

Государственный комитет Российской Федерации
по телекоммуникациям
**ПОВОЛЖСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**

Кафедра теоретических основ радиотехники и связи

Одобрено методическим советом ПГАТИ

**Задание и методические указания
к курсовой работе
по теории электрической связи**
для студентов 3 курса дневной формы обучения
по специальностям

- 200900 - Многоканальные телекоммуникационные системы,
- 201000 - Радиосвязь, радиовещание и телевидение,
- 201100 - Сети связи и системы коммутации
и направлению 550400 - Телекоммуникации

Авторы-составители: профессор В.А.Шилкин,
профессор С.М.Широков
Редактор: профессор Д.Д.Кловский
Рецензент: профессор А.И.Тяжев

Самара - 1999

Общие правила выполнения и оформления работы

Перед выполнением курсовой работы необходимо внимательно изучить теоретический материал по соответствующим разделам курса ТЭС, используя учебные пособия, указанные в списке литературы, и конспекты лекций, а также методические указания по каждому пункту работы, приведенные ниже (после текста задания).

Работа выполняется по индивидуальному заданию, исходные данные для которого выбираются из приведенной далее таблицы вариантов в соответствии с двумя последними цифрами номера студенческого билета (зачетной книжки).

При выполнении каждого пункта сначала переписывается его условие, затем производятся требуемые расчеты в общем виде и лишь после этого подставляются конкретные числовые данные варианта. В числовых расчетах достаточно ограничиться 3-4 значащими цифрами. При записи окончательных результатов, а также при изображении временных и спектральных диаграмм следует избегать неудобного для восприятия представления больших или малых величин в показательной форме (типа $2 \cdot 10^{-6}$ с, $3,1 \cdot 10^7$ Гц и т.п.) и использовать вместо этого общепринятые в инженерных расчетах кратные или дольные единицы измерения (2 мкс, 31 МГц и т.п.).

Все расчеты и диаграммы должны сопровождаться краткими пояснениями, однако при этом нет необходимости приводить подробные теоретические выкладки и объяснения, заимствованные из лекций или учебников и не имеющие прямого отношения к данному расчету или схеме. Использование готовых формул должно сопровождаться ссылками на литературу с указанием страниц и формул.

Структурные схемы и диаграммы изображаются с применением чертежных инструментов или принтера. Все диаграммы должны быть достаточно крупными (занимать не менее половины листа), иметь числовые шкалы (деления) по осям в соответствующих единицах и строиться «в масштабе», т.е. по конкретным числовым результатам расчетов с учетом этих шкал. Замена таких расчетных диаграмм мелкими схематическими рисунками без делений по осям, заимствованными из учебников, не допускается.

Для оформления работы можно использовать обычную ученическую тетрадь с делениями в клетку или стандартные листы писчей бумаги. Во втором случае диаграммы должны быть выполнены на миллиметровой бумаге, а листы работы переплетены любым способом, обеспечивающим ее удобный просмотр и хранение. Работы в виде листов, соединенных канцелярскими скрепками, не принимаются.

Допускается оформление работы с применением компьютера и принтера, пишущих машинок, плоттеров и других технических средств. В этом случае для представления диаграмм не требуется миллиметровая бумага, но они должны иметь заменяющую ее координатную сетку.

При любом способе оформления листы работы должны иметь поля не менее 3-4 см для записи замечаний преподавателя.

В конце работы приводится список использованной литературы и ставится подпись исполнителя с датой.

На обложке работы указывается ее название, фамилия и инициалы исполнителя, номера группы и студенческого билета, номер варианта.

Задание на курсовую работу

1. Структурная схема системы передачи и исходные данные

Объектом расчета является цифровая система передачи непрерывных сообщений с импульсно-кодовой модуляцией (ЦСП с ИКМ) по каналу с шумом. Структурная схема системы приведена на рис.1 и включает в себя источник сообщений (ИС), дискретизатор (Д), кодирующее устройство (Кодер), модулятор (Мод), линия связи (ЛС), демодулятор (Дем), декодер (Дек) и фильтр-восстановитель (ФВ).

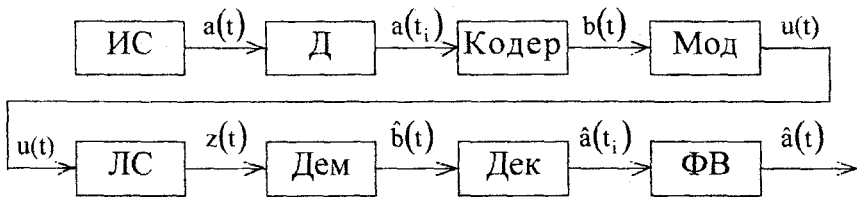


Рис.1. Структурная схема цифровой системы передачи сообщений

Из приведенной ниже таблицы необходимо выписать следующие исходные данные для расчета в соответствии с номером своего варианта, определяемого двумя последними цифрами номера студенческого билета (зачетной книжки):

интервал значений передаваемого сообщения $a(t)$:

(a_{min}, a_{max}) ;

полоса частот сообщения F_c ;

номер передаваемой кодовой комбинации j ;

вид модуляции (АМ, ЧМ, ФМ или ОФМ);

спектральная плотность мощности шума N_0 ;

способ приема (1-когерентный, 2 - некогерентный)

Затем в соответствии с приведенными далее пунктами задания рассчитываются характеристики указанных элементов и системы в целом.

2. Источник сообщений

Непрерывное сообщение, поступающее от источника ИС и представленное первичным электрическим сигналом в форме напряжения $a(t)$, является стационарным случайным процессом, мгновенные значения которого распределены равномерно в интервале (a_{min}, a_{max}) , а энергетический спектр сосредоточен в полосе частот от 0 до F_c .

Требуется выполнить следующее.

- 2.1. Записать аналитическое выражение и построить график одномерной плотности вероятности мгновенных значений сообщения $a(t)$.
- 2.2. Найти соответствующую интегральную функцию распределения сообщения и построить ее график.
- 2.3. Рассчитать значения математического ожидания m_a и дисперсии σ_a^2 сообщения $a(t)$.

3. Дискретизатор

Дискретизатор преобразует сообщение в последовательность отсчетов, взятых с интервалом по времени Δt . Затем каждый отсчет квантуется по уровню (напряжению) с равномерным шагом $\Delta a = 0,1B$.

Требуется рассчитать следующее.

- 3.1. Максимально допустимый интервал дискретизации по времени Δt .
- 3.2. Число уровней квантования L .
- 3.3. Среднюю мощность шума квантования.
- 3.4. Отношение средних мощностей сигнала и шума квантования.
- 3.5. Рассматривая дискретизатор, как источник дискретных сообщений с объемом алфавита L , определить его энтропию $H(A)$ и производительность $H'(A)$ при условии, что отсчеты, взятые через интервал Δt , статистически независимы.

4. Кодер

Кодер обеспечивает представление квантованных по уровню отсчетов сообщения помехоустойчивым двоичным кодом. Эта операция осуществляется в два этапа. На первом из них производится примитивное кодирование: каждый уровень квантованного сообщения $a(t_i)$ представляется комбинацией $(b_k, b_{k-1}, \dots, b_1)$ k -разрядного равномерного двоичного кода.

На втором этапе из них формируются комбинации кода с одной проверкой на четность: к каждой исходной комбинации добавляется

один проверочный символ, получаемый в результате суммирования всех ее символов по модулю 2.

Сформированная таким образом кодовая комбинация $(b_{k+1}, b_k, b_{k-1}, \dots, b_1)$ имеет в итоге $n = k+1$ разрядов и представляется на выходе кодера двуполярным сигналом $b(t)$ в виде последовательности импульсов со значениями +1 и -1 (синхронным двоичным случайным сигналом). При этом символ «1» представляется значением $b(t)=1$, а символ «0» - значением $b(t)=-1$.

Требуется выполнить следующее.

- 4.1. Определить число разрядов примитивного кода k , необходимое для кодирования всех L уровней квантованного сообщения.
- 4.2. Найти избыточность ρ_k кода с одной проверкой на четность.
- 4.3. Записать комбинацию примитивного двоичного кода, соответствующую передаче j -го уровня, считая, что она представляет собой запись числа j в двоичной системе счисления.
- 4.4. Записать соответствующую комбинацию кода с проверкой на четность, указать в ней информационные и проверочный разряды.
- 4.5. Определить число двоичных символов, выдаваемых кодером в единицу времени (скорость манипуляции) ν_k и длительность передачи символа (тактыый интервал синхронного двоичного сигнала) T .

5. Модулятор

В этом блоке осуществляется модуляция гармонического несущего колебания $u_{\text{ген}}(t) = U_m \cos 2\pi f t$ первичным сигналом $b(t)$, представляющим передаваемую последовательность двоичных символов, как это описано выше. В последующих расчетах следует принять $U_m=1\text{В}$, $f=100 \nu_k$.

В зависимости от того, какой параметр несущего колебания изменяется в соответствии с передаваемым первичным сигналом, различают амплитудную, частотную, фазовую и другие виды модуляции. Вид

модуляции выбирается в соответствии с номером варианта из таблицы. В результате модуляции двоичные символы представляются следующими высокочастотными сигналами.

Амплитудная модуляция (АМ). Символам “0” и “1” соответствуют элементы сигнала длительностью T вида

$$u_0(t)=0, \quad u_1(t)=U_m \cos 2\pi f t \quad (\text{система сигналов с пассивной паузой}).$$

Частотная модуляция (ЧМ). Символам “0” и “1” соответствуют ортогональные элементы сигнала длительностью T вида

$$u_0(t)=U_m \cos 2\pi(f-\Delta f)t, \quad u_1(t)=U_m \cos 2\pi(f+\Delta f)t.$$

Фазовая модуляция (ФМ). Символам “0” и “1” соответствуют противофазные элементы сигнала длительностью T вида

$$u_0(t)=-U_m \cos 2\pi f t, \quad u_1(t)=U_m \cos 2\pi f t.$$

Относительная фазовая модуляция (ОФМ) в отличие от обычной ФМ предполагает представление каждого двоичного символа не абсолютной фазой элемента сигнала, а ее изменением по отношению к предшествующему элементу. Сигнал ОФМ можно рассматривать как результат обычной фазовой модуляции несущего колебания новой последовательностью символов, сформированной по следующему правилу:

$$c_n = b_n \oplus c_{n-1},$$

где c_n — n -й символ новой (перекодированной) последовательности, b_n — n -й символ исходной последовательности ($n = 1, 2, \dots, k+1$).

Требуется выполнить следующее.

- 5.1. Изобразить временные диаграммы первичного (модулирующего) сигнала $b(t)$, представляющего кодовую комбинацию j -го уровня сообщения $(b_{k+1}, b_k, b_{k-1}, \dots, b_1)$, как это описано в п.4, и соответствующего модулированного сигнала $u(t)$ (с учетом заданного вида модуляции).
- 5.2. Записать аналитическое выражение указанного модулированного сигнала $u(t)$, связывающее его с первичным сигналом $b(t)$.

- 5.3. Записать аналитическое выражение и построить график корреляционной функции первичного (модулирующего) сигнала $B_b(\tau)$.
- 5.4. Записать аналитическое выражение и построить диаграмму спектральной плотности мощности (энергетического спектра) этого сигнала, $G_b(f)$.
- 5.5. Определить ширину ΔF_b указанного энергетического спектра $G_b(f)$ по упрощенному правилу, согласно которому учитывается определенное число α «лепестков» спектра. Число α выбрать по желанию в пределах от 1 до 3. Полученное значение ΔF_b отложить на спектральной диаграмме.
- 5.6. Записать аналитическое выражение и построить диаграмму энергетического спектра модулированного сигнала (для сигналов ЧМ значение девиации частоты Δf выбрать таким, чтобы обеспечивалась ортогональность элементов сигнала $u_0(t)$ и $u_1(t)$) на интервале T .
- 5.7. Определить полосу частот (ширину энергетического спектра) модулированного сигнала ΔF_u . Отложить полученное ее значение на диаграмме спектра $G_u(f)$.

6. Канал связи

Полученный в результате модуляции высокочастотный сигнал $u(t)$ передается по каналу связи с постоянными параметрами и аддитивной помехой. Предполагается, что частотные характеристики канала выбраны таким образом, что сигнал в нем только затухает без искажений формы и временного рассеяния. С выхода такого канала на вход приемного устройства поступает смесь

$$z(t) = s(t) + n(t),$$

где $s(t)$ — полезный сигнал на выходе канала, связанный с переданным сигналом $u(t)$ известными соотношениями, $n(t)$ — аддитивная помеха, приведенная к выходу канала.

Аддитивная помеха $n(t)$ представляет собой флуктуационный гауссовский шум с равномерным энергетическим спектром $N_0/2$ (белый шум).

Заданы значения коэффициента передачи канала $k_0 = (a_0 + 1)/10$, (где a_0 – последняя цифра номера студенческого билета) и спектра шума N_0 (см. таблицу вариантов).

Требуется выполнить следующее.

- 6.1. Записать аналитическое выражение, связывающее входной и выходной сигналы в заданном канале.
- 6.2. Найти мощность шума на выходе канала $P_{ш}$. Полосу пропускания канала F_K принять равной полосе частот модулированного сигнала ΔF_u , найденной в п.5: $F_K = \Delta F_u$.
- 6.3. Рассчитать отношение мощностей сигнала и шума на выходе канала $P_c/P_{ш}$.
- 6.4. Определить пропускную способность непрерывного канала, C .
- 6.5. Рассчитать эффективность использования пропускной способности непрерывного канала, K_C , определяемую как отношение производительности источника сообщений $H'(A)$ к пропускной способности непрерывного канала C .

7. Демодулятор

В демодуляторе осуществляется оптимальная когерентная или некогерентная (в зависимости от варианта) обработка принимаемой смеси сигнала с шумом $z(t)$, целью которой является вынос решения о переданном символе.

Требуется выполнить следующее.

- 7.1. Записать общее решающее правило различения (приема) сигналов M -позиционного кода (при условии равенства их априорных вероятностей) в заданном канале, оптимальное по критерию идеального наблюдателя (минимума средней вероятности ошибки).

- 7.2. Записать алгоритм приема двоичных сигналов с заданным видом модуляции (когерентного или некогерентного, в зависимости от варианта) в канале с белым гауссовским шумом.
- 7.3. Изобразить структурную схему оптимального демодулятора, реализующего указанный алгоритм.
- 7.4. Рассчитать среднюю вероятность ошибочного приема P .
- 7.5. Определить, как нужно изменить энергию сигналов, чтобы при других видах модуляции и заданном способе приёма сохранялось бы то же значение вероятности ошибки P .

8. Декодер

Процесс декодирования в рассматриваемой системе осуществляется в два этапа. На первом этапе производится обнаружение ошибок в принятой кодовой комбинации. Если ошибки не обнаружены, то на втором этапе комбинации символов в k информационных разрядах ставится в соответствие элемент (квантованное значение отсчета) принятого сообщения $\hat{a}(t_j)$. В случае обнаружения ошибок принимаются меры к их исправлению, которые здесь не рассматриваются.

Требуется выполнить следующее.

- 8.1. Оценить обнаруживающую способность q_0 заданного кода $(n, n-1)$ с одной проверкой на четность.
- 8.2. Указать алгоритм обнаружения ошибок.
- 8.3. Рассчитать вероятность необнаруженной ошибки $P_{ню}$.

9. Фильтр-восстановитель

Этот элемент предназначен для восстановления непрерывного сообщения $\hat{a}(t)$ по сформированным, как описано выше, отсчетам $\hat{a}(t_j)$ и представляет собой фильтр нижних частот (ФНЧ). В предположении, что использован идеальный ФНЧ с частотой среза F_c , *требуется выполнить следующее.*

- 9.1. Указать значение F_c , при котором обеспечивается теоретически точное восстановление непрерывного сообщения.
- 9.2. Изобразить АЧХ и ФЧХ фильтра-восстановителя.

- 9.3. Найти импульсную характеристику $g(t)$ фильтра-восстановителя и начертить её график.
- 9.4. Записать условие физической реализуемости найденной импульсной характеристики.

Таблица вариантов

В последнем столбце таблицы цифрами обозначено:
1 – когерентный приём; 2 – некогерентный приём.

№ варианта	$a_{\min}, \text{В}$	$a_{\max}, \text{В}$	$F_c, \text{Гц}$	j	Вид мод.	$N_0, \text{В}^2/\text{Гц}$	Способ приёма
1	2	3	4	5	6	7	8
00/50	-3,2	+3,2	10^4	36/61	ФМ	$7,44 \cdot 10^{-7}$	1
01/51	-6,4	+6,4	10^4	78/106	ЧМ	$3,25 \cdot 10^{-7}$	2/1
02/52	-12,8	+12,8	10^4	126/199	АМ	$1,45 \cdot 10^{-7}$	2/1
03/53	0	+3,2	$6 \cdot 10^6$	29/1	ЧМ	$7,24 \cdot 10^{-10}$	1/2
04/54	0	+6,4	$6 \cdot 10^6$	55/62	ФМ	$1,24 \cdot 10^{-9}$	1
05/55	0	+12,8	$6 \cdot 10^6$	68/75	ОФМ	$1,09 \cdot 10^{-9}$	1/2
06/56	0	+25,6	$6 \cdot 10^6$	131/200	АМ	$2,41 \cdot 10^{-10}$	1/2
07/57	-1,6	+1,6	$15 \cdot 10^3$	10/21	ЧМ	$2,9 \cdot 10^{-7}$	1/2
08/58	-3,2	+3,2	$15 \cdot 10^3$	40/63	ОФМ	$4,96 \cdot 10^{-7}$	1/2
09/59	-6,4	+6,4	$15 \cdot 10^3$	79/107	АМ	$1,09 \cdot 10^{-7}$	1/2
10/60	-12,8	+12,8	$15 \cdot 10^3$	145/201	ФМ	$3,86 \cdot 10^{-7}$	1
11/61	0	+12,8	10^3	67/72	ЧМ	$3,25 \cdot 10^{-6}$	2/1
12/62	-1,6	+1,6	$3,4 \cdot 10^3$	11/18	ФМ	$2,56 \cdot 10^{-6}$	1
13/63	-1,6	+1,6	$8 \cdot 10^3$	15/23	ФМ	$1,09 \cdot 10^{-6}$	1
14/64	-1,6	+1,6	10^4	16/25	ФМ	$8,68 \cdot 10^{-7}$	1
15/65	-1,6	+1,6	$15 \cdot 10^3$	14/27	ФМ	$5,8 \cdot 10^{-7}$	1

1	2	3	4	5	6	7	8
16/66	-1,6	+1,6	$3,4 \cdot 10^3$	5/19	AM	$6,4 \cdot 10^{-7}$	1/2
17/67	-3,2	+3,2	$3,4 \cdot 10^3$	30/43	ЧМ	$1,1 \cdot 10^{-6}$	1/2
18/68	-6,4	+6,4	$3,4 \cdot 10^3$	76/101	ФМ	$1,92 \cdot 10^{-6}$	1
19/69	-12,8	+12,8	$3,4 \cdot 10^3$	126/196	ОФМ	$2,18 \cdot 10^{-6}$	1/2
20/70	0	+3,2	10^3	28/2	AM	$3,73 \cdot 10^{-6}$	1/2
21/71	0	+6,4	10^3	54/59	ЧМ	$6,52 \cdot 10^{-6}$	1/2
22/72	0	+12,8	10^3	69/74	ФМ	$5,8 \cdot 10^{-6}$	1
23/73	0	+25,6	10^3	124/197	ОФМ	$2,72 \cdot 10^{-7}$	1/2
24/74	-1,6	+1,6	$8 \cdot 10^3$	8/20	AM	$4,65 \cdot 10^{-7}$	2/1
25/75	-3,2	+3,2	$8 \cdot 10^3$	35/60	ЧМ	$8,15 \cdot 10^{-7}$	2/1
26/76	-6,4	+6,4	$8 \cdot 10^3$	77/105	ФМ	$7,24 \cdot 10^{-7}$	1
27/77	-12,8	+12,8	$8 \cdot 10^3$	125/198	ОФМ	$1,7 \cdot 10^{-6}$	2/1
28/78	-1,6	+1,6	10^4	9/22	ОФМ	$8,68 \cdot 10^{-7}$	2/1
29/79	-12,8	+12,8	10^4	155/175	ЧМ	$2,9 \cdot 10^{-7}$	1/2
30/80	-12,8	+12,8	$15 \cdot 10^3$	122/181	ЧМ	$1,93 \cdot 10^{-7}$	2/1
31/81	0	+3,2	10^3	12/26	ЧМ	$4,34 \cdot 10^{-6}$	1/2
32/82	0	+3,2	$6 \cdot 10^6$	3/17	ФМ	$1,45 \cdot 10^{-9}$	1
33/83	0	+6,4	10^3	56/46	ФМ	$7,45 \cdot 10^{-6}$	1
34/84	0	+6,4	$6 \cdot 10^6$	57/47	ЧМ	$1,24 \cdot 10^{-9}$	2/1
35/85	0	+12,8	10^3	66/71	ЧМ	$6,51 \cdot 10^{-6}$	1/2
36/86	0	+25,6	$6 \cdot 10^6$	65/73	AM	$2,72 \cdot 10^{-10}$	2/1
37/87	0	+25,6	10^3	182/191	AM	$1,45 \cdot 10^{-6}$	1/2
38/88	0	+12,8	$6 \cdot 10^6$	121/195	ЧМ	$4,82 \cdot 10^{-10}$	2/1
39/89	0	+12,8	10^3	64/71	AM	$1,63 \cdot 10^{-6}$	1/2
40/90	-3,2	+3,2	$3,4 \cdot 10^3$	13/24	AM	$5,49 \cdot 10^{-7}$	1/2
41/91	-3,2	+3,2	$8 \cdot 10^3$	41/49	AM	$2,33 \cdot 10^{-7}$	2/1
42/92	-3,2	+3,2	10^4	50/45	AM	$1,87 \cdot 10^{-7}$	1/2
43/93	-3,2	+3,2	$15 \cdot 10^3$	53/42	AM	$1,24 \cdot 10^{-7}$	2/1

1	2	3	4	5	6	7	8
44/94	-6,4	+6,4	$3,4 \cdot 10^3$	80/83	ОФМ	$1,92 \cdot 10^{-6}$	1/2
45/95	-6,4	+6,4	$8 \cdot 10^3$	84/95	ОФМ	$8,14 \cdot 10^{-7}$	2/1
46/96	-6,4	+6,4	10^4	100/99	ОФМ	$6,51 \cdot 10^{-7}$	1/2
47/97	-6,4	+6,4	$15 \cdot 10^3$	81/82	ОФМ	$4,34 \cdot 10^{-7}$	2/1
48/98	-12,8	+12,8	$3,4 \cdot 10^3$	146/159	ЧМ	$8,53 \cdot 10^{-7}$	1/2
49/99	-12,8	+12,8	$8 \cdot 10^3$	150/170	ЧМ	$3,62 \cdot 10^{-7}$	2/1
50/00	-3,2	+3,2	10^4	36/61	ФМ	$7,44 \cdot 10^{-7}$	1

Методические указания по выполнению курсовой работы

В соответствии с установленным учебным графиком данная работа выполняется с начала 5-го семестра и некоторые пункты задания могут относиться к разделам курса ТЭС, которые еще не изучены полностью в рамках лекций и других видов занятий. Поэтому для правильного и осмысленного ее выполнения необходима самостоятельная проработка части разделов программы. Соответствующие ссылки на учебную литературу (список которой приведен в конце) даются далее по ходу методических указаний в квадратных скобках.

1. Структурная схема системы передачи и исходные данные

В этом пункте работы следует выписать исходные данные из таблицы вариантов. Затем для осознанного выполнения всех последующих пунктов работы необходимо ознакомиться с принципами построения современных ЦСП с ИКМ по пособиям: [1], п.8.9. 8.10 или [4], п.8.1, 8.2.

2. Источник сообщений

Необходимые теоретические сведения и формулы, касающиеся расчета вероятностных характеристик случайных сигналов, изучены в части 1 курса ТЭС и приведены в [1], п.2.5, 2.8; [2], п.2.1, 2.2; [3], п.1.1; [4], п.2.1. 2.2; а также в [5] и [6]. Конкретное числовое значе-

ние плотности вероятности сообщения $w(a)$, равномерной в заданном интервале (a_{min}, a_{max}) , определяется из условия ее нормировки.

3. Дискретизатор

Этот пункт задания требует для его выполнения знания теории дискретизации функций непрерывного аргумента (часть 1), основных понятий теории информации и принципов построения ЦСП с ИКМ (часть 2). См. [1], п.2.4, 6.2, 8.9, 8.10; [2], п.2.5, 8.1; [3], п.1.3; [4], п.2.7, 4.1, 8.1, 8.2; [5].

Интервал дискретизации Δt определяется по теореме Котельникова.

Число уровней квантования L рассчитывается как число шагов длиной Δa , которое может поместиться в заданном интервале значений передаваемого сообщения (a_{min}, a_{max}) .

При расчете мощности шума квантования (см. указанную литературу) учитывают, что при заданном в п.2 равномерном законе распределения сообщения $a(t)$ все его значения, попадающие в интервал между двумя соседними уровнями квантования, равновероятны и не зависят от номера уровня. Поэтому и шум квантования $\varepsilon(t)$ (определяемый в каждый момент времени как отклонение значения исходного сообщения от ближайшего к нему уровня квантования) распределен равномерно в интервале $(-\Delta a/2, \Delta a/2)$. Мощности первичного сигнала (сообщения) P_a и шума P_ε определяются как их дисперсии.

Энтропия и производительность дискретизатора определяются по формулам расчета указанных информационных характеристик для дискретных источников, причем в роли выдаваемых ими символов здесь выступают уровни сообщения (соответственно, единицей измерения $H(A)$ в этом случае является бит/уровень). Следует учесть, что вероятности всех уровней квантованного сообщения $P(a_j)$, где $j = 1, 2, \dots, L$, при заданном равномерном законе распределения его мгновенных значений и выбранном способе квантования одинаковы.

4. Кодер

Выполнение этого пункта требует знаний по разделу «Основы теории кодирования»: [2], п.5.1, 5.3, 5.4; [3], п.5.1, 5.2; [4], п.4.1, 4.2; [5]. Минимально необходимые сведения приведены в [7], с. 2-5. Для углубленного изучения этих вопросов рекомендуется [1], глава 7.

Число разрядов примитивного кода k , необходимое для кодирования L уровней квантованного сообщения, определяется из очевидного условия, что общее число всех возможных комбинаций из k двоичных разрядов должно быть равно L .

Избыточность кода рассчитывается по известной формуле (см. указанную литературу). При этом не следует путать избыточность кода с информационной избыточностью источника сообщений.

Запись комбинации примитивного двоичного кода, соответствующей передаче j -го уровня, поясним на примере.

Пусть $k=8, j=217$. Представим число 217 в двоичной системе счисления:

$$217 = 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0.$$

Коэффициенты этого представления образуют 8 информационных символов комбинации примитивного кода:

1 1 0 1 1 0 0 1

b_8 b_7 b_6 b_5 b_4 b_3 b_2 b_1

Проверочный символ b_9 образуется путём суммирования по модулю 2 всех информационных символов. В данном примере, как легко убедиться, получается $b_9=1$. Он добавляется к исходной комбинации слева. В итоге получается комбинация помехоустойчивого кода

1 1 1 0 1 1 0 0 1

b_9 b_8 b_7 b_6 b_5 b_4 b_3 b_2 b_1

Длительность передачи двоичного символа T (тактыый интервал) легко найти, если учесть, что за время Δt между двумя следующими друг за другом отсчетами сообщения передается $n=k+1$ символов кодовой комбинации отсчета. Число двоичных символов, выдаваемое кодером в секунду ν_k , определяется как величина, обратная T .

5. Модулятор

Наиболее подробные сведения по этому пункту приведены в [3], глава 2, более краткие - в [2], п.1.4; [3], п.1.3, 2.2; [4], п.1.1. Для углубленной подготовки рекомендуется [1], п.3.5, 3.7.

Временные диаграммы первичного (модулирующего) сигнала $b(t)$ и соответствующего модулированного сигнала $u(t)$ необходимо изобразить друг под другом, с числовыми делениями по оси времени и с учетом найденного значения

тактового интервала T . (При изображении несущего колебания модулированного сигнала учитывать его реальную частоту f_0 , естественно, не требуется, достаточно условно показать два-три его периода на каждом тактовом интервале).

Для вариантов, где задана ОФМ, необходимо кроме первичного сигнала $b(t)$ изобразить перекодированный сигнал $c(t)$. Следует убедиться, что изменение фазы модулированного колебания на 180° происходит при появлении символа 1 в передаваемой двоичной последовательности.

При записи аналитического выражения модулированного сигнала $u(t)$ следует учесть, что это должно быть единое выражение, связывающее $u(t)$ с первичным сигналом $b(t)$, а не две отдельные формулы для элементов сигнала, соответствующих символам 0 и 1, приведенные в задании. При этом необходимо конкретизировать общие выражения сигналов АМ, ЧМ, ФМ применительно к случаю модуляции двоичным сигналом $b(t)$. В частности, при двоичной АМ глубина модуляции должна быть равна 1, а при двоичной ЧМ частота принимает два значения $f_1=f_0+\Delta f$, $f_2=f_0-\Delta f$ (осуществляется переключение или «манипуляция» частоты), поэтому общее выражение сигнала ЧМ через интеграл от сообщения здесь не применимо.

Девياцию частоты Δf следует выбрать такой, чтобы обеспечивалась ортогональность элементов сигнала $u_0(t)$ и $u_1(t)$ на интервале T . Необходимо показать, что это условие будет выполнено, если $\Delta f = \beta/T$, где β - целое положительное число. На практике обычно выбирают его в пределах от 1 до 3.

После записи выражения модулированного сигнала следует проверить выполнение равенств

$$u(t) = u_0(t) \text{ при } b(t) = -1 \text{ и } u(t) = u_1(t) \text{ при } b(t) = 1.$$

При записи аналитического выражения корреляционной функции первичного (модулирующего) сигнала $B_b(\tau)$ следует использовать (с соответствующей ссылкой на учебник) известную формулу $B_b(\tau)$ для случайного синхронного двоичного (телеграфного) сигнала. По ней с использованием теоремы Винера-Хинчина рассчитывается соответствующий энергетический спектр $G_b(f)$.

При расчете спектра модулированного сигнала $G_u(f)$ также необходимо учитывать специфику двоичной модуляции. Энергетический спектр сигнала АМ получается путем сдвига спектра первичного сигнала на несущую частоту с умножением его на константу и с добавлением компоненты в виде δ -функции на несущей частоте. Спектры сигналов двоичной ЧМ и ФМ (а также ОФМ) легко найти, представив каждый из этих сигналов в виде суммы двух сигналов АМ с разными частотами или, соответственно, фазами. При этом складываются и их энергетические спектры (см. подробнее [5]). Спектры сигналов ФМ и ОФМ при этом получаются одинаковыми и качественно не отличаются от энергетического спектра сигнала балансной АМ.

При построении спектральных диаграмм следует обратить особое внимание на соответствие их масштабов для первичного и модулированного сигналов. По осям должны быть нанесены подробные числовые шкалы с учетом расчетных числовых значений всех величин.

При определении ширины спектра следует учитывать выбранные значения параметров α и β .

6. Канал связи

Теоретические сведения, касающиеся преобразований сигналов в каналах связи и их информационной пропускной способности, можно найти в [1], глава 4 и п.6.3; [2], глава 3 и п.4.5; [3], глава 3 и п.4.4; [4], глава 2 и п.3.4; [5], п.3.2, 3.4.

При записи аналитического выражения, связывающее входной и выходной сигналы, следует учитывать модель канала, в соответствии с которой задан способ приема. При когерентном приеме предполагается, что преобразование полезного сигнала в канале является детерминированным и описывается выражением вида (4.48) в [1] (см. также (3.38) в [2] и аналогичные соотношения в [3-5]). Некогерентный прием применяется в каналах с неопределенной фазой и выходной сигнал в этом случае связан с входным соотношением (без номера), приведенным в п.4.4.3 [1] или (3.40) в [2]. Аналогичные формулы можно найти и в [3-5]. Разумеется, при этом обозначения всех величин необходимо привести в соответствии с теми, что использованы в задании.

Мощность шума на выходе канала $P_{ш}$ легко найти, если учесть, что он имеет заданную постоянную спектральную плотность мощности N_0 в полосе пропускания канала F_K .

При расчете мощности сигнала следует иметь в виду, что это понятие в технике связи имеет условный смысл. Физическая мощность согласно законам электротехники, конечно, зависит не только от сигнала (в форме напряжения или тока), но и от сопротивления нагрузки, на которой она выделяется. Под «мощностью сигнала» в связи условно принято понимать мощность, выделяемому на резисторе с сопротивлением 1 Ом. В соответствии с этим определением средняя мощность сигнала $S_i(t)$ на интервале времени T рассчитывается по формуле

$$P_{ci} = \frac{1}{T} \int_0^T S_i^2(t) dt$$

Для синусоидальных сигналов, которые используются в рассматриваемой системе, в результате такого интегрирования получается известное выражение, приводимое в учебниках по физике и теории электрических цепей и связывающее мощность P_{ci} с амплитудой сигнала

$$P_{ci} = U_{si}^2/2 \quad (i=0; 1)$$

Здесь U_{si} – амплитуда элемента сигнала $s_i(t)$ на приемной стороне, связанная с амплитудой переданного сигнала $u_i(t)$ коэффициентом k_0 .

В вариантах данной работе могут быть заданы сигналы как с активной, так и с пассивной паузой, поэтому при расчетах пропускной способности канала необходимо рассматривать среднюю мощность в расчете на элемент сигнала

$$P_c = (P_{c0} + P_{c1})/2.$$

Затем рассчитывается отношение мощностей сигнала и шума на выходе канала $P_c/P_{ш}$.

Пропускная способность непрерывного канала C определяется по формуле Шеннона: см. [1], (6.83); [2], (4.47), а также [3-5].

7. Демодулятор

Для осмысленного выполнения этого пункта задания необходимо внимательно изучить основы теории оптимального приема дискретных сообщений, изложенные в [1], глава 5 или [2], глава 6; [3], глава 6; [4], глава 5; [5], глава 6. Минимально необходимые сведения по этому вопросу можно найти в [7], работа № 9.

Следует прежде всего уяснить, что задача демодуляции при приеме дискретных сообщений существенно отличается от демодуляции (детектирования) непрерывных сообщений, в частности не требует восстановления формы первичных сигналов в виде прямоугольных импульсов. Цель в этом случае иная - необходимо установить, какие символы сообщения были переданы. При **оптимальной демодуляции** эта цель должна быть достигнута с наивысшим качеством по некоторому критерию.

Критерий оптимальности - это условие максимума или минимума основного показателя качества приема, представляющего интерес для пользователя системы связи. Таковым при приеме дискретных сообщений является средняя вероятность ошибки (коэффициент ошибок). Критерий ее минимума (или, что то же самое, максимума вероятности правильного приема) называют критерием «идеального наблюдателя».

Критерий обычно сводят к некоторому **решающему правилу**, согласно которому подлежит максимизации или минимизации некоторая величина, зависящая от принимаемой смеси сигнала с шумом (например, апостериорная вероятность передачи i -го символа, найденная после приема указанной смеси). Не следует смешивать решающее правило с критерием оптимальности.

При выполнении п.7.1 надо не только правильно выбрать такое решающее правило с учетом условий задания, но и аргументировать свой выбор.

Алгоритм приема - это уже совокупность конкретных операций над принятой смесью, имеющая целью установить, какой именно из m (в данном случае

- двух) возможных символов был передан. Известны алгоритмы приема по минимуму среднего квадрата отклонения, на основе выполнения корреляционных операций и другие. В случае приема двоичных сигналов эти алгоритмы существенно упрощаются.

Именно такой упрощенный алгоритм приема и реализующая его структурная схема должны быть представлены и пояснены в работе. Следует избегать распространенной ошибки, когда выполнение конкретных пунктов задания подменяется заимствованным из учебников подробным изложением теории оптимального приема для общего случая, а затем лишь говорится, что все, что требуется в задании, можно получить, положив $m=2$.

При записи алгоритма и построении структурной схемы демодулятора надо помнить о том, что они существенно разные при когерентном и некогерентном приеме, а также при приеме сигналов ОФМ по сравнению с другими видами модуляции.

При расчете вероятностей ошибок следует использовать приведенные в учебниках известные формулы, выражающие указанную вероятность при заданном виде модуляции и способе приема через отношение сигнал шум $h^2 = E_{sl}/N_0$ – отношение энергии активного элемента принятого сигнала к спектральной плотности шума. Эту энергию легко найти по известной мощности P_{sl} элемента сигнала и его длительности T .

Формулы вероятностей ошибок при когерентном приеме содержат функцию Крампса

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-t^2/2) dt$$

или связанную ней вспомогательную функцию

$$Q(x) = 0.5 [1 - \Phi(x)]$$

Краткую таблицу функции $\Phi(x)$ можно найти в [7]. В справочнике [6] приведена таблица «интегральной функции гауссовского закона»

$$\Phi_0(x) = 0,5 \Phi(x)$$

Для случая некогерентного приема расчет вероятностей ошибок не во всех учебных пособиях освещен достаточно подробно, поэтому ниже приведены формулы, которые при этом следует использовать

$$P_{AM} = 0,5 \exp(-h^2/4); \quad P_{ЧМ} = 0,5 \exp(-h^2/2); \quad P_{ОФМ} = 0,5 \exp(-h^2).$$

Изменение энергии сигналов при одном виде модуляции по сравнению с другим при фиксированном значении вероятности ошибки p , выражающее **энергетический выигрыш** (или проигрыш) одной системы модуляции по отношению к другой, можно определить, приравняв соответствующие выражения вероятностей ошибок и решив полученное уравнение. Для случая когерентного приема ОФМ при этом получается трансцендентное уравнение, которое следует решать приближенными, численными методами или графически. В остальных случаях таких проблем не возникает.

8. Декодер

Перед выполнением этого пункта следует ознакомиться с общими принципами помехоустойчивого кодирования и принципами построения линейных кодов с проверкой на четность: см. [2], п.5.3, 5.4; [3], п.5.1, 5.2; [4], п.4.2; [5], п.5.1, 5.2. Минимально необходимые сведения можно найти в [7], работа № 8. Для углубленного изучения теории кодирования на современном научном уровне рекомендуется [1], глава 7.

Под «**обнаруживающей**» или «**исправляющей**» способностью кода понимают максимальную кратность ошибок (т.е. число ошибочно принятых разрядов кодовой комбинации) q_0 или $q_{и}$, которые, соответственно, позволяет обнаруживать или исправлять заданный код. Как доказывается в теории кодирования, эти величины определяются параметром кода d_{\min} – минимальным расстоянием по Хеммингу между его разрешенными комбинациями. Последнее, в свою очередь, можно найти как минимальный вес (минимальное число единиц) по всем разрешенным кодовым комбинациям, кроме «нулевой», состоящей только из символов «0» (см. [5], с.217).

Таким образом, определив d_{\min} для заданного кода с одной проверкой на четность, нетрудно по известной формуле найти для него кратность обнаруживаемых ошибок q_0 . Однако этим расчет q_0 не заканчивается. Найденную по формуле обнаруживающую способность гарантированно имеет любой код с таким d_{\min} , а не только код с проверкой на четность. Используя особенности данного конкретного кода, можно обнаруживать ошибки и большей кратности. Следует указать в работе, какие еще ошибки и почему обнаруживает код с одной проверкой на четность.

Алгоритм обнаружения ошибок, который требуется указать в задании – это перечень конкретных операций над разрядами принятой кодовой комбинации, в результате которых устанавливается, что есть ошибка или ошибок (обнаруживаемых таким кодом) нет. При выполнении этого пункта не следует подменять описание конкретного алгоритма обнаружения ошибок изложением общего принципа построения данного кода.

Вероятность необнаруженной ошибки $P_{\text{но}}$ определяется как вероятность появления ошибки любой кратности q , не обнаруживаемой данным кодом. В силу теоремы «о повторении опытов» теории вероятностей для $P_{\text{но}}$ справедлива биномиальная формула (см. (5.16) в [2] и аналогичные формулы в других пособиях), которую и следует использовать при расчете. Эту формулу надо взять за основу, но из значений q , по которым осуществляется суммирование, выбрать только такие, которые выражают кратности ошибок, не обнаруживаемых заданным кодом (см. выше).

9. Фильтр-восстановитель

Выполнение этого пункта требует знания основ теории дискретизации функций непрерывного аргумента ([1], п.2.4; [2], п.2.7; [3], п.2.5; [4], п.1.3; [5], п.1.9.

Непрерывный сигнал может быть восстановлен по своим отсчетам с помощью идеального ФНЧ, частота среза которого F_c определяется выбранным интервалом дискретизации Δt в соответствии с теоремой Котельникова.

При изображении частотных характеристик такого фильтра следует обратить особое внимание на его фазовую характеристику: идеальность ФНЧ не означает, что его ФЧХ обязательно равна нулю. Правильный вид ФЧХ указан, например, в [1], п.2.4.

Его необходимо принимать во внимание также при расчете и изображении импульсной характеристики.

Условие физической реализуемости найденной импульсной характеристики определяется фундаментальным физическим принципом причинности: реакция цепи не может предшествовать воздействию. С учетом этого принципа следует выбрать вид импульсной характеристики и указать его связь с коэффициентом наклона ФЧХ. Аналогичные условия физической реализуемости предъявляются и к другим электрическим цепям, в частности, согласованным фильтрам (см., например, [2], стр.175).

Литература

1. Теория электрической связи // А.Г.Зюко, Д.Д.Кловский, В.И.Коржик, М.В.Назаров. Под ред. Д.Д.Кловского . – М.: Радио и связь, 1998.
2. Кловский Д.Д., Шилкин В.А. Теория электрической связи. - Сб. задач и упражнений. – М.: Радио и связь, 1990.
3. Кловский Д.Д., Шилкин В.А. Теория передачи сигналов в задачах.– М.: Связь, 1978.
4. Теория передачи сигналов // А.Г.Зюко, Д.Д.Кловский, М.В.Назаров, Л.М.Финк . – М.: Радио и связь, 1986.
5. Кловский Д.Д. “Теория передачи сигналов”.– М.: Связь, 1973.
6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1980.
7. Методические разработки к лабораторным работам по 2 части курса «Теория электрической связи». Раздел 1// Составители: Николаев Б.И., Широков С.М. и др.– Самара, ПИИРС, 1997.

Корректор Вяткина С.С.

Подписано в печать 10.09.89. Формат 60x84/16.

Оперативная печать. Уч.из.л.--284. Усл.п.л. 1,15 л.

Тираж 500 экз. Цена договорная.

Ротапринт ПГАТИ