каналу связи. Она должна занять временной интервал в промежутке между двумя кодовыми комбинациями, соответствующими первому и третьему каналам.

2.4. Повторить две предыдущие операции для третьего канала, используя контрольный сигнал F3.

2.5. Зарисовать осциллограмму группового сигнала, наблюдаемую на выходе мультиплексора. Ее следует разместить под предыдущими, сохранив выбранный временной масштаб и метки.

3. Проконтролировать процесс разделения сигналов с ИКМ. Для этого подключить первый вход осциллографа к клемме КТ3 ( ко входу демультиплексора ), а второй - последовательно к его выходам 0 , 1 , 2 , 3 . При этом осциллограмма , наблюдаемая по первому каналу осциллографа соответствует групповому сигналу , а по второму - ИКМ сигналу соответствующего канала .

4. Проанализировать процесс восстановления аналогового сигнала. Для этого выполнить следующие операции.

4.1. Подключить выходы 0 , 1 , 2 ,3 демультиплексора к соответствующим входам декодеров, а выходы декодеров - к входам фильтров нижних частот.

4.2. Для контроля временных соотношений подключить вход I осциллографа ко входу электронного ключа первого канала. При этом на экране наблюдается исходный аналоговый сигнал.

4.3. Последовательно подключая вход II осциллографа ко входу декодера 1, входу ФНЧ1 и его выходу зарисовать соответствующие осциллограммы сохранив временные соотношения с предыдущими и временные метки. Подключить вход II осциллографа к выходу ФНЧ1. При этом, соответственно, наблюдаются исходный и восстановленный аналоговые сигналы.

4.4. Зарисовать осциллограмму восстановленного сигнала, сохранив все временные соотношения, масштаб и временные метки. Отметить на ней временную задержку восстановленного сигнала относительно исходного.

4.5. Аналогичным образом, подключая для контроля временных соотношений вход I осциллографа ко входу второго и третьего каналов, проконтролировать наличие соответствующих сигналов на входе и выходе декодеров, на входе и выходе ФНЧ, подключая в соответствующие контрольные точки вход II осциллографа. Зарисовывать осциллограммы только восстановленных сигналов. Отметить на них временную задержку восстановленных сигналов относительно исходных.



*Установить тумблер устройства регенерации УР в линии связи в положение "выкл". Следует помнить, что в данной лабораторной установке передача цифрового ИКМ сигнала осуществляется только при включенном пороговом устройстве.*

5. Оценить помехоустойчивость системы связи с АИМ сигналами. Для этого выполнить следующие операции.

5.1. Вход I осциллографа подключить к выходу мультиплексора - началу линии связи (КТ1), а вход II - к ее окончанию (КТ2).

5.2. Вращая потенциометр "уровень шума" по часовой стрелке наблюдать появление шумов в групповом сигнале на приемном конце линии связи.

5.3. Подключить I вход осциллографа к одному из входов мультиплексора (входу канала связи), а вход II - к соответствующему выходу (выход ФНЧ). Наблюдая восстановленный сигнал и сравнивая его с исходным, установить с помощью потенциометра "уровень шума" заметные его искажения. Зафиксировать положение потенциометра. Измерить амплитуду шума. ***В ходе дальнейших исследований менять его положение нельзя.***

6. Оценить помехозащищенность каналов связи при использовании сигналов с ИКМ. Уровень шумов в линии связи был установлен ранее при исследовании системы связи с АИМ сигналами. Для этого выполнить следующие операции:

6.1. Подключить входы I и II осциллографа соответственно к контрольным точкам КТ1 и КТ2 и убедиться в наличии шумов в групповом сигнале на приемном конце линии связи (контрольная точка КТ2).

6.2. Подключить вход I осциллографа к контрольной точке КТ3 на выходе устройства регенерации. Убедиться в том, что уровень шумов на его выходе существенно меньше, чем на входе.

6.3. Подключить входы I, II осциллографа ко входу и выходу одного из каналов связи, по которому передается испытательный сигнал (ко входу ЭК и выходу соответствующего ФНЧ), убедиться в том, что аналоговый сигнал восстанавливается практически без искажений. Для этого уменьшить уровень шумов до минимума, повернув ручку потенциометра "уровень шума" против часовой стрелки до упора. Форма восстановленного сигнала при этом не должна меняться.

7. Установить с помощью устройства управления заданную преподавателем коммутацию четырех каналов – пространственную коммутацию (соединение входа М мультиплексора канала с выходом N демультиплексора).

7.1. Установить тумблер "цикл - програм." устройства управления в положение "програм." и кратковременно нажать кнопку "сброс".

7.2. На цифровом индикаторе "шаг" высвечивается одна из цифр: 0, 1, 2, 3, которая соответствует номеру входа мультиплексора. Ей соответствует индикация с помощью светодиодов А0, А1 на мультиплексоре. Они дублируют номер коммутируемого входа в двоичной системе исчисления.

Зажигание светодиода соответствует единице в соответствующем разряде. Кроме того, горит соответствующий светодиод электронного ключа мультиплексора. Нажимая кратковременно кнопку "шаг", установить на цифровом индикаторе цифру 0 (оба световода А0, А1 не горят, горит светодиод электронного ключа входа 0 мультиплексора). Устройство управления готово к записи информации о номере выхода демультимплексора, с которым должен быть соединен вход 0 мультиплексора.

7.3. Ввести номер выхода демультимплексора, на который должен быть скоммутирован вход 0 мультиплексора. Номер вводится в двоичной системе исчисления с помощью кнопок В0 (нулевой разряд) и В1 (первый разряд). Индикация осуществляется с помощью светодиодов - зажигание соответствует единице в соответствующем разряде.

7.4. Произвести запись введенного номера выходного канала демультимплексора в память устройства управления. Для этого нажать кратковременно кнопку "запись" на панели устройства управления. При этом номер канала в двоичной системе будет продублирован с помощью светодиодов В0, В1 на демультимплексоре. Кроме того, зажигается светодиод у электронного ключа соответствующего выхода демультимплексора.

При ошибочной записи нажмите «сброс» и наберите номер канала в двоичной системе заново.

7.5. Аналогичным образом установить остальные три коммутации, последовательно нажимая кратковременно кнопку "шаг" и выполняя аналогичные действия по записи номера выхода демультимплексора. При ошибочном вводе номера следует нажать кратковременно кнопку "сброс" и повторить процедуру ввода.

7.6. После записи последнего номера проконтролировать правильность введенной информации. Для этого установить тумблеры на устройстве управления в положение "цикл" и "2 Гц" соответственно. По одновременности зажигания светодиодов электронных ключей мультиплексора и демультимплексора проверить правильность установленного порядка коммутации. После проверки установить тумблер "32 кГц - 2 Гц" в положение "32 кГц".

### Отчет

Итогом работы является серия осциллограмм, снятых в контрольных точках системы связи. Их необходимо расположить друг под другом, сохранив порядок, в котором они снимались, временной масштаб и метки.

В отчете необходимо привести:

- цель работы;
- схему измерений, отметив на ней точки, в которых снимались осциллограммы;
- все снятые осциллограммы, расположенные таким образом, чтобы на них были отмечены все необходимые временные соотношения между исследуемыми сигналами;
- значения измеренных величин;

- ВЫВОДЫ ПО ВЫПОЛНЕННЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ.

**Контрольные вопросы**

1. В чем заключается принцип временного разделения каналов?
2. Какой элемент схемы лабораторного макета производит ИКМ модуляцию, и каким образом?
3. Как на приемном конце происходит преобразование ИКМ сигнала в исходный аналоговый сигнал?
4. Для чего нужна пространственная коммутация? Как он организуется?
5. Сравнить помехоустойчивость сигнала с АИМ и ИКМ.
6. Какие преимущества имеет временное разделение по сравнению с частотным?

## Лабораторная работа №2

### "Исследование помехоустойчивости системы связи при разных видах модуляции"

#### Цель работы

Измерение оценок вероятности ошибки в приёме символа при разных видах модуляции и разных отношениях сигнал/шум.

#### Краткая характеристика исследуемых цепей и сигналов

В работе используется универсальный стенд со сменным блоком "МОДУЛЯТОР - ДЕМОДУЛЯТОР", функциональная схема которого приведена на рис. 20.1.

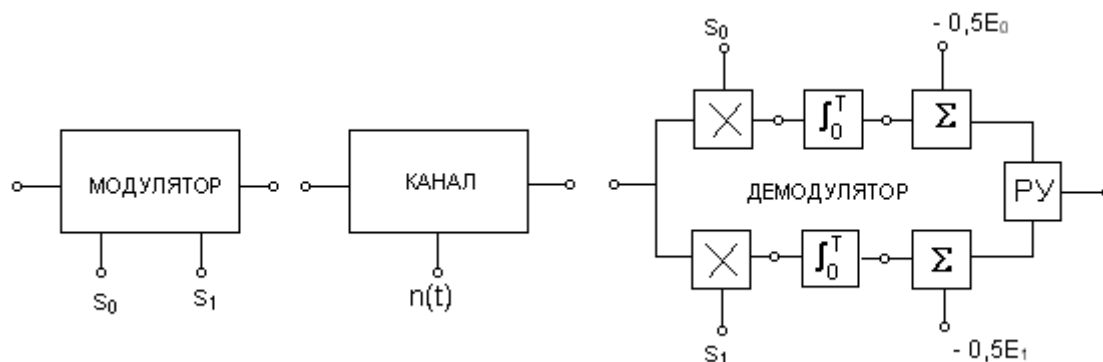


Рис. 20.1. Функциональная схема сменного блока "модулятор - демодулятор"

Источником цифрового сигнала является КОДЕР-1, который выдает периодическую последовательность из пяти символов. С помощью тумблеров можно установить любую пятиэлементную кодовую комбинацию, которая индицируется линейкой из пяти светодиодных индикаторов с надписью "ПЕРЕДАНО". В блоке МОДУЛЯТОР происходит модуляция (манипуляция) двоичными символами "высокочастотных" колебаний по амплитуде, частоте или фазе, в зависимости от положения переключателя "ВИД МОДУЛЯЦИИ" - АМ, ЧМ, ФМ или ОФМ. При "нулевом" положении переключателя выход модулятора соединен с его входом (модуляция отсутствует).

КАНАЛ связи представляет собой сумматор сигнала с выхода модулятора и шума, генератор которого (ГШ) расположен в блоке ИСТОЧНИКИ СИГНАЛОВ. Внутренний генератор квазизелого шума, имитирующий шум канала связи, работает в той же полосе частот, в которой расположены спектры модулированных сигналов (12÷28 кГц).

ДЕМОДУЛЯТОР выполнен по когерентной схеме с двумя ветвями; коммутация видов модуляции - общая с модулятором. Поэтому эталонные

сигналы  $s_0$  и  $s_1$  и пороговые напряжения в контрольных точках стенда изменяются автоматически при смене вида модуляции.

Знаками (X) на функциональной схеме обозначены аналоговые перемножители сигналов, выполненные на специализированных ИМС. Блоки интеграторов выполнены на операционных усилителях. Электронные ключи (на схеме не показаны) разряжают конденсаторы интеграторов перед началом каждого символа.

Сумматоры ( $\Sigma$ ) предназначены для введения пороговых значений напряжений, зависящих от энергии эталонных сигналов  $s_1$  и  $s_0$ .

Блок "РУ" - решающее устройство - представляет собой компаратор, то есть устройство, сравнивающее напряжения на выходах сумматоров. Само "решение", т.е. сигнал "0" или "1" подается на выход демодулятора в момент перед окончанием каждого символа и сохраняется до принятия следующего "решения". Моменты принятия "решения" и последующего разряда конденсаторов в интеграторах задаются специальной логической схемой, управляющей электронными коммутаторами.

Для демодуляции сигналов с ОФМ к схеме демодулятора ФМ добавляются блоки (на схеме не показаны), которые сравнивают предыдущее и последующее решения демодулятора ФМ, что позволяет сделать заключение о скачке фазы (или его отсутствии) в принимаемом символе. При наличии такого скачка на выход демодулятора подается сигнал "1", в противном случае - "0". В сменном блоке предусмотрен тумблер, переключающий начальную фазу ( $\varphi$ ) опорного колебания (0 или  $\pi$ ) – только для ФМ и ОФМ. Для нормальной работы демодулятора тумблер должен быть в нулевом положении.

При амплитудной манипуляции предусмотрена возможность ручной установки порога с целью изучения его влияния на вероятность ошибки в приеме символа. Оценка вероятности ошибки производится в ПК путем подсчета числа ошибок за определенное время анализа. Сами сигналы ошибки (в символе или «букве») формируются в специальном блоке стенда («КОНТРОЛЬ ОШИБОК»), расположенном ниже блока ЦАП. Для визуального контроля ошибок в стенде имеются светодиодные индикаторы.

В качестве измерительных приборов используются двухканальный осциллограф, встроенный вольтметр и ПК, работающий в режиме подсчета ошибок.

### Домашнее задание

1. Изучите основные разделы темы по конспекту лекций и литературе:
1. В.А.Галкин Цифровая мобильная связь. Учебное пособие для вузов. – М. Горячая линия – Телеком, 2007 г. – 432 с., с ил
2. Прокис Дж. Цифровая связь: Пер. с англ. / Под ред. Д.Д.Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.: илл.

## Основы теории

Сигнал на выходе передатчика является идеальным модулированным колебанием, временная форма которого определяется обычным выражением

$$S(t) = \text{Re}[A_0 g(t) e^{j\omega_c t}]$$

Высокочастотный модулированный сигнал  $S(t)$ , его амплитуда  $A_0$ , и комплексная огибающая  $g(t)$ , модулирующий сигнал  $w(t)$  рассматриваются как идеальные, ожидаемые сигналы на приемном конце радиоканала. В процессе распространения радиоволн к исходному модулированному колебанию добавляются внешние шумы эфира. Кроме того, независимо от внешних шумов модулированное колебание приобретает паразитную амплитудную и угловую модуляцию, которые определяются нестационарной амплитудно-частотной характеристикой радиоканала. В результате на вход приемника приходит высокочастотное модулированное колебание, которое может быть представлено в следующем виде:

$$r(t) = \text{Re}\{[A(t) g(t - \tau(t)) + n(t)] e^{j(\omega_c t + \varphi(t))}\} + R(t) \quad (1)$$

где,  $A(t)$  - амплитуда принятого сигнала;  $g(t - \tau(t))$  - комплексная огибающая принятого сигнала;  $\tau(t)$  - время распространения ВЧ-сигнала от передатчика до приемника;  $n(t)$  - шумы радиоканала в полосе модулированного сигнала;  $\varphi(t)$  - фаза принимаемой несущей частоты;  $R(t)$  - другие сигналы в эфире (сторонние радиосредства, сосредоточенные помехи и т. д.). Параметры радиоканала, по которому распространяется модулированное колебание, не являются постоянными, что приводит к зависимости от времени амплитуды принимаемого сигнала  $A(t)$ , временной задержки  $\tau(t)$  и фазы  $\varphi(t)$ .

Анализ приемника с точки зрения качества и достоверности принимаемой информации заключается в анализе его низкочастотной части, включающей в случае приема цифровой информации две существенно различные части: *демодулятор и детектор*.

*Демодулятор предназначен* для переноса спектра модулированного сигнала из высокочастотной области в НЧ-диапазон и формирования на своем выходе комплексной огибающей  $g(t)$ , (или демодулированного сигнала  $v(t)$ ), с точностью до шумов радиоканала, собственных шумов приемника и паразитной модуляции совпадающей с комплексной огибающей  $g(t)$ , [модулирующим сигналом и  $w(t)$ ,] передатчика. Приемник цифровых сигналов в отличие от аналогового должен включать еще один функциональный узел, который осуществляет операцию по восстановлению цифрового сообщения из демодулированного сигнала. Это устройство, *называемое детектором*, путем последовательного анализа демодулированного цифрового сигнала  $v(t)$  восстанавливает цифровое сообщение  $\{I_r\}$ , которое в условиях приема сигнала, искаженного шумами и паразитной модуляцией, с некоторым приближением совпадает с исходным цифровым сообщением  $\{I\}$  в передатчике.

В качестве примера на рис. 2 показано прохождение по радиоканалу цифрового бинарного сообщения **1011** при частотной модуляции.

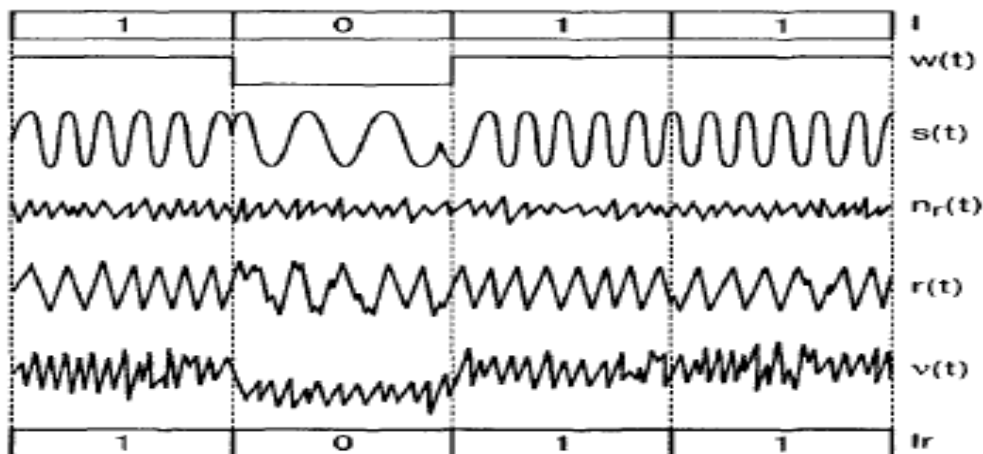


Рис. 2. Временные диаграммы сигналов в радиоканале:  
 I - исходное цифровое сообщение;  $w(t)$  - модулирующий сигнал передатчика;  $s(t)$  - модулированный сигнал передатчика;  $n_r(t)$  - шумы радиоканала;  $r(t)$  - модулированный сигнал на входе низкочастотной части приемника;  $v(t)$  - демодулированный сигнал;  $I_r$  - принятое цифровое сообщение.

### ***Корреляционный, ортогональный и согласованный прием***

Построение функциональной схемы оптимального детектора заключается в аппаратной реализации функции правдоподобия для демодулированного сигнала. Максимальное значение функции правдоподобия означает минимальное среднее отклонение принимаемого сигнала от ожидаемого на символьном интервале, т. е. максимально достоверную идентификацию принимаемого сигнала.

***Корреляционный прием*** соответствует непосредственному выполнению математических операций логарифмической функции максимального правдоподобия (2)

$$\Lambda_{\text{кор}} = \max \left\{ 2 \int_0^{T_s} v(t) w_m(t) dt - E_m \right\},$$

где  $E_m = \int_0^{T_s} w_m^2(t) dt$  - энергия ожидаемого сигнала  $w_m(t)$  из множества  $\{w\}$ .

(2)

с помощью стандартных электронных схем, а именно умножения принимаемого сигнала на каждый из ожидаемых сигналов множества, вычисления  $M$  частных корреляционных интегралов на символьном интервале  $T_s$  и нормировки каждого частного корреляционного интеграла на энергию  $E_n$  соответствующего ожидаемого сигнала. Максимальное значение нормированного  $m$ -го частного корреляционного интеграла на символьном интервале  $T_s$  означает, что принимаемый сигнал наиболее близко совпадает с соответствующим ожидаемым сигналом, а следовательно, именно этот ожидаемый сигнал принимается с наибольшей вероятностью. Поскольку каждому ожидаемому цифровому сигналу  $w_m(t)$  из множества  $\{w\}$

соответствует цифровой символ  $I_m$  из множества возможных значений  $\{I\}$ , то в результате цифровое сообщение  $\{I\}$  на выходе приемника состоит из символов, прием которых наиболее вероятен. Соответствующая функциональная схема оптимального детектора, обеспечивающая максимальное значение функции правдоподобия (2), показана на рис. 3

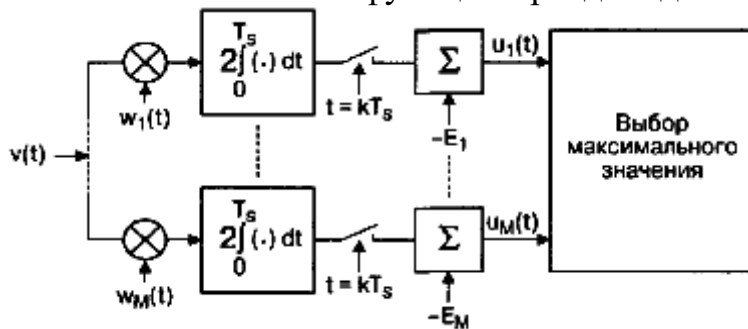


Рис. 4. Корреляционный детектор цифрового сигнала

Принимаемый сигнал  $v(t)$  разделяется на  $M$  каналов (по числу ожидаемых сигналов в множестве  $\{W\}$ ) и поступает на входы канальных умножителей; на другие входы умножителей поступают ожидаемые сигналы  $w_m(t)$ . Результаты перемножения поступают на интеграторы, и в момент времени  $t=T_s$  окончания символьного интервала происходит считывание результатов интегрирования. Результат интегрирования в каждом канале складывается с величиной, равной энергии ожидаемого сигнала ( $-E_m$ ). Результаты операций в каналах поступают в устройство выбора максимального значения, которое сравнивает их по величине. Максимальный полученный результат на выходе  $m$ -го канала в момент времени  $t = T_s$  означает, что прием сигнала  $w_m(t)$  на завершнном временном интервале наиболее вероятен и ему соответствует прием символа  $I_m$  цифрового сообщения.

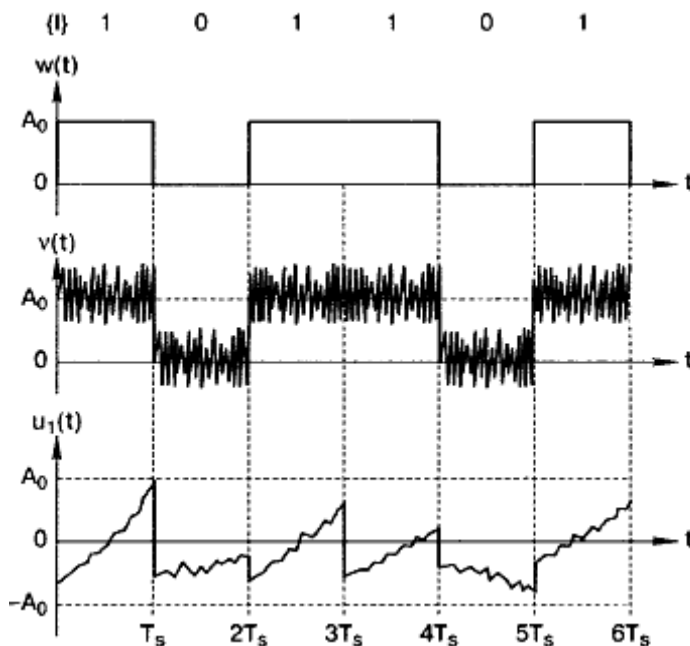


Рис. 5. Временные диаграммы работы оптимального детектора



**Ортогональный прием** отражает иную форму представления множества ожидаемых сигналов  $\{w\}$ . В случае приема  $M$ -уровневого модулированного сигнала схема рис. 3 должна содержать  $M$  каналов, что достаточно громоздко при практической реализации. Оптимальный детектор может быть построен более простым способом, если воспользоваться ортогональным представлением ожидаемых сигналов.

Для реализации оптимального детектора необходимо разделить принимаемый сигнал  $v(t)$  на  $N$  каналов по числу ортогональных функций, в каждом канале реализовать умножение принимаемого сигнала на соответствующую ортогональную функцию и результат умножения проинтегрировать на временном интервале  $T_s$ . Тем самым будут вычислены коэффициенты разложения  $a_k$  принятого сигнала по ортогональным функциям. Коэффициенты разложения  $a_{b_i}$  всех  $M$  ожидаемых сигналов заранее вычислены и известны. В решающем устройстве производится вычисление функции правдоподобия для каждого  $m$ -го ожидаемого сигнала. Считается, что на текущем временном интервале  $T$ , принят тот  $m$ -й символ, для которого значение функции правдоподобия максимально. Функциональная схема оптимального ортогонального детектора показана на рис. 5.

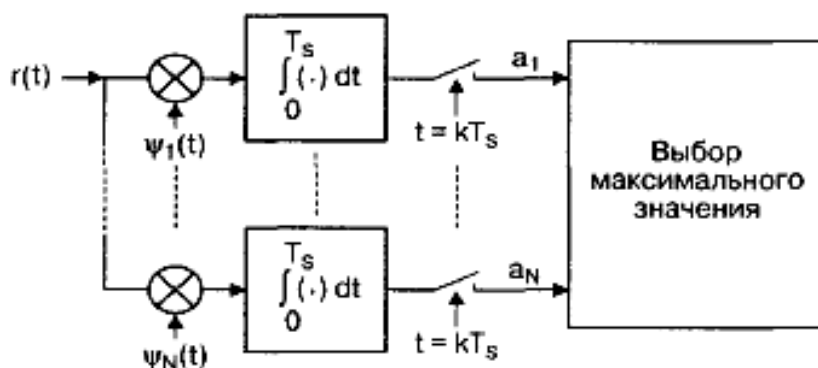


Рис.6 Ортогональный детектор цифрового сигнала

В отличие от схемы рис. 3 количество корреляторов равно количеству ортогональных функций, а не количеству ожидаемых сигналов. Корреляторы каждого канала выполняют математическую операцию вычисления коэффициентов  $a_k$  для входного сигнала. В устройстве выбора максимального значения проводится вычисление функции правдоподобия для каждого ожидаемого  $m$ -го сигнала и определение наиболее вероятного ожидаемого сигнала.

**Согласованный прием** основан на том, что формально корреляционный интеграл в функции правдоподобия совпадает с формулой для сигнала на выходе линейного фильтра с импульсной характеристикой  $w_m(t)$  при входном воздействии  $v(t)$

Фильтр, импульсная характеристика которого определяется временной формой ожидаемого сигнала, называется согласованным фильтром. Соответственно, функциональная схема корреляционного оптимального

детектора

рис. 3 преобразуется в схему фильтрового оптимального детектора (рис. 6). Очевидно, что совпадают и временные диаграммы работы этих детекторов (см. рис. 4)

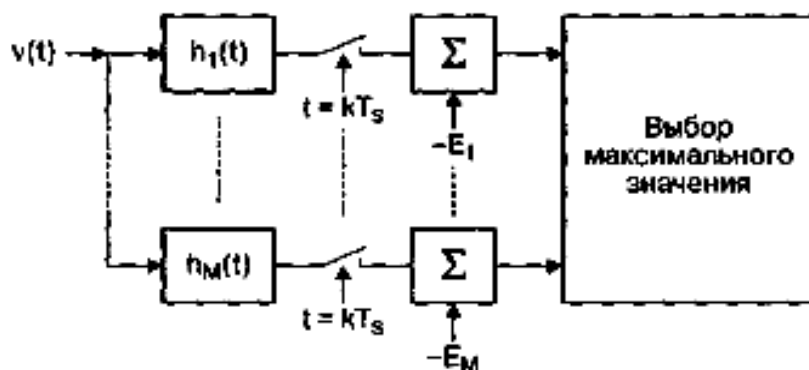


Рис. 7. Согласованный детектор цифрового сигнала

Сравнение реализаций оптимального приемника рис. 3, 5, 6 на основе функции правдоподобия приводит к следующим выводам:

- Оптимальный детектор включает две существенно различные части - коррелятор (линейный фильтр) и нелинейное пороговое устройство принятия решения.
- Все схемы обеспечивают одинаковый результат приема сигнала, поэтому свойства согласованного фильтра, рассмотренные ниже, в той же степени относятся и к его корреляционной и ортогональной реализациям.

Оптимальный прием цифровых сигналов в любой схеме требует тактовой синхронизации, которая заключается в точной синхронизации начала и окончания символьного интервала  $T_s$  в принимаемом сигнале с началом и окончанием интегрирования в детекторе. Если стабильность частот тактовых генераторов приемника и передатчика достаточно велика для того, чтобы разность периодов колебаний не влияла на результат интегрирования, то проблема синхронизации времени прихода очередного импульса принимаемого сигнала и начала интегрирования является одной из самых сложных проблем в реализации оптимального цифрового детектора. Очевидно, что приемник обязательно должен содержать схему автоматической подстройки частоты собственного тактового генератора (определяющего время начала и окончания интегрирования в детекторе) под тактовую частоту передатчика (определяющего длительность символьного интервала принимаемого сигнала  $T_s$ ) с точностью до фазы в условиях неопределенного времени распространения сигнала от передатчика к приемнику. В противном случае частичное наложение интервала интегрирования на соседние импульсы приведет к межсимвольной интерференции и в конечном счете к ошибкам в определении принятого информационного символа.

#### *Лабораторное задание*

1. Снимите и постройте кривые помехоустойчивости для разных видов модуляции.

## Методические указания

### 1. Работа демодулятора в условиях отсутствия помех.

1.1. Соберите схему измерений согласно рис.20.2. Тумблерами КОДЕРА - 1 наберите любую двоичную комбинацию из 5 элементов. Ручку регулятора "ПОРОГ АМ" установить в крайнее левое положение. При этом регулятор выключен и порог устанавливается автоматически при смене вида модуляции. Тумблер фазировки опорного колебания ДЕМОДУЛЯТОРА установить в положение "0". Соединить выход генератора шума (ГШ) в блоке ИСТОЧНИКИ СИГНАЛОВ со входом  $n(t)$  КАНАЛА связи. Потенциометр выхода генератора шума - в крайнем левом положении (напряжение шума отсутствует). Вход внешней синхронизации осциллографа соединить с гнездом С2 в блоке ИСТОЧНИКИ, а усилители вертикального отклонения лучей перевести в режим с открытым входом (для пропускания постоянных составляющих исследуемых процессов).

1.2. Кнопкой переключения видов модуляции установить вариант "0", соответствующий сигналу на входе МОДУЛЯТОРА. Сняв осциллограмму этого сигнала и, не меняя режим развёртки осциллографа, выбрать один из видов модуляции (АМ). Зарисовать осциллограммы в контрольных точках демодулятора:

- на входе демодулятора;
- на выходах перемножителей (в одном масштабе по вертикальной оси);
- на выходах интеграторов (также в одном масштабе);
- на выходе демодулятора.

На всех полученных осциллограммах отметить положение оси времени (т.е. положение нулевого уровня сигнала). Для этого можно зафиксировать положение линии развёртки при замыкании входных зажимов осциллографа.

1.3. Повторить п.1.2 для другого вида манипуляции (ЧМ).

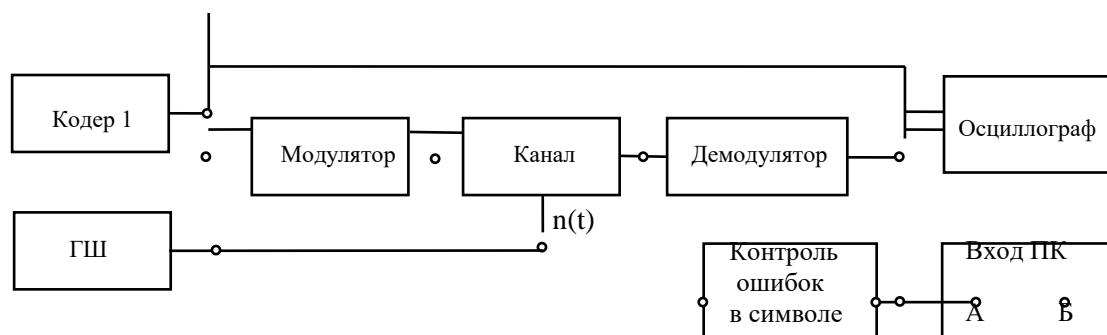


Рис. 20.2. Функциональная схема измерений

### 2. Работа демодулятора в условиях помех.

- 2.1. Переключателем ВИД МОДУЛЯЦИИ установить ФМ. Подключить один из входов двухлучевого осциллографа ко входу модулятора, а второй - к выходу демодулятора. Получите неподвижные осциллограммы этих сигналов.
- 2.2. Плавно увеличивая уровень шума (потенциометром ГШ) добиться появления редких «сбоев» на выходной осциллограмме или на входном табло ПРИНЯТО.
- 2.3. С помощью осциллографа измерить установленное отношение сигнал/шум. Для этого, последовательно отключая источник шума, измерить на входе демодулятора размах сигнала (в делениях на экране) -  $2a$  - (т. е. двойная амплитуда сигнала), а отключая источник сигнала от входа канала и восстановив шумовой сигнал - измерить размах шума (также в делениях) -  $b\sigma$ . Найденное отношение  $a/\sigma$  внести в таблицу 20.1.
- 2.4. Переключателем «Вид модуляции» устанавливать последовательно АМ, ЧМ, и ФМ, наблюдая по вспышкам светодиода "ОШИБКА" или по осциллограмме выходного сигнала демодулятора частоту появления ошибок. Результаты наблюдений внести в отчет.
- 2.5. Не изменяя уровень шума в канале, измерить вероятность ошибки демодулятора в приёме символа за конечное время анализа (т.е. оценку вероятности ошибки). Для этого привести ПК в режим измерения вероятности ошибки (см. ПРИЛОЖЕНИЕ) и установить время анализа  $10 \div 30$  с. Начиная с ФМ, (а затем – ЧМ и АМ) определить число ошибок за время анализа и оценку вероятности ошибки. Полученные данные внести в табл. 20.1.

Табл.20.1

Время анализа - ...с		а/σ	
Вид модуляции	ФМ	ЧМ	АМ
Число ошибок			
Оценка вероятности ошибки			

3. Установить вид модуляции ФМ. Ручками синхронизации осциллографа добиться неподвижных изображений на входе и выходе ДЕМОДУЛЯТОРА. Подготовить таблицу 22.1. Установку требуемых значений  $a/\sigma$  производить по экрану осциллографа, подключенного ко входу ДЕМОДУЛЯТОРА. Для этого следует:
  - 3.1. Отключив ГШ от входа канала, ручками усиления вертикального отклонения осциллографа установить размах модулированного сигнала на экране 2 клетки (т.е. амплитуда  $a=1$  клетке). В ходе дальнейшей работы положение этих ручек осциллографа не менять!
  - 3.2. Восстановить шумовое напряжение на входе  $n(t)$ .

- 3.3. Отключить сигнал от входа КАНАЛА, убрав переключку между МОДУЛЯТОРОМ и КАНАЛОМ.
- 3.4. Ручкой регулятора уровня ГШ установить на экране осциллографа ширину шумовой «дорожки» равную 6 клеток. Согласно правилу «трёх сигма» для гауссовского процесса ширина этой дорожки примерно равна  $6\sigma$ , то есть  $6\sigma=6$  клеток, или  $\sigma=1$  клетке.
- 3.5. Восстановить сигнал на входе КАНАЛА. Так как  $a=1$  клетке, как было выставлено ранее, то соотношение в смеси сигнал/шум составит  $a/\sigma=1$ .
4. Подготовить ПК к работе в режиме подсчета ошибки (см. ПРИЛОЖЕНИЕ). Установив на ПК время анализа в пределах  $10\div 30$  с (и не меняя его в дальнейшем), произвести измерение оценки вероятности ошибки –  $P_{ош}$ . Полученное значение внести в таблицу 22.1. Не меняя  $a/\sigma$ , повторить п.5 для других видов модуляции.
- Установить новое соотношение  $a/\sigma$  по методике, рассмотренной в пп.3.3 и 3.4, причём в п. 3.4 надо установить новую (меньшую) ширину шумовой «дорожки». Например, для  $a/\sigma=2$ , эту ширину следует установить в 2 раза меньше, т.е.  $6\sigma=3$  клетки, следовательно  $\sigma=2,5$  клетки. После восстановления сигнала на входе КАНАЛА соотношение сигнал/шум на входе ДЕМОДУЛЯТОРА окажется  $a/\sigma=1/0,5=2$  (т.к.  $a=1$  клетке), если не менялась настройка осциллографа.
- Проведя измерения  $P_{ош}$  для всех видов модуляции и всех значений  $a/\sigma$ , заполнить таблицу 22.1. По результатам таблицы 22.1. построить семейство кривых  $P_{ош}=\varphi(a/\sigma)$  для разных видов модуляции.

Таблица 22.1. Оценка помехоустойчивости демодулятора при разных видах модуляции.

a/σ		1	2	3	10
P <sub>ош</sub>	АМ				
	ЧМ				
	ФМ				
	ОФМ				

### Отчёт

Отчёт должен содержать:

1. Функциональную схему измерений.
2. Таблицу результатов измерений и графики.
3. Выводы по результатам измерений.

### Контрольные вопросы

1. Каково назначение демодулятора в цифровой системе связи? В чем его основное отличие от демодулятора аналоговой системы?
4. Что такое "критерий идеального наблюдателя"?
5. Что такое "правило максимума правдоподобия"?

6. Как выбирается порог решающего устройства? Что будет, если его изменить?
7. Каков алгоритм принятия решения в РУ?
8. Что такое "потенциальная помехоустойчивость" и какую помехоустойчивость Вы измеряли в этой работе?
9. Как можно рассчитать  $P_{ош}$  теоретически и измерить экспериментально?
10. Объясните разницу в помехоустойчивости систем связи с разными видами модуляции.
11. Как можно измерить отношение сигнал/шум на входе демодулятора?
12. При каком соотношении  $a/\sigma$  система связи работает устойчиво? От каких функциональных узлов системы это зависит?
13. Что такое эквивалентная энергия сигналов?