

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 02.09.2023

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabb0754943d14a48511da56d089

## МИНОБРНАУКИ 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

2023 г.



## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ ДИСКРЕТНОГО ХАРАКТЕРА

Методические указания  
по выполнению курсовой работы  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки  
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»  
по дисциплине «Общая теория связи»

Курск 2023

УДК 621.391

Составители: Д.С. Коптев

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи  
*В. Г. Андронов*

**Проектирование системы передачи сообщений дискретного характера:** методические указания по выполнению курсовой работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Д.С. Коптев. – Курск, 2023. – 19 с.

Методические указания содержат рекомендации для студента по самостоятельному выполнению курсовой работы в рамках изучения дисциплины «Общая теория связи». Приводятся требования к структуре, оформлению и объему работы. Курсовая работа направлена на практическое овладение методикой расчета информационных и вероятностных характеристик дискретных сообщений, передаваемых по каналу связи с помехами.

Методические указания соответствуют учебному плану по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также рабочей программе дисциплины «Общая теория связи».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 23.08.2023. Формат 60x84/16.  
Усл. печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 768. Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## 1 Цели курсовой работы:

- закрепление и углубление знаний о физических свойствах сообщений, сигналов, помех и каналов связи, их основных видах и информационных характеристиках, принципах и основных закономерностях обработки, передачи и приёма различных сигналов в телекоммуникационных системах;
- формирование умений проводить математический анализ и синтез физических процессов в аналоговых и цифровых устройствах формирования, преобразования и обработки сигналов;
- формирование умений рассчитывать пропускную способность, информационную эффективность и помехоустойчивость систем электрической связи;
- приобретение навыков практического использования методов кодирования дискретных сигналов;
- формирование навыков разработки математических моделей сигналов, каналов связи и определения их параметров по статистическим данным.

## 2 Задание на курсовую работу

1. Составить обобщенную структурную схему системы связи для передачи дискретных сообщений, содержащую кодер источника, модулятор, канал связи, демодулятор и декодер. Изобразить качественные временные диаграммы сигналов во всех промежуточных точках структурной схемы. Все диаграммы должны сопровождаться словесными описаниями.

2. Определить энтропию и избыточность источника, выполнить кодирование источника (построить экономный код), рассчитать энтропию и избыточность кода, вероятности двоичных символов, передаваемых по каналу, скорость передачи информации по каналу без помех.

3. Рассмотреть случаи когерентного и некогерентного приёма путём взятия однократного отсчёта смеси высокочастотного сигнала с шумом на выходе линии связи и процесса на выходе детектора огибающей. Определить оптимальный по критерию идеального наблюдателя порог для принятия решения о принимаемом символе при когерентном и некогерентном приёме, условные вероятности ошибок первого и второго рода, среднюю

вероятность ошибки, скорость передачи информации при наличии помех. Сделать выводы по результатам расчетов.

4. Рассчитать согласованный фильтр для приёма элементарной посылки. Определить условные вероятности ошибок и среднюю вероятность ошибки при когерентном приёме с использованием согласованного фильтра. Оценить выигрыш в отношении сигнал-шум за счёт согласованной фильтрации.

5. Составить обобщенную структурную схему системы связи для передачи дискретных сообщений, использующую помехоустойчивое (канальное) кодирование. Опираясь на результаты п. 4, рассчитать вероятности однократной и двукратной ошибок в пределах одного кодового слова и охарактеризовать свойства кода по обнаружению и исправлению ошибок.

6. Внести в кодовую последовательность на выходе демодулятора двукратную ошибку в пределах одной кодовой комбинации. Выполнить процедуру декодирования полученной последовательности в соответствии с кодом Хэмминга, а затем произвести декодирование статистического кода. Оценить результат, сделать выводы.

### **3 Перечень необходимых исходных данных для выполнения курсовой работы**

1. Алфавит источника сообщений с вероятностями символов согласно варианту (таблица 1). Вариант определяется по последней цифре номера зачётной книжки студента.

2. Код для сокращения избыточности источника (Шеннона-Фано или Хаффмена) определяется подвариантом (таблица 2).

3. Канальное кодирование – код Хемминга (7,4).

4. Способ передачи – амплитудная телеграфия (АТ) с пассивной паузой.

5. Форма посылки (радиоимпульс) прямоугольная.

6. Амплитуда сигнала на входе демодулятора  $U$ , длительность посылки  $\tau$ , дисперсия шума на входе демодулятора  $\sigma^2$  определяются подвариантом (таблица 2). Подвариант определяется по предпоследней цифре номера зачётной книжки студента.

Таблица 1 – Алфавит и вероятности символов

Номер варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
а	0,069	0,035	0,091	0,105	0,055	0,02	0,064	0,032	0,099	0,082
б	0,019	0,11	0,024	0,025	0,1	0,057	0,102	0,058	0,083	0,061
в	0,052	0,049	0,067	0,105	0,054	0,052	0,064	0,089	0,107	0,07
д	0,007	0,089	0,082	0,02	0,116	0,025	0,085	0,064	0,077	0,023
е	0,09	0,001	0,119	0,094	0,087	0,151	0,092	0,085	0,121	0,111
ж	0,06	0,036	0,027	0,036	0,023	0,109	0,074	0,122	0,097	0,124
и	0,101	0,077	0,078	0,087	0,099	0,046	0,102	0,089	0,089	0,131
к	0,11	0,11	0,111	0,093	0,059	0,05	0,028	0,081	0,042	0,045
м	0,062	0,064	0,023	0,016	0,003	0,146	0,026	0,026	0,041	0,019
н	0,053	0,097	0,022	0,107	0,067	0,038	0,067	0,079	0,014	0,118
о	0,1	0,06	0,11	0,066	0,062	0,05	0,014	0,035	0,113	0,091
п	0,09	0,098	0,068	0,055	0,099	0,021	0,014	0,086	0,021	0,011
р	0,115	0,078	0,153	0,122	0,077	0,136	0,167	0,083	0,011	0,098
с	0,071	0,096	0,024	0,07	0,099	0,098	0,131	0,07	0,085	0,016

Таблица 2 – Параметры системы передачи дискретных сообщений

Номер подварианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Амплитуда сигнала $U, В$	2,8	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Длительность посылки $\tau, мкс$	0,9	1,2	1,1	0,5	0,3	0,7	1,5	2,3	0,8	2,6
Дисперсия шума $\sigma^2, В^2$	1,0	2,5	4,0	4,5	3,2	6,0	4,8	6,5	9,0	12,0
Код	ШФ	Х	ШФ	Х	ШФ	Х	ШФ	Х	ШФ	Х

## 4 Требования к структуре, объему и оформлению курсовой работы

Структура курсовой работы должна включать:

- титульный лист;
- лист задания;
- реферат;
- содержание;
- обозначения и сокращения (при необходимости);
- введение;
- основную часть;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения (при необходимости).

Основная часть должна состоять из следующих разделов:

- 1) Структура системы связи.
- 2) Эффективное кодирование.
  - 2.1) Построение эффективного кода.
  - 2.2) Кодирование фамилии, имени и отчества автора.
- 3) Информационные характеристики источника и эффективного кода.
  - 3.1) Энтропия и избыточность источника.
  - 3.2) Характеристики кода.
- 4) Демодуляция методом однократного отсчета.
  - 4.1) Когерентный прием. Определение порога, расчет условных вероятностей ошибок, средней вероятности ошибки, скорости передачи информации.
  - 4.2) Некогерентный прием. Определение порога, расчет условных вероятностей ошибок, средней вероятности ошибки, скорости передачи информации.
- 5) Согласованный фильтр.
  - 5.1) Определение импульсной и комплексной частотной характеристик согласованного фильтра.
  - 5.2) Вычисление условных вероятностей ошибок, средней вероятности ошибки при когерентном приеме с использованием согласованного фильтра, скорости передачи информации.
  - 5.3) Определение выигрыша в отношении сигнал-шум и в скорости передачи информации за счет согласованной фильтрации.

б) Помехоустойчивое кодирование.

6.1) Кодирование двоичной информационной последовательности (7,4)- кодом Хэмминга.

6.2) Декодирование последовательности, содержащей одиночную ошибку.

6.3) Декодирование последовательности, содержащей двукратную ошибку.

6.4) Декодирование эффективного кода, оценка результата.

Объем курсовой работы должен составлять не менее 30 страниц машинописного текста без учёта приложений.

Требования к оформлению курсовой работы изложены в методических указаниях «Курсовая работа. Курсовой проект. Выпускная квалификационная работа» (сост.: А.А. Чуев, Д.С. Коптев; ЮЗГУ, 2023. 36 с.). *Данное методическое указание выдается студенту вместе с заданием.*

В основной части все пункты выполнения курсовой работы должны располагаться в той последовательности, которая приведена выше, иметь ту же нумерацию и те же заголовки.

Рисунки и таблицы должны быть пронумерованы и озаглавлены, на графиках должны быть четко обозначены оси координат и указаны масштабы.

При вычислениях по формулам должна приводиться исходная формула, затем та же формула с подставленными в нее численными данными, и в конце – результат вычисления.

Графики временных или спектральных диаграмм, иллюстрирующие преобразования сообщения и сигнала в системе связи на выходе каждого из устройств, необходимо располагать один под другим с соблюдением масштабных соотношений по осям координат.

Во введении формулируются цель, задачи, предмет и объект курсовой работы с учётом её содержания.

В заключении даётся краткий анализ полученных в каждом разделе основной части результатов.

## 5 Методические указания по выполнению курсовой работы

### 5.1 Структурная схема системы связи

Для построения структурной схемы системы связи в данной работе достаточно расположить слева направо прямоугольники, обозначающие основные элементы системы от источника сообщений до их получателя, и соединить их последовательно линиями. Требование изобразить временные диаграммы сообщений и сигналов в промежуточных точках структурной схемы направлено на то, чтобы побудить студента осознать сущность преобразований, которые претерпевают сообщения и сигналы при передаче. «Изобразить качественно» в данном случае означает, что не нужно соблюдать в точности количественные характеристики и соотношения, но все принципиальные черты сигналов и сообщений должны быть отражены. При этом следует разместить эти диаграммы друг под другом с соблюдением временного масштаба, для того, чтобы их можно было сопоставить.

### 5.2 Характеристики источника сообщений

Информационная производительность дискретного источника без памяти с алфавитом  $A$  характеризуется средним количеством информации на символ, которое определяется, как энтропия

$$H(A) = - \sum_{k=1}^K p(a_k) \log_2(p(a_k)), \quad (1)$$

где  $p(a_k)$  – априорная вероятность символа  $a_k$ ,  
 $k = 1, \dots, K$ ,  $K$  – объем алфавита.

Отдельный символ несет тем больше информации, чем реже он встречается в длинной последовательности, вырабатываемой источником. При этом его индивидуальное количество информации умножается на соответствующее значение вероятности. В результате получается усредненная характеристика, которая позволяет рассчитывать приближенное количество информации в сообщениях данного источника с тем большей точностью, чем длиннее эти сообщения.



Нетрудно убедиться, что максимальную производительность при заданном объеме алфавита имеет источник с равновероятными символами, т.е. при  $p(a_k)=1/K, \forall k$ .

Для того, чтобы выразить степень отличия производительности источника от максимально достижимой при данном объеме алфавита, вводят числовой коэффициент избыточности.

$$k=(H_{max}-H)/H_{max}. \quad (2)$$

Избыточность характеризует возможность сжатия сообщений данного источника и повышения скорости передачи информации путем статистического кодирования. Очевидно, избыточность может принимать значения от 0 до 1, и возможность сжатия тем выше, чем больше величина  $k$ .

### 5.3 Кодирование источника

Экономное (статистическое, энтропийное) кодирование основано на очень простой идее: чем чаще в сообщениях данного источника встречается некоторый символ, тем короче должна быть соответствующая ему кодовая комбинация. Так, в известном коде Морзе самой частой букве «е» соответствует самая короткая комбинация, состоящая из единственной точки, а сравнительно редкая в русскоязычных текстах буква «ш» кодируется четырьмя тире, разделенными паузами. Некоторые коды, называемые примитивными, не учитывают статистических свойств источника; таков, например, известный код Бодо, все комбинации которого имеют равную длину. Такие коды называют равномерными. Очевидно, статистический код должен быть неравномерным. В работе предполагается использование двоичного кода. В зависимости от подварианта применяется процедура построения кода Шеннона–Фано или Хаффмана. Первым шагом обеих процедур является расположение всех символов алфавита источника по вертикали в порядке убывания априорных вероятностей. Далее символы источника будут называться буквами, чтобы не путать их с символами кода. Дальнейшие шаги направлены на то, чтобы наименее вероятным буквам сопоставить наиболее длинные кодовые комбинации.

### 5.3.1 Кодирование источника по методу Шеннона – Фано

1) Все буквы, расположенные по вертикали в порядке убывания априорных вероятностей, делятся на две группы – верхнюю и нижнюю, так, что сумма вероятностей для обеих групп оказывается одинаковой или примерно одинаковой. В качестве первого символа кодового слова каждой букве верхней группы присваивается один кодовый символ (пусть это будет 0), а каждой букве нижней группы – другой кодовый символ (это будет 1).

2) Верхняя и нижняя группы делятся на подгруппы в соответствии с тем же принципом равной вероятности, затем в качестве второго символа кодового слова каждой букве первой подгруппы присваивается кодовый символ 0, а каждой букве второй подгруппы – кодовый символ 1. Это делается независимо для верхней и нижней групп символов алфавита.

3) Каждая подгруппа вновь делится на две части с соблюдением принципа равной (или близкой) вероятности, и к кодовым комбинациям справа дописываются символы 0 или 1 в зависимости от того, в верхней или нижней части находится буква. Эта процедура продолжается до тех пор, пока алфавит источника не будет исчерпан, т.е. пока в каждой подгруппе не останется по единственной букве.

### 5.3.2 Кодирование источника по методу Хаффмана

1) В вертикальной записи букв в порядке убывания априорных вероятностей две нижних буквы соединяются скобкой, из них верхней приписывается символ 0, нижней 1 (или наоборот). Эти символы становятся последними символами кодовых комбинаций, соответствующих данным буквам.

2) Вычисляется сумма вероятностей, соответствующих этим буквам.

3) Все буквы снова записываются в порядке убывания вероятностей, при этом только что рассмотренные буквы «склеиваются», т.е. учитываются, как единая буква с суммарной вероятностью.

4) Повторяются шаги 1, 2 и 3 до тех пор, пока не останется ни одной буквы, не охваченной скобкой.

Скобки после завершения процедуры образуют граф – дерево, корню которого соответствует вероятность 1, а листьями являются буквы. Чтобы получить кодовую комбинацию для некоторой буквы, нужно пройти по дереву от корня до листа, записывая в строку последовательно все символы 0 или 1, встречающиеся на этом пути. Необходимо обратить внимание на следующее свойство кодов Шеннона–Фано и Хаффмана: ни одна кодовая комбинация не является началом какой-либо другой кодовой комбинации (так называемое префиксное правило). Одной из важнейших характеристик статистического кода является средняя длина кодового слова (кодовой комбинации)

$$\bar{\mu} = \sum_{i=1}^K p(a_i) \mu_i, \quad (3)$$

где  $\mu_i$  – длина кодового слова, соответствующего символу  $a_i$  исходного алфавита.

Чем меньше средняя длина, тем выше скорость передачи информации при помощи данного кода, тем сильнее этот код сжимает сообщения.

Очевидно, что закодированное сообщение можно рассматривать как последовательность кодовых символов (нулей и единиц), порождаемую неким новым источником, для которого снова можно вычислить энтропию и избыточность. Избыточность этого нового источника (избыточность кода) должна быть меньше, чем избыточность исходного источника. При идеальном кодировании избыточность кода равна нулю. При этом его энтропия должна быть максимальной, а значит, кодовые символы должны быть равновероятны. Если код двоичный, то максимальная информационная «нагрузка» на символ равна 1 биту.

Т.о., оценить степень близости построенного кода к оптимальному можно по избыточности кода и по близости друг к другу вероятностей кодовых символов, которые рассчитываются согласно формулам

$$p_1 = \frac{\sum_{i=1}^K p(a_i) n_1(a_i)}{\bar{\mu}}, p_0 = \frac{\sum_{i=1}^K p(a_i) n_0(a_i)}{\bar{\mu}}, \quad (4)$$

где  $n_1(a_i)$  и  $n_0(a_i)$  – количество единиц и нулей соответственно в кодовой комбинации, соответствующей символу  $a_i$  исходного алфавита.

Скорость передачи информации  $I'$  по каналу без помех определяется только временем передачи одного кодового символа (равным длительности посылки  $\tau$ ), средней длиной кодового слова  $\bar{\mu}$  и средним количеством информации, заключенной в кодовом слове, равным энтропии  $H(A)$  исходного источника

$$I' = H(A) / (\bar{\mu}\tau).$$

#### 5.4 Когерентный прием сигналов на фоне шума

В работе рассматривается цифровая демодуляция – восстановление кодовых символов 0 или 1 на основе наблюдения реализации случайного процесса на выходе линии связи. При этом предполагается, что наблюдаемый процесс представляет собой сумму сигнала  $s(t)$  с шумом, если передается символ 1, и только шум – если передается 0. Сигнал в самом простом случае является точно известным, а неопределенность, связанная с передачей информации, заключается в самом факте его наличия или отсутствия в наблюдаемом процессе. О шуме также известно всё, что может быть известно о случайном процессе, а именно: шум считается гауссовским с нулевым средним, известной дисперсией и спектральной плотностью мощности  $N_0/2$ , постоянной в полосе частот, в которой сосредоточено 99% энергии сигнала.

Самый простой способ приема заключается во взятии мгновенного значения наблюдаемого процесса  $z(t)$  в некоторый момент времени  $t_0$  и сравнении его с порогом у.п. На основании этого однократного отсчета  $y = z(t_0)$  и принимается решение о том, есть сигнал в наблюдаемом колебании, или оно представляет собой реализацию шума (иными словами, выполнена гипотеза  $H_0$  или  $H_1$ ). Очевидно, точно зная сигнал, следует выбрать в качестве  $t_0$  такой момент, когда сигнал  $s(t)$  принимает максимальное значение. Но шум в это время может принять отрицательное значение, так что сумма сигнала с шумом может оказаться ниже порога. Тогда произойдет ошибка, называемая ошибкой второго рода, или пропуском сигнала. Аналогично при отсутствии сигнала шумовая реализация может в момент  $t_0$  превысить порог – тогда произойдет

ошибка первого рода, или ложная тревога. Чтобы найти наилучшее значение порога и рассчитать вероятности ошибок, нужно рассмотреть условные плотности распределения вероятностей шума  $w(y|H_0)$  и суммы сигнала и шума  $w(y|H_1)$  в момент времени  $t_0$ , рисунок 1. Буквой  $a$  обозначено амплитудное значение прямоугольного радиоимпульса  $s(t)$ .

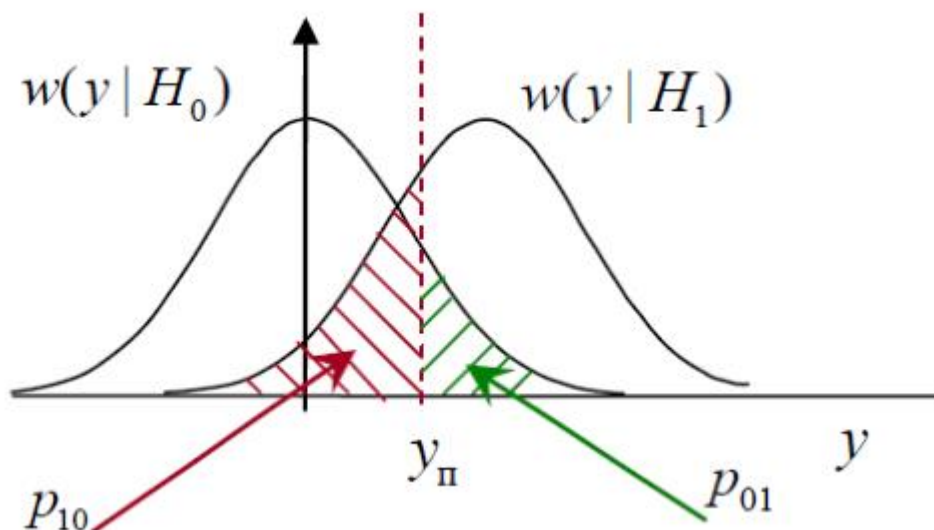


Рисунок 1 – Выбор порога при когерентном приеме

Из рисунка легко видеть, что вероятности ошибок первого  $p_{01}$  и второго  $p_{10}$  рода определяются, как площади фигур, ограниченных осью  $y$ , вертикальной прямой, проходящей через точку  $y_{п}$  на оси абсцисс, и графиком плотности  $w(y|H_0)$  и  $w(y|H_1)$  соответственно. Если в качестве критерия оптимальности выбран критерий минимума суммарной условной вероятности ошибки, то следует выбрать порог, равный абсциссе точки пересечения плотностей (очевидно, что при этом сумма площадей заштрихованных фигур минимальна). Тогда решение на основании отсчета  $y$  будет приниматься в пользу той гипотезы, для которой больше значение  $w(y|H_{0/1})$ , то есть которая при данном наблюдаемом отсчете представляется более правдоподобной. Это правило можно записать в виде

$$\Lambda = \frac{w(y|H_1)}{w(y|H_0)} \geq 1, \quad (5)$$

где  $\Lambda$  – отношение правдоподобия.

Критерий минимума суммарной условной вероятности ошибки обычно называют для краткости критерием максимального правдоподобия. Этот критерий является частным случаем критерия минимума среднего риска (байесовского критерия) при одинаковых стоимостях ошибок и равных априорных вероятностях гипотез.

В курсовой работе следует применять критерий идеального наблюдателя (Котельникова), согласно которому порог выбирается так, чтобы обеспечить минимум средней вероятности ошибки

$$p_{\text{ош}} = p_0 p_{01} + p_1 p_{10}, \quad (6)$$

где  $p_0$  – априорная вероятность гипотезы  $H_0$  («сигнала нет»),  
 $p_1$  – априорная вероятность гипотезы  $H_1$  («сигнал есть»).

Выбор порога, оптимального по этому критерию, можно пояснить графически при помощи рисунка, аналогичного рисунку 1, если вместо условных плотностей  $w(y|H_0)$  и  $w(y|H_1)$  изобразить графики функций  $p_0 w(y|H_0)$  и  $p_1 w(y|H_1)$ . Правило принятия решения, оптимальное по критерию Котельникова, можно записать через отношение правдоподобия в виде

$$\Lambda = \frac{w(y|H_1)}{w(y|H_0)} \underset{0}{\overset{1}{\geq}} \frac{p_0}{p_1}. \quad (7)$$

Априорные вероятности гипотез, необходимые для выбора порога, вычисляются при выполнении пункта 2 задания, как вероятности присутствия в кодовой последовательности символов 0 и 1 соответственно.

## 5.5 Некогерентный прием сигналов на фоне шума

Случай точно известного сигнала на практике является скорее исключением. Обычно некоторые параметры сигнала на приемной стороне канала связи неизвестны. В курсовой работе рассматривается прием сигнала, имеющего форму прямоугольного радиоимпульса с известной амплитудой и случайной начальной фазой, имеющей равномерное распределение в интервале  $(0, 2\pi)$ . Физический смысл некогерентного приема методом однократного отсчета сводится к следующему: поскольку начальная фаза

несущего колебания неизвестна (случайна), теперь нельзя выбрать момент  $t_0$  измерения мгновенного значения так, чтобы значение сигнала  $s(t_0)$  было максимальным. Поэтому сначала выполняется выделение огибающей наблюдаемого процесса, а затем берется её отсчет  $V$  в любой момент в пределах длительности посылки. Выбор порога  $V_{\Pi}$  для принятия решения на основе однократного отсчета огибающей производится аналогично когерентному случаю с той разницей, что теперь мгновенное значение имеет негауссово распределение при обеих гипотезах. Если сигнала нет (при гипотезе  $H_0$ ), наблюдаемый процесс представляет собой гауссовский шум с нулевым средним, а его огибающая  $V$  в произвольный момент времени имеет распределение Рэлея  $w(V|H_0)$ . Если сигнал присутствует (при гипотезе  $H_1$ ), огибающая гауссовского процесса имеет распределение Рэлея–Райса (обобщенное рэлеевское)  $w(V|H_1)$ , что соответствует ненулевому среднему, рисунок 2.

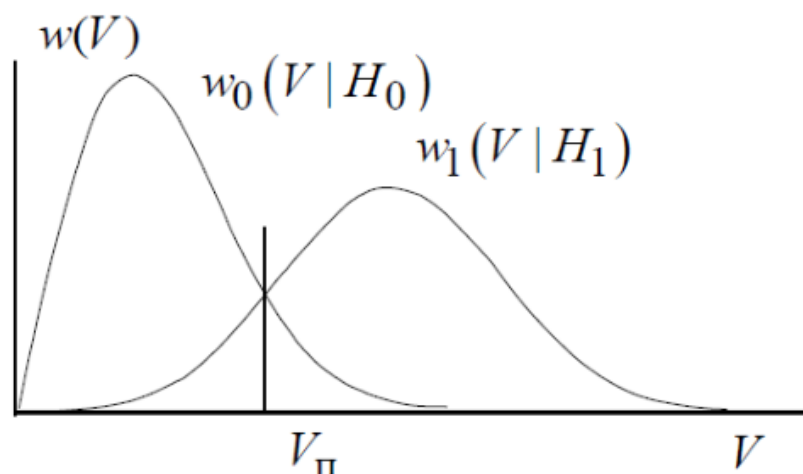


Рисунок 2 – Выбор порога при некогерентном приеме

Учет априорных вероятностей гипотез вполне аналогичен когерентному случаю.

## 5.6 Скорость передачи информации при наличии помех

Наличие в канале гауссовского шума вызывает ошибки при демодуляции и тем самым ограничивает скорость передачи информации: если ошибки следуют слишком часто, скорость передачи информации снижается, а если средняя вероятность ошибки достигает 0,5, скорость передачи становится равной нулю («обрыв канала»). Расчет скорости передачи информации в

цифровом канале с помехами основывается на понятии совместной энтропии входа и выхода канала (под каналом здесь следует понимать отрезок системы связи от входа модулятора до выхода демодулятора).

На входе модулятора действует источник, алфавит которого (обозначим его  $B$ ) содержит два символа –  $\beta_0=0$  и  $\beta_1=1$ . Априорными вероятностями этих символов  $p(\beta_0)$  и  $p(\beta_1)$  следует считать, очевидно, вероятности нуля  $p(0)$  и единицы  $p(1)$ , рассчитанные при выполнении пункта 2 задания (тогда же были рассчитаны энтропия кода и средняя длина кодового слова). Выход демодулятора можно считать другим источником  $\Gamma$  с двумя символами  $\gamma_0=0$  и  $\gamma_1=1$ . Среднее количество передаваемой по каналу информации (приходящееся на один символ) равно

$$I(B,\Gamma) = I(\Gamma,B) = H(B) + H(\Gamma) - H(B,\Gamma). \quad (8)$$

Для определения совместной энтропии  $H(B,\Gamma)$  необходимо найти совместные вероятности всех сочетаний входных и выходных символов ( $\beta$  и  $\gamma$ ), а для этого нужно вначале записать условные вероятности для выходных символов при заданных входных. Эти условные вероятности определяются, в свою очередь, условными вероятностями ошибок первого  $p_{01}$  и второго  $p_{10}$  рода, рассчитанными ранее (отдельно для когерентного и некогерентного приема):

$$\begin{aligned} p(\gamma_0|\beta_0) &= 1 - p_{01}; & p(\gamma_1|\beta_0) &= 1 - p_{01}; \\ p(\gamma_0|\beta_1) &= 1 - p_{10}; & p(\gamma_1|\beta_1) &= 1 - p_{10}; \end{aligned} \quad (9)$$

Совместные вероятности сочетаний входных и выходных символов

$$\begin{aligned} p(\beta_0,\gamma_0) &= p(\beta_0)p(\gamma_0|\beta_0); & p(\beta_0,\gamma_1) &= p(\beta_0)p(\gamma_1|\beta_0); \\ p(\beta_1,\gamma_0) &= p(\beta_1)p(\gamma_0|\beta_1); & p(\beta_1,\gamma_1) &= p(\beta_1)p(\gamma_1|\beta_1). \end{aligned} \quad (10)$$

Для нахождения энтропии источника  $\Gamma$  требуются безусловные вероятности выходных символов

$$p(\gamma_0) = p(\beta_0,\gamma_0) + p(\beta_1,\gamma_0) \text{ и } p(\gamma_1) = 1 - p(\gamma_0) = p(\beta_0,\gamma_1) + p(\beta_1,\gamma_1). \quad (11)$$



Наконец, совместная энтропия входа и выхода цифрового канала

$$H(B, \Gamma) = -\sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 p(\beta_i, \gamma_j) \log_2 p(\beta_i, \gamma_j). \quad (12)$$

Скорость передачи информации по цифровому каналу с учетом помех

$$I' = \frac{I(B, \Gamma)}{\tau}, \quad (13)$$

где  $\tau$  – длительность посылки.

### 5.7 Согласованный фильтр (СФ)

СФ для прямоугольного радиоимпульса имеет импульсную характеристику в виде такого же радиоимпульса, обращенного во времени (зеркальной копии). Модуль комплексной частотной характеристики СФ с точностью до произвольного постоянного множителя  $\psi$  совпадает с модулем спектральной плотности сигнала, аргумент КЧХ совпадает с аргументом спектральной плотности сигнала, взятым с минусом. Действие СФ на аддитивную смесь сигнала с шумом можно рассмотреть по отдельности в силу линейности фильтра. Отклик СФ на «свой» сигнал в момент максимума численно равен энергии сигнала. Для нахождения дисперсии шума на выходе СФ нужно умножить СПМ входного (квазизбелого) шума на квадрат модуля КЧХ СФ и затем проинтегрировать по частоте. Согласованный фильтр обеспечивает максимальное отношение сигнал-шум на выходе, тем самым максимизируя потенциальную верность решений демодулятора (для реализации этих потенциальных возможностей, очевидно, нужно правильно выбрать порог).

Отношение сигнал-шум (ОСШ) по мощности в момент времени  $t_0$  на выходе СФ

$$q^2 = \frac{2u_c^2(t_0)}{N_0 E_h} = \frac{2E^2}{N_0 E_h}. \quad (14)$$

Принимая  $\psi = 1$ , имеем  $E_h = E$ , тогда  $q^2 = 2E/N_0$  ( $q^2$  – безразмерная величина). Выигрыш в отношении сигнал-шум по сравнению со случаем однократного отсчета равен

$$\eta = \frac{2E/N_0}{a^2/\sigma^2} = \frac{2E\sigma^2}{a^2N_0}. \quad (15)$$

Учитывая, что шум на входе СФ квазибелый с полосой  $(-F, F)$ , содержащей 99% энергии сигнала,

$$\int_{-F}^F |S(f)|^2 df = 0,99 \int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df = 0,99E, \quad (16)$$

получим  $F=10,286/\tau$ , тогда СПМ шума  $N_0/2=\sigma^2/(2F)$ , откуда легко найти выигрыш  $\eta$ .

### 5.8 Расчет вероятностей однократной и двукратной ошибок

В пределах одной кодовой комбинации длины  $n$  можно выполнить по формуле биномиального распределения вероятностей

$$P(k)=C_n^k p^k (1-p)^{n-k},$$

где  $k$  следует положить равным соответственно 1 или 2, а в качестве  $p$  принять среднюю вероятность ошибки при приеме одного символа  $p_{\text{ош}}$ , найденную при выполнении пункта 3.

## 6 Критерии оценки курсовой работы

**100-85 баллов** (или оценка «отлично») выставляется обучающемуся, если тема курсовой работы раскрыта полно и глубоко, при этом убедительно и аргументированно изложена собственная позиция автора по рассматриваемому вопросу; корректно выполнены необходимые расчеты и сделаны аргументируемые выводы по результатам расчетов; построены необходимые схемы и графики, проведен анализ полученных результатов; курсовая работа демонстрирует способность автора к сопоставлению, анализу и обобщению; структура курсовой работы четкая и логичная; изучено большое количество актуальных источников, включая дополнительные источники, корректно сделаны ссылки на источники; основные положения доказаны; сделан обоснованный и убедительный вывод; сформулированы мотивированные рекомендации; выполнены требования к оформлению курсовой работы.

**84-70 баллов** (или оценка «хорошо») выставляется обучающемуся, если тема курсовой работы раскрыта, сделана попытка самостоятельного осмысления темы; структура курсовой работы логична; корректно

выполнены расчеты; построены схемы и графики, изучены основные источники, правильно оформлены ссылки на источники; основные положения и вывод носят доказательный характер; сделаны рекомендации; имеются незначительные погрешности в содержании и (или) оформлении курсовой работы.

**69-50 баллов** (или оценка «удовлетворительно») выставляется обучающемуся, если тема курсовой работы раскрыта неполно и (или) в изложении темы имеются недочеты и ошибки; отмечаются отступления от рекомендованной структуры курсовой работы; выполнены основные расчеты; количество изученных источников менее рекомендуемого, сделаны ссылки на источники; вывод сделан, но имеет признаки неполноты и неточности; рекомендации носят формальный характер; имеются недочеты в содержании и (или) оформлении курсовой работы.

**49 и менее баллов** (или оценка «неудовлетворительно») выставляется обучающемуся, если тема курсовой работы не раскрыта и (или) в изложении темы имеются грубые ошибки; структура курсовой работы нечеткая или не определяется вообще; расчеты не выполнены или выполнены с грубыми ошибками, количество изученных источников значительно менее рекомендуемого, неправильно сделаны ссылки на источники или они отсутствуют; отсутствует вывод или автор испытывает затруднения с выводами; не соблюдаются требования к оформлению курсовой работы.

## **7 Список литературы, используемой для выполнения курсовой работы**

1. Бабанин И.Г., Коптев Д.С. Общая теория связи. Сигналы и аналоговые системы передачи информации: учеб. пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2018. – 110 с.

2. Бабанин И.Г., Коптев Д.С., Мухин И.В. Общая теория связи. Цифровые системы передачи данных: учеб. пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2019. – 106 с.

3. Коптев Д.С., Бабанин И.Г., Довбня В.Г. Теория радиотехнических сигналов: учеб. пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2019. – 240 с.