

Смирнов Г.И., Кушнир В.Ф. Теория электрической связи: Методические указания к курсовой работе (спец. 200900, 201000, 201100) / СПб ГУТ. - СПб, 1999.

Ч.к. 2420

Предназначены для организации и проведения курсовой работы по дисциплине ТЭС. В процессе выполнения работы студенты знакомятся с основными этапами расчета дискретной системы связи, предназначенной для передачи непрерывных сообщений.

Ответственный редактор В.Ф. Кушнир

Вместе с И.И. Кушнир

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ  
обозначенного здесь срока

ммунивший

т 29.04.97

## ЗАДАНИЕ

Рассчитать основные характеристики системы передачи информации, структурная схема которой дана на рис. 1.

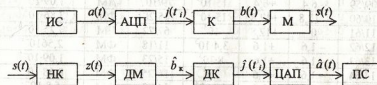


Рис. 1. Структурная схема системы передачи:

ИС - источник непрерывного сообщения  $a(t)$ ;

АЦП - аналого-цифровой преобразователь, преобразует сообщение в отсчеты  $a(t_i)$ , квантованные уровни  $a_j(t_i)$  и в соответствующие им числа  $f(t_i)$  - номера уровней;

К - кодер, выполняет кодирование и образует модулирующий сигнал  $b(t)$ ;

М - модулятор, создает высокочастотный аналоговый сигнал  $s(t)$ ;

НК - непрерывный канал, на выходе которого образуется аддитивная смесь  $z(t)$  сигнала с помехой;

ДМ - демодулятор, восстанавливает передаваемые кодовые символы  $\delta_k$ ;

ДК - декодер, восстанавливает номера передаваемых уровней  $f(t_i)$ ;

ЦАП - цифроаналоговый преобразователь, восстанавливает квантованные уровни  $\hat{a}_j(t_i)$  и непрерывное сообщение  $\hat{a}(t)$ ;

ПС - получатель сообщения.

Номер выполняемого варианта определяется двумя последними цифрами в номере зачетной книжки студента. Задания приведены в соответствующих разделах, исходные данные - в таблице.

№ варианта	Уровень $a_{\min}$ , В	Уровень $a_{\max}$ , В	Верхняя частота $f_v$ , Гц	№ уровня $j$	Вид модуляции	Энергетический спектр помехи $N_0$ , В <sup>2</sup> /Гц	Способ приема
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	$6 \cdot 10^5$	29/1	ЧМ	$7,24 \cdot 10^{-10}$	1/2
04/54	0	+6,4	$6 \cdot 10^5$	55/62	ФМ	$1,24 \cdot 10^{-9}$	1
05/55	0	+12,8	$6 \cdot 10^5$	68/75	ОФМ	$1,09 \cdot 10^{-9}$	1/2
06/56	0	+25,6	$6 \cdot 10^5$	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
16/66	-1,6	+1,6	$3,4 \cdot 10^3$	5/19	АМ	$6,4 \cdot 10^{-7}$	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	$3,4 \cdot 10^3$	123/196	ОФМ	$1,7 \cdot 10^{-6}$	1/2
20/70	0	+3,2	$10^3$	28/2	АМ	$2,18 \cdot 10^{-6}$	1/2
21/71	0	+6,4	$10^3$	54/59	ЧМ	$3,73 \cdot 10^{-6}$	1/2
22/72	0	+12,8	$10^3$	69/74	ФМ	$6,52 \cdot 10^{-6}$	1
23/73	0	+25,6	$10^3$	124/197	ОФМ	$5,8 \cdot 10^{-6}$	1/2
24/74	-1,6	+1,6	$8 \cdot 10^3$	8/20	АМ	$2,72 \cdot 10^{-7}$	2/1
25/75	-3,2	+3,2	$8 \cdot 10^3$	35/60	ЧМ	$4,65 \cdot 10^{-7}$	2/1
26/76	-6,4	+6,4	$8 \cdot 10^3$	77/105	ФМ	$8,15 \cdot 10^{-7}$	1
27/77	-12,8	+12,8	$8 \cdot 10^3$	125/198	ОФМ	$7,24 \cdot 10^{-7}$	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	$6 \cdot 10^5$	3/17	ФМ	$1,45 \cdot 10^{-9}$	1
33/63	0	+6,4	$10^4$	56/46	ФМ	$7,45 \cdot 10^{-6}$	1
34/84	0	+6,4	$6 \cdot 10^5$	57/47	ОФМ	$1,24 \cdot 10^{-9}$	2/1
35/85	0	+12,8	$10^3$	66/71	ОФМ	$6,51 \cdot 10^{-6}$	1/2
36/86	0	+12,8	$6 \cdot 10^5$	65/73	АМ	$2,72 \cdot 10^{-10}$	2/1

№ варианта	Уровень $a_{\min}$ , В	Уровень $a_{\max}$ , В	Верхняя частота $f_v$ , Гц	№ уровня $j$	Вид модуляции	Энергетический спектр помехи $N_0$ , В <sup>2</sup> /Гц	Способ приема
37/87	0	+25,6	$10^3$	162/191	АМ	$1,45 \cdot 10^{-6}$	1/2
38/88	0	+25,6	$6 \cdot 10^5$	121/195	ЧМ	$4,82 \cdot 10^{-10}$	2/1
39/89	0	+12,8	$10^3$	64/71	АМ	$1,63 \cdot 10^{-6}$	1/2
40/90	-3,2	+3,2	$3,4 \cdot 10^3$	13/24	АМ	$5,49 \cdot 10^{-7}$	1/2
41/91	-3,2	+3,2	$8 \cdot 10^3$	41/49	АМ	$2,33 \cdot 10^{-7}$	2/1
42/92	-3,2	+3,2	$10^4$	50/45	АМ	$1,87 \cdot 10^{-7}$	1/2
43/93	-3,2	+3,2	$15 \cdot 10^3$	53/42	АМ	$1,24 \cdot 10^{-7}$	2/1
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	$8 \cdot 10^3$	84/85	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
48/96	-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	$3,62 \cdot 10^{-7}$	1/2

### ИСТОЧНИК СООБЩЕНИЯ

Источник создает непрерывное сообщение  $a(t)$  - случайный квазипериодический процесс, мощность которого сосредоточена в области нижних частот, в полосе от 0 до верхней частоты  $f_v$ . Мгновенные значения сообщения равномерно распределены в интервале от  $a_{\min}$  до  $a_{\max}$ .

Требуется:

1. Записать функцию распределения  $F_a(x)$  мгновенных значений сообщения  $a(t)$ , плотность распределения  $w_a(x)$  и построить их графические изображения.
2. Рассчитать математическое ожидание  $M\{a(t)\}$  и дисперсию  $D\{a(t)\}$  сообщения.
3. Рассчитать постоянную составляющую  $\bar{a}(t)$  и мощность  $P_a$  переменной составляющей сообщения. Начертить график для спектральной плотности средней мощности сообщения - энергетический спектр  $G_a(f)$ .
4. Рассчитать дифференциальную энтропию  $h(A)$  сообщения.

### АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Передача получателю непрерывного сообщения осуществляется с использованием дискретной системы связи. В процессе подготовки к передаче сообщение подвергается преобразованию в цифровую форму, в поток двоичных символов: нулей и единиц. Преобразование выполняет аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в три этапа. На первом этапе производится

дискретизация сообщения с постоянным шагом  $\Delta t$ , т.е. получение непрерывных отсчетов  $a(t_i)$ . На втором этапе выполняется квантование отсчетов с постоянным шагом  $\Delta a = 0,1$  В. На третьем этапе каждому полученному уровню квантования  $a_j(t_i)$  сопоставляется его номер  $j$  - число, записанное в двоичной системе счисления, двоичная цифровая последовательность информационных символов.

Требуется:

1. Рассчитать интервал дискретизации  $\Delta t$  для получения непрерывных отсчетов  $a(t_i)$  сообщения  $a(t)$ ,  $t_i = i \Delta t$ ,  $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$
2. Определить число уровней квантования  $L$ , нужных для замены любого непрерывного отсчета  $a(t_i)$  квантованным отсчетом  $a_j(t_i)$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots, L-1$ , и далее соответствующим номером уровня квантования  $j(t_i)$ . Считать, что при квантовании все значения сообщения из любого промежутка  $a_j \leq a < a_{j+1}$  заменяются нижним уровнем  $a_j$  того же промежутка.
3. Рассчитать мощность шума квантования  $P_{\text{шк}}$  и ее относительную величину при сравнении с мощностью переменной составляющей непрерывного сообщения.
4. Найти минимальное число  $k$  двоичных разрядов, требуемое для записи в виде двоичного числа любого номера из  $L$  номеров уровней квантования.
5. Записать  $k$ -разрядное двоичное число, соответствующее заданному номеру  $j$  уровня квантования  $a_j$ . В случае необходимости заполнить старшие разряды числа нулями.
6. Начертить временную диаграмму отклика АЦП на уровень с заданным номером  $j$  в виде последовательности биполярных импульсов, сопоставляя нулевым символам прямоугольные импульсы положительной полярности, а единичным - отрицательной. Амплитуда импульсов равна единице. Над импульсами надписать значения соответствующих символов.
7. Рассматривая АЦП как источник дискретных сообщений с объемом алфавита  $L$ , определить его энтропию  $H$  и производительность  $H'$  при условии, что все отсчеты непрерывного сообщения взаимонезависимы.

## КОДЕР

Кодер выполняет систематическое кодирование с одной проверкой на четность, образуя код  $(n, k)$ . При этом символы двоичного числа, образованного номером уровня, становятся информационными символами кодового слова.

На выходе кодера последовательность кодовых символов  $b_k$  каждого  $n$ -разрядного кодового слова  $b$  преобразуется в импульсную последовательность  $b(t)$  по правилу, приведенному в п. 6 предыдущего раздела. Длительность импульсной последовательности, соответствующей каждому кодовому слову, одинакова и равна  $\Delta t$ . Сигнал  $b(t)$  на выходе кодера представляет собой случайный синхронный телеграфный сигнал.

Требуется:

1. Сформулировать правило кодирования при использовании систематического кода с одной проверкой на четность и определить  $n$ .
2. Рассчитать избыточность кода.
3. Записать двоичное кодовое слово, которое будет образовано в результате кодирования  $k$ -разрядного двоичного числа  $j$ , полученного в п. 5 предыдущего раздела. Указать информационные и проверочные символы, начертить соответствующую импульсную последовательность  $b(t)$ .
4. Определить длительность интервала  $T$ , отводимого на передачу каждого символа кодового слова, и количество символов, производимых кодером в единицу времени, т.е. скорость следования кодовых символов  $V_k$ .

## МОДУЛЯТОР

В модуляторе случайный синхронный телеграфный сигнал производит модуляцию гармонического несущего колебания  $u(t)$ , где

$$u(t) = U_c \cos 2\pi f_c t, \quad U_c = 1 \text{ В}, \quad f_c = 100 \text{ Вк}.$$

Согласно заданию выбирается один из четырех видов дискретной модуляции: амплитудная (АМ), частотная (ЧМ), фазовая (ФМ), относительная фазовая (ОФМ).

Требуется:

1. Привести выражение и график функции корреляции  $B_b(\tau)$  модулирующего сигнала  $b(t)$ .
- ★ 2. Привести выражение и график спектральной плотности средней мощности  $G_b(f)$  модулирующего сигнала.
3. Ограничить сверху ширину спектра модулирующего сигнала частотой  $F_b$ . Искajениями, возникающими при этом во временной области, пренебречь. Верхнюю частоту выбрать по формуле  $F_b = \alpha V_k$ . Если номер зачетки оканчивается цифрами 1, 5, 7, то  $\alpha = 1$ ; если цифрами 0, 2, 4, 8, то  $\alpha = 2$ ; иначе  $\alpha = 3$ .

На графике спектральной плотности указать полосу частот модулирующего сигнала. Сравнить верхние частоты сообщения  $f_b$  и модулирующего сигнала  $F_b$ .

Привести формулу для расчета мощности модулирующего сигнала после ограничения спектра.

4. Дать аналитическое выражение для сигнала  $s(t)$  с дискретной модуляцией.
5. Изобразить временные диаграммы, демонстрирующие зависимость сигнала  $s(t)$  от сигнала  $b(t)$  при передаче уровня с номером  $j$ . Указать над элементами сигнала значения соответствующих символов  $b_k$ .
- 6. Привести выражение и построить график спектральной плотности средней мощности  $G_s(f)$  модулированного сигнала  $s(t)$ .
- 7. Определить и показать на спектральной диаграмме  $G_s(f)$  ширину спектра  $F_c$  модулированного сигнала.



## НЕПРЕРЫВНЫЙ КАНАЛ

Передача сигнала  $s(t)$  происходит по непрерывному неискажающему каналу с постоянными параметрами в присутствии аддитивной помехи  $n(t)$ . Сигнал на выходе такого канала имеет вид

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

где  $\mu$  - коэффициент передачи канала. Для всех вариантов  $\mu = 1$ .

Помехой является гауссовский шум, у которого спектральная плотность средней мощности постоянна и равна  $N_0$  в полосе частот канала  $F_k$ .

Требуется:

1. Определить минимально необходимую ширину полосы частот непрерывного канала  $F_k$ .
2. Определить мощность  $P_n$  помехи  $n(t)$  на выходе канала.
3. Найти отношение  $P_c / P_n$ , где  $P_c$  - мощность сигнала  $s(t)$ .
4. Рассчитать пропускную способность непрерывного канала в единицу времени  $C'$ .
5. Оценить эффективность использования пропускной способности непрерывного канала.

## ДЕМОДУЛЯТОР

Демодулятор, оптимальный по критерию максимального правдоподобия в канале с аддитивной белой гауссовской помехой, осуществляет когерентную или некогерентную (в зависимости от варианта задания) обработку наблюдаемой смеси

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

и принимает решение о значении  $\hat{b}_k$ , полученного кодового символа.

Выход демодулятора одновременно представляет собой выход дискретного канала.

Требуется:

1. Записать правило работы решающей схемы демодулятора, оптимального по критерию максимального правдоподобия.
2. Записать алгоритм работы и начертить структурную схему оптимального демодулятора для конкретно заданного вида модуляции и способа приема.
3. Вычислить вероятность ошибки  $p$  оптимального демодулятора.
4. Определить, как нужно изменить энергию сигнала, чтобы при других видах модуляции и заданном способе приема сохранить вероятность ошибки  $p$ , найденную в п. 3.
5. Считать выход демодулятора выходом двучленного симметричного канала связи, определить его пропускную способность.

## ДЕКОДЕР

Декодер кода  $(n, k)$  анализирует принимаемые последовательности символов длины  $n$  и либо преобразует их в последовательности информационных символов длины  $k$ , либо отказывается от декодирования до исправления ошибки. Как и в кодере, работа выполняется в два этапа. На первом этапе производится обнаружение ошибок. Если в принятой последовательности ошибки не обнаружены, то на втором этапе из нее выделяются  $k$  информационных символов - двоичное число, которое передается в цифроаналоговый преобразователь. Если ошибка обнаружена, возможно исправление наименее надежного символа. Степень надежности определяется в демодуляторе, сообщение о ней поступает в декодер.

Требуется:

1. Оценить обнаруживающую  $q_0$  и исправляющую  $q_k$  способность использованного в работе кода  $(n, k)$ .
2. Дать описание алгоритма обнаружения ошибок.
3. Определить вероятность необнаруженной ошибки (необязательно).
4. Описать метод определения на выходе демодулятора наименее надежного символа в составе принятой  $k$ -разрядной двоичной последовательности (необязательно).

## ЦИФРОАНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

В цифроаналоговый преобразователь с декодера поступает  $k$ -разрядное двоичное число, восстановленный номер переданного уровня  $j$ . На первом этапе это число преобразуется в короткий импульс. Амплитуда импульса пропорциональна номеру  $j$  или восстановленному значению квантованного отсчета  $\hat{a}_j(t_i)$ . Далее последовательность модулированных по амплитуде импульсов поступает на фильтр-восстановитель, который окончательно вырабатывает из этой последовательности восстановленное сообщение  $\hat{a}(t)$ .

Требуется:

1. Записать выражение для амплитуды восстановленного квантованного отсчета  $\hat{a}_j$ , соответствующего уровню с принятым номером  $j$ .
2. Указать класс фильтра-восстановителя и граничную частоту  $f_p$  его полосы пропускания. Привести формулы и графические изображения частотной и импульсной характеристики фильтра выбранного класса.
3. Привести соотношение, устанавливающее связь между полученными отсчетами  $\hat{a}_j(t_i)$  и восстановленным сообщением  $\hat{a}(t)$ . Проиллюстрировать восстановление графически по пяти ненулевым отсчетам, из которых средним является  $\hat{a}_j(t_0)$  при безошибочном приеме заданного номера  $j$ .

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

- Работа выполняется по форме, указанной преподавателем, либо в ученической тетради в клетку. На каждой странице оставляется поле для замечаний рецензента. В верхней части поля проставляется номер страницы.
- В начале составляется раздел с названием "Исходные данные для расчета", куда вписываются полные названия заданных величин, обозначения, числовые значения и их размерности.
- Приводится структурная схема системы передачи сообщений с кратким описанием назначения каждого элемента схемы.
- Все расчеты должны сопровождаться необходимыми пояснениями. Вначале формулы записываются в общем виде с указанием использованного источника (конспект лекций, литература). Затем также в общем виде производятся подстановки и упрощения. Лишь в итоговом соотношении символы заменяются числовыми значениями. Выполняется счет и указывается размерность полученных численных результатов.
- Весь графический материал размещается по мере выполнения задания. Простой - чертится непосредственно на тетрадном листе, сложный, выполненный отдельно, - вклеивается. На координатных осях указываются масштаб, переменные и их размерность.
- В конце нужно дать список использованной литературы.

## УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ

### ИСТОЧНИК СООБЩЕНИЯ

1. Для отыскания плотности  $w_a(x)$  распределения сообщения нужно учесть, что все мгновенные значения сообщения равновероятны в интервале

$$\Delta = a_{\max} - a_{\min}.$$

Внутри интервала плотность определяется из условий нормировки, вне его равна нулю.

Распределение связано со своей плотностью интегральным соотношением

$$F_a(x) = \int_{-\infty}^x w_a(x) dx.$$

2. Числовые характеристики случайных процессов. Дисперсию сообщения нужно выразить через величину интервала  $\Delta$ .
3. Все энергетические расчеты в работе выполняются на единичном сопротивлении. Для расчета постоянной составляющей и мощности сообщения используйте эргодическое свойство. Для представления спектральной плотности постоянной составляющей используйте дельта-функцию.
4. Информация в непрерывных каналах и сообщениях.

## АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

1. Теорема Котельникова.
2. Число уровней квантования  $L = \Delta / \Delta a$ .
3. Шум квантования

$$n_k(t_i) = a_j(t_i) - a(t_i)$$

имеет равномерное распределение в любом из  $L$  интервалов  $\Delta a$ . Для расчета средней мощности шума квантования нужно использовать эргодическое свойство. Отношение мощности шума квантования к мощности сообщения следует выразить в децибелах.

4. Кодирование источников. Число двоичных разрядов определяется как минимальное значение, удовлетворяющее неравенству  $k \geq \log_2 L$ .

5. Рассмотрим в качестве примера заданный в десятичной системе числения номер  $j = 21$  при  $k = 8$ . Поскольку  $[j]_{10} = 21$  и

$$21 = 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0,$$

то двоичная запись этого же номера в 8-ми разрядах  $[j]_2 = 00010101$ .

Уровень квантования с номером  $j$  определяется следующим соотношением

$$a_j = a_{\min} + j \cdot \Delta a.$$

6. Временная диаграмма отклика АЦП  $b_{\text{АП}}(t)$  имеет вид последовательности биполярных импульсов. Если продолжить пример из предыдущего пункта, то последовательность будет составлена из расположенных друг за другом прямоугольных импульсов следующих полярностей: +++-+-+-. Длительность отклика АЦП на каждый отсчет не должна превышать интервала дискретизации.

7. Информация в дискретных сообщениях. Прежде чем вычислять энтропию  $H$ , доказать, что у рассматриваемого сообщения все  $L$  уровней квантования равновероятны. При расчете производительности  $H'$  принять во внимание временной интервал между отсчетами.

### КОДЕР

1. Помехоустойчивое (канальное) кодирование.
2. Теория кодирования.
3. Продолжая пример из п. 5 предыдущего раздела и рассматривая символы 00010101 как информационные, образуем кодовое слово - вектор  $b$ :

$$b = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9); \quad b_9 = b_1 \oplus b_2 \oplus b_3 \oplus b_4 \oplus b_5 \oplus b_6 \oplus b_7 \oplus b_8 = 1,$$

где с помощью символа  $\oplus$  обозначено сложение по mod 2.

На временной диаграмме модулирующего сигнала  $b(t)$ , над импульсами, следует надписать соответствующие значения двоичных символов  $b_k$ , а

принадлежность к информационным или к проверочным символам указать снизу.

4. В работе  $l$  импульсов занимают весь интервал дискретизации.

## МОДУЛЯТОР

1. Функция корреляции случайных стационарных процессов. Вывод выражения для функции корреляции  $B_b(\tau)$  случайного синхронного телеграфного сигнала дан в качестве примера в рекомендованной литературе.

2. Спектральная плотность средней мощности (энергетический спектр) стационарных процессов. Для получения спектральной плотности  $G_b(f)$  следует использовать теорему Винера – Хинчина, которая устанавливает связь между энергетическим спектром  $G_b(f)$  и корреляционной функцией  $B_b(\tau)$  случайного процесса.

3. Ограничение спектра модулирующего сигнала выполняется с целью получения модулированного сигнала с ограниченным спектром. В дальнейшем пренебречь искажениями временных зависимостей как  $b(t)$ , так и  $s(t)$ , неизбежно возникающими при ограничении спектра.

4. При составлении выражения для сигнала  $s(t)$  с заданным видом модуляции нужно записать его как функцию модулирующего сигнала  $b(t)$  и несущего колебания  $U_c \cos 2\pi f_c t$  с единичной амплитудой,  $U_c = 1$ . Нужно учитывать, что в случае амплитудной, частотной и фазовой модуляции на каждом интервале

$$s(t) = \begin{cases} s_0(t) & \text{при передаче символа 0,} \\ s_1(t) & \text{при передаче символа 1,} \end{cases}$$

где  $s_0(t)$  и  $s_1(t)$  - радиоимпульсы длительностью  $T$ .

Таким образом,

- для сигнала  $s_{AM}(t)$ :  $s_0(t) = 0$ ,  $s_1(t) = U_c \cos 2\pi f_c t$ ,
- для сигнала  $s_{ЧМ}(t)$ :  $s_0(t) = U_c \cos 2\pi(f_c - \Delta f)t$ ,  $s_1(t) = U_c \cos 2\pi(f_c + \Delta f)t$ ,
- для сигнала  $s_{ФМ}(t)$ :  $s_0(t) = U_c \cos 2\pi f_c t$ ,  $s_1(t) = -U_c \cos 2\pi f_c t$ .

При составлении выражения для сигнала с относительной фазовой модуляцией следует использовать формулу для сигнала  $s_{ФМ}(t)$ , заменяя  $b(t)$  на новый модулирующий сигнал  $c(t)$ . Символы  $c_i$ , соответствующие сигналу  $c(t)$ , образуются из символов кодового слова

$$b = (b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n),$$

с помощью перекодирования:

$$c_i = b_i \oplus c_{i-1}.$$

В процессе передачи опорным символом  $c_0$  служит последний символ предыдущего кодового слова, в начале - произвольный.

5. Временные диаграммы сигналов  $b(t)$ , при необходимости  $c(t)$ , и  $s(t)$  изобразить друг под другом с соблюдением масштабов. Над импульсами указать соответствующие значения символов.

6. Спектры случайных процессов. Для решения необходимо знать, как записывается с помощью дельта-функций спектр несущего колебания  $U_c \cos 2\pi f_c t$ , а также как образуется спектр произведения при перемножении низкочастотных сигналов  $b(t)$  или  $c(t)$  с несущим колебанием.

Энергетический спектр  $G_{AM}(f)$  сигнала  $s_{AM}(t)$  будет содержать несущую с частотой  $f_c$  (дельта-функции на частотах  $-f_c$  и  $+f_c$ ), а также две симметричные боковые полосы, форма которых повторяет форму спектра модулирующего сигнала  $b(t)$  с учетом ограничения ширины спектра частотой  $F_b$ .

Энергетические спектры  $G_{ФМ}(f)$  и  $G_{ЧМ}(f)$  отличаются от энергетического спектра сигнала  $s_{AM}(t)$  отсутствием несущего колебания.

Поскольку  $s_{ЧМ}(t)$  можно представить как сумму двух модулированных в противофазе сигналов с амплитудной модуляцией, имеющих разные несущие частоты  $f_c - \Delta f$  и  $f_c + \Delta f$ , то и спектр сигнала с частотной модуляцией есть сумма двух спектров сигналов с амплитудной модуляцией. Девiation частоты следует выбрать из условия ортогональности в усиленном смысле сигналов  $s_0(t)$  и  $s_1(t)$ . Доказать, что для этого должно выполняться равенство  $\Delta f = k/T$ , где  $k$  - натуральное число.

Помимо формы должны быть рассчитаны и указаны на графиках числовые характеристики спектра сигнала.

7. Ширина спектра  $F_s$  сигнала с амплитудной, фазовой или относительно фазовой модуляцией в два раза превосходит ширину спектра модулирующего сигнала. При частотной модуляции ширина спектра, кроме того, определяется и девиацией частоты  $\Delta f$ .

## НЕПРЕРЫВНЫЙ КАНАЛ

1. При выборе ширины полосы непрерывного канала  $F_k$  необходимо учитывать, что любое расширение полосы пропускания увеличивает мощность помехи, а при  $F_k < F_c$  не только искажается форма сигнала, чем пренебрегается при выполнении данной работы, но и уменьшается энергия сигнала на выходе канала.

2. Для определения средней мощности помехи  $P_n$  при выбранной полосе канала связи  $F_k$  нужно использовать спектральную плотность средней мощности помехи  $N_0$ .

3. Для определения отношения сигнала к шуму помимо средней мощности помехи нужно знать среднюю мощность сигнала  $P_c$ . Для каждого рассматриваемого вида модуляции передаваемые символы равновероятны:

$p(0) = p(1)$ , равновероятны и радиоимпульсы  $s_0(t)$  и  $s_1(t)$ . В результате средняя мощность любого из модулированных сигналов имеет вид

$$P_c = \frac{1}{T} (p(0)E_0 + p(1)E_1) = \frac{1}{2T} (E_0 + E_1),$$

где  $E_0$  и  $E_1$  - энергии радиоимпульсов:

$$E_i = \int_0^T s_i^2(t) dt, \quad i = 0, 1.$$

Отметим еще раз, что все энергетические расчеты выполняются на единичном сопротивлении.

4. Информация в непрерывных каналах.

5. Для оценки эффективности использования пропускной способности канала связи применяют коэффициент, равный отношению производительности источника к пропускной способности канала связи:  $k_{\text{эфф}} = H'/C$ .

## ДЕМОДУЛЯТОР

1. Критерии качества и правила приема дискретных сообщений.

2. В общем виде алгоритм работы когерентного демодулятора двоичных сигналов в канале с аддитивной белой гауссовской помехой, оптимального по критерию максимального правдоподобия, определяется следующим соотношением

$$\int_0^T z(t) s_0(t) dt - \frac{1}{2} E_0 \stackrel{0}{\approx} \int_0^T z(t) s_1(t) dt - \frac{1}{2} E_1,$$

где двоичными символами, проставленными около неравенства, указаны решения о значениях кодовых символов  $b_k$ , принимаемые демодулятором после обработки наблюдаемой смеси сигнала с помехой. Если левая часть неравенства больше правой части, принимается решение о передаче символа 0, иначе - о передаче символа 1.

Этот алгоритм должен быть конкретизирован путем подстановки выражений для радиоимпульсов  $s_0(t)$  и  $s_1(t)$  в соответствии с заданным видом модуляции и при возможности упрощен. После этого следует изобразить полученную функциональную схему демодулятора.

При относительной фазовой модуляции функциональная схема приема символов  $\epsilon_i$  должна быть дополнена функциональной схемой перекодирующего устройства для получения символов  $\delta_i$  восстановленного кодового слова. См. методические указания к разделу о модуляции, п. 4, с. 10.

В общем виде алгоритм работы некогерентного демодулятора двоичных сигналов в канале с аддитивной белой гауссовской помехой, оптимального по

критерию максимального правдоподобия, определяется следующим соотношением:

$$\ln I_0 \left( 2 \frac{V_i}{N_0} \right) - \frac{E_0}{N_0} \stackrel{0}{\approx} \ln I_0 \left( 2 \frac{V_i}{N_0} \right) - \frac{E_1}{N_0}.$$

Здесь  $I_0(x)$  - модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка,  $N_0$  - энергетический спектр помехи, а  $E$  и  $V_i$ ,  $i = 0, 1$ , - энергия сигнала и отсчет огибающей в момент  $T$  на выходе фильтра, согласованного с сигналом  $s_i(t)$ :

$$V_i = \sqrt{\left( \int_0^T z(t) s_i(t) dt \right)^2 + \left( \int_0^T z(t) \bar{s}_i(t) dt \right)^2},$$

$\bar{s}_i(t)$  - сигнал, сопряженный по Гильберту. Данный алгоритм также должен быть конкретизирован и при возможности упрощен.

При относительной фазовой модуляции нужно использовать алгоритм обработки двоичных сигналов с равной энергией, ортогональных в усилителем смысле на интервале удвоенной длительности, т.е.  $2T$ .

Функциональная схема оптимального демодулятора может быть построена с использованием как активных, так и согласованных фильтров.

3. Вероятность ошибки  $p$  оптимального когерентного демодулятора сигналов с амплитудной, частотной, фазовой модуляцией в канале с белым гауссовским шумом определяется  $Q$ -функцией:

$$p = Q(x),$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy, \quad x = \sqrt{\frac{\int_0^T [s_1(t) - s_0(t)]^2 dt}{2N_0}}.$$

Значения  $Q$ -функции даны в приложении.

Для сигналов с относительной фазовой модуляцией демодулятор ФМ сигналов дополняется перекодирующим устройством. Пояснить, почему при этом вероятность ошибки для ОФМ сигналов должна рассчитываться с помощью соотношения

$$p_{\text{офм}} \approx 2 p_{\text{фм}},$$

где  $p_{\text{фм}}$  - вероятность ошибки при фазовой модуляции.

Для расчета вероятности ошибки  $p$  оптимального некогерентного демодулятора в канале с аддитивной белой гауссовской помехой используются следующие расчетные соотношения:



- при амплитудной модуляции

$$p \approx \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{h^2}{4}\right).$$

- при частотной модуляции

$$p = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{h^2}{2}\right).$$

- при относительной фазовой модуляции

$$p = \frac{1}{2} \exp(-h^2).$$

Здесь энергетический параметр

$$h^2 = E_c / N_0, \quad E_c = \int_0^T s^2(t) dt.$$

4. Помехоустойчивость когерентного и некогерентного приема.

5. Пропускная способность дискретных каналов связи с помехами. Использовать найденную вероятность ошибки  $p = p(0|1) = p(1|0)$ .

### ДЕКОДЕР

1. Коды с гарантированным обнаружением и исправлением ошибок. Обнаруживающая и исправляющая способность кода определяется его минимальным кодовым расстоянием  $d_{\min}$  по Хэммингу. Для определения  $d_{\min}$  необходимо воспользоваться правилом определения минимального кодового расстояния линейных кодов, к которым принадлежат систематические коды.

2. Кратко описать работу декодера с учетом найденной величины обнаруживающей способности кода.

3. Принять во внимание все возможные кратности не обнаруживаемых ошибок и их вероятности.

### ЦИФРОАНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

1. В разделе указаний по АЦП см. п. 5, с. 9.
2. Используйте теорему Котельникова.
3. Используйте теорему Котельникова.

ТАБЛИЦА ЗНАЧЕНИЙ ФУНКЦИИ  $Q(x)$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy.$$

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,50000	49601	49202	48803	48405	48006	47608	47210	46812	46414
0,1	0,46017	45620	45224	44828	44433	44038	43644	43251	42858	42465
0,2	0,42074	41683	41294	40905	40517	40129	39743	39358	38974	38591
0,3	0,38209	37828	37448	37070	36693	36317	35942	35569	35197	34827
0,4	0,34458	34090	33724	33360	32997	32636	32276	31918	31561	31207
0,5	0,30854	30503	30153	29806	29460	29116	28774	28434	28096	27760
0,6	0,27425	27093	26763	26435	26109	25785	25463	25143	24825	24510
0,7	0,24196	23885	23576	23270	22965	22663	22363	22065	21770	21476
0,8	0,21186	20897	20611	20327	20045	19766	19489	19215	18943	18673
0,9	0,18406	18141	17879	17619	17361	17106	16853	16602	16354	16109
1,0	0,15866	15625	15386	15150	14917	14686	14457	14231	14007	13786
1,1	0,13567	13350	13136	12924	12714	12507	12302	12100	11900	11702
1,2	0,11507	11314	11123	10935	10749	10565	10383	10204	10027	09853
1,3	0,09680	09510	09342	09176	09012	08851	08691	08534	08379	08226
1,4	0,08076	07927	07780	07636	07493	07353	07214	07078	06944	06811
1,5	0,06681	06552	06426	06301	06178	06057	05938	05821	05705	05592
1,6	0,05480	05370	05262	05155	05050	04947	04846	04746	04648	04551
1,7	0,04457	04363	04272	04182	04093	04006	03920	03836	03754	03673
1,8	0,03593	03515	03438	03362	03288	03216	03144	03074	03005	02938
1,9	0,02872	02807	02743	02680	02619	02559	02500	02442	02385	02330
2,0	0,02275	02222	02169	02118	02068	02018	01970	01923	01876	01831
2,1	0,01786	01743	01700	01659	01618	01578	01539	01500	01463	01426
2,2	0,01390	01355	01321	01287	01255	01223	01191	01160	01130	01101
2,3	0,01072	01044	01017	00990	00964	00939	00914	00889	00866	00842
2,4	0,00820	00798	00776	00755	00734	00714	00695	00676	00657	00639
2,5	0,00621	00604	00587	00570	00554	00539	00523	00508	00494	00480
2,6	0,00466	00453	00440	00427	00415	00402	00391	00379	00368	00357
2,7	0,00347	00336	00326	00317	00307	00298	00289	00280	00272	00264
2,8	0,00256	00248	00240	00233	00226	00219	00212	00205	00199	00193
2,9	0,00187	00181	00175	00169	00164	00159	00154	00149	00144	00139

x	Q(x)	x	Q(x)	x	Q(x)	x	Q(x)	x	Q(x)
3,0	135·10 <sup>-5</sup>	3,3	48·10 <sup>-5</sup>	3,6	16·10 <sup>-5</sup>	3,9	48·10 <sup>-6</sup>	4,5	34·10 <sup>-7</sup>
3,1	97·10 <sup>-5</sup>	3,4	34·10 <sup>-5</sup>	3,7	11·10 <sup>-5</sup>	4,0	32·10 <sup>-6</sup>	4,8	8·10 <sup>-7</sup>
3,2	69·10 <sup>-5</sup>	3,5	23·10 <sup>-5</sup>	3,8	72·10 <sup>-6</sup>	4,3	85·10 <sup>-7</sup>	5,0	3·10 <sup>-7</sup>



При больших значениях аргумента можно воспользоваться соотношением

$$Q(x) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi x^3}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right).$$

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В.  
Теория электрической связи: Учебник для вузов. - М.: Радио и связь, 1998.
2. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М.  
Теория передачи сигналов: Учебник для вузов. - М.: Радио и связь, 1986.

### СОДЕРЖАНИЕ

Задание.....	1
Требования к оформлению.....	8
Указания к выполнению.....	8
Приложение. Таблица значений функции $Q(x)$ .....	15

*Водоуход*

