

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и
информатики

кафедра ТОРС

Задание и методические указания к курсовой работе по
дисциплине «**Теория электрической связи**»

для студентов 3 курса направления 210400 «Телекоммуникации» и
специальностей 210401, 210402, 210403, 210404, 210405, 210406 дневной
формы обучения

**«Исследование системы передачи дискретных
сообщений»**

Составители: к.т.н. Борисенков А. В.
к.т.н. Чингаева А. М.

Редактор: д.т.н., проф.
Николаев Б. И.

Рецензент: зав. каф. РПУ,
д.т.н. проф. Тяжев А. И.

Самара, 2009 г.

Задание на курсовую работу

1 Структурная схема системы передачи

Составить обобщённую структурную схему системы передачи дискретных сообщений, включающую в себя источник сообщений, кодер источника, кодер канала, модулятор, канал связи, демодулятор, декодер канала, декодер источника и получателя сообщений. Дать краткую характеристику каждого из блоков схемы: цель и сущность преобразований сигнала в данном блоке.

2 Исследование тракта кодер-декодер источника

Источник сообщений на передающей стороне представляет собой дискретный источник без памяти с алфавитом из 16 символов. Вероятности выдачи каждого символа источником и скорость выдачи символов известны.

Для заданного источника необходимо:

- 1 Найти энтропию, избыточность и производительность источника.
- 2 Полагая, что производится примитивное двоичное кодирование символов источника, найти минимально необходимое число разрядов кодового слова. Найти среднее количество двоичных символов, приходящееся на один символ источника.
- 3 Полагая, что производится экономное кодирование символов источника двоичным кодом, построить кодовое дерево для кода Хаффмана (или Шеннона–Фано, в зависимости от варианта), записать кодовые комбинации для представления всех 16 символов источника, найти число разрядов каждой полученной комбинации. Найти среднее количество двоичных символов, приходящееся на один символ источника, сравнить полученное значение со случаем примитивного кодирования и с энтропией источника. Определить избыточность на выходе кодера. Сделать вывод об эффективности и целесообразности использования экономного кодирования.
- 4 Рассчитать вероятности двоичных символов и среднюю скорость выдачи двоичных символов на выходе кодера источника.

- 5 Описать процедуру кодирования и декодирования символов экономным кодом. Пояснить, как влияет наличие ошибок в кодированных символах на качество работы декодера.

3 Исследование тракта кодер-декодер канала

Полагая, что для канального кодирования выбран код Хемминга (7, 4), выполнить следующее:

- 1 Описать процедуру кодирования символов помехоустойчивым кодом.
- 2 Определить избыточность и скорость кода, среднее число кодированных бит, приходящееся на один символ источника, среднюю битовую скорость на выходе кодера.
- 3 Определить исправляющую и обнаруживающую способность кода.
- 4 Описать процедуру декодирования в режимах обнаружения и исправления ошибок.
- 5 Полагая, что декодер работает в режиме исправления ошибок, найти вероятность ошибки на блок (кодovou комбинацию из 7 бит) и вероятность ошибки на бит на выходе декодера. Сделать вывод об эффективности исправления ошибок, указать, за счёт чего она достигается.
- 6 Полагая, что декодер работает в режиме обнаружения ошибок, найти вероятность ошибки на блок и вероятность ошибки на бит на выходе декодера. Рассчитать среднее число перезапросов на блок. Сравнить полученный результат с результатом в режиме исправления ошибок, сделать вывод об эффективности обнаружения, указать, за счёт чего она достигается.

4 Исследование тракта модулятор-демодулятор

Необходимо выполнить следующее:

- 1 Для заданного вида модуляции и рассчитанной средней скорости выдачи двоичных символов на выходе кодера канала определить скорость модуляции, тактовый интервал передачи одного бита и

минимально необходимую полосу пропускания канала. Записать аналитическое выражение модулированного сигнала. При этом частоту несущего колебания принять в 100 раз большей скорости модуляции.

- 2 Записать аналитическое выражение, связывающее сигналы на входе и выходе *заданного* канала.
- 3 Выбрать способ приёма сигнала с учётом информации о фазовом сдвиге сигнала в канале. Записать решающее правило и алгоритм работы демодулятора по критерию минимума средней вероятности ошибки, изобразить соответствующую структурную схему.
- 4 По заданным коэффициенту передачи канала, спектральной плотности мощности шума и максимально допустимой вероятности ошибки на выходе демодулятора найти минимально необходимую мощность сигнала на приёмной и передающей стороне. Рассчитать среднюю мощность сигнала на приёме.
- 5 Определить пропускную способность непрерывного канала связи, сравнить полученную величину со средней скоростью выдачи информации на выходе помехоустойчивого кодера, сделать выводы.
- 6 Определить, как изменится вероятность ошибки на выходе демодулятора при использовании других видов модуляции при сохранении пиковой мощности сигнала. Указать, потребуется ли увеличение (уменьшение) минимально необходимой полосы пропускания канала. Сделать вывод об эффективности заданного вида модуляции.

5 Демонстрация работы системы передачи

Продемонстрировать работу всех блоков системы передачи на примере заданной последовательности символов на выходе источника. Для этого

- 1 Выбрать передаваемый текст в соответствии с номером варианта.
- 2 Используя результаты п. 2, закодировать выбранный текст экономным кодом.

- 3 Используя результаты п. 3, закодировать полученную последовательность бит помехоустойчивым кодом, предварительно разбив её на блоки по k бит (если в последнем блоке бит «не хватило» — заполнить недостающие разряды нулями).
- 4 Используя результаты п. 4, изобразить временные и спектральные диаграммы сигнала на входе и выходе модулятора, при этом предположить, что передаваемая последовательность кодированных бит на входе модулятора представлена двухполярным сигналом.
- 5 Полагая, что при демодуляции произошло 3 ошибки, записать кодовую последовательность на выходе демодулятора (номера ошибочных разрядов выбираются в соответствии с вариантом).
- 6 Полагая, что декодер работает в режиме исправления ошибок, декодировать полученную последовательность. Указать, все ли ошибки были исправлены.
- 7 Восстановить текст сообщения, используя кодовую таблицу из п. 2 (если в конце сообщения получились «лишние» биты, их следует отбросить). Сравнить полученный результат с исходным.

Выбор варианта

Замечания:

- При выборе варианта используются 4 последние цифры номера студенческого билета: $abcd$.
- В расчётах часто используется операция взятия по модулю: $y = x \bmod n$. Взятие числа x по модулю n аналогично взятию остатка от деления x на n . Например, $9 \bmod 7 = 2$.
- Оператор $\lceil \cdot \rceil$ означает округление вверх. Например, $\lceil 3,1 \rceil = 4$.

1 Выбор алгоритма кодирования источника

$$y = (a + b + c + d) \bmod 2.$$

Если $y = 0$ — код Хаффмана, 1 — код Шеннона–Фано.

Таблица 1. Вероятности символов источника

Номер i	Символ a_i	Вероятность $p(a_i)$
0	а	$0,31(1 - 0,1 \cdot d)$
1	б	$0,002 + 0,001 \cdot a$
2	в	$0,007 + 0,025 \cdot c$
3	г	$0,009(1 - 0,1 \cdot b)$
4	д	$0,02(1 - 0,1 \cdot d)$
5	е	$0,005 + 0,015 \cdot b$
6	з	$0,01(1 - 0,1 \cdot a)$
7	и	$0,15(1 - 0,1 \cdot b)$
8	к	$0,008 + 0,031 \cdot d$
9	л	$0,2(1 - 0,1 \cdot a)$
10	м	$0,006 + 0,02 \cdot a$
11	н	$0,015(1 - 0,1 \cdot c)$
12	о	$0,004 + 0,002 \cdot d$
13	п	$0,003 + 0,0015 \cdot c$
14	р	$0,25(1 - 0,1 \cdot c)$
15	с	$0,001 + 0,0009 \cdot b$

2 Расчёт вероятностей символов на выходе источника сообщений

Вероятности символов источника заданы в таблице 1.

3 Расчёт скорости выдачи символов источником

$$V_{\text{и}} = \frac{b + c + d}{a + 1} \cdot 10^3 \text{ симв/с.}$$

4 Выбор вида модуляции

$$y = (a + b + c) \bmod 4.$$

Если $y = 0$ — АМ, 1 — ФМ, 2 — ЧМ, 3 — ОФМ.

5 Выбор вида канала

$$y = (b + c + d) \bmod 2.$$

Если $y = 0$ — гауссовский канал, 1 — гауссовский канал с неопределённой фазой.

Примечание: при ФМ канал всегда выбирается гауссовским.

6 Расчёт коэффициента передачи канала

$$\gamma = \frac{1}{a + d + 1}.$$

7 Расчёт спектральной плотности мощности шума

$$N_0 = \frac{c + d + 1}{a + b + 1} \cdot 10^{-6} \text{ В}^2/\text{Гц}.$$

8 Расчёт максимально допустимой вероятности ошибки на выходе демодулятора

$$p_{\text{дем}} = \frac{a + c + 1}{b + d + 1} \cdot 10^{-4}.$$

9 Выбор текста передаваемого сообщения

Текст сообщения состоит из 8 символов источника: $\alpha\beta\alpha\gamma\beta\alpha\beta$. Здесь α — символ, имеющий наибольшую вероятность, β — символ, имеющий следующую по величине вероятность после символа α , γ — символ, имеющий следующую по величине вероятность после символа β .

10 Выбор номеров ошибочных разрядов

$$\begin{aligned}n_1 &= (a + b + c) \bmod 7, \\n_2 &= 7 + (b + c + d) \bmod 7, \\n_3 &= 7 + [n_2 + 1 + (c + d + a) \bmod 6] \bmod 7.\end{aligned}$$

Примечание: разряды нумеруются с нуля!

Краткие методические указания к выполнению курсовой работы

1 Структурная схема системы передачи

Указание к выполнению этого пункта содержится в тексте самого задания. Необходимо построить обобщённую структурную схему системы передачи, содержащую каскадное соединение блоков, перечисленных в задании. Обозначить сигналы на входах и выходах всех блоков схемы и дать краткую характеристику каждого из блоков. При этом не следует переписывать целые главы учебника. Необходимо как можно более кратко и ёмко пояснить цель и сущность происходящих в каждом блоке преобразований. Краткие теоретические сведения для выполнения данного пункта задания можно также найти в главе 1 учебника [1].

Примечание: введённые в данном пункте обозначения сигналов на входах и выходах блоков системы передачи следует использовать без изменений во всех последующих пунктах курсовой работы. Это также касается всех прочих обозначений, используемых в работе. Все обозначения, взятые из учебников, следует также приводить в соответствие с используемыми в работе.

2 Исследование тракта кодер-декодер источника

Для выполнения этого пункта задания потребуется изучение глав 6 и 7 учебника [1] или глав 4 и 5 учебника [2]. Формулы для расчёта энтропии $H(A)$, избыточности $\rho_{\text{и}}$ и производительности $H'(A)$ источника можно найти в п. 6.2.2 [1] или п. 4.1 [2]. Прimitивное кодирование описано в п. 7.1 [1] и п. 5.1 [2], а также в п. 1 [3]. Число разрядов примитивного кода k , необходимое для кодирования всех символов источника, определяется из условия, что общее число всех возможных комбинаций из k двоичных разрядов должно быть равно объёму алфавита источника K . Для случая примитивного кодирования среднее количество двоичных символов, приходящееся на один символ источника, \bar{k} будет также равно k (поскольку все символы представляются комбинациями с одинаковым числом разрядов).

Экономные коды Шеннона–Фано и Хаффмана описаны в п. 7.2 [1] и п. 5.1 [2] соответственно. Пример построения кодового дерева показан на рис. 5.3 стр. 208 [2]. Среднее число двоичных символов, приходящееся на один символ источника, находится как математическое ожидание числа

разрядов кодового слова:

$$\bar{k} = \sum_{i=0}^{K-1} k_i p(a_i).$$

Здесь k_i — число разрядов кодовой комбинации, соответствующей i -му символу источника, $p(a_i)$ — вероятность i -го символа.

Вероятности двоичных символов p_0 и p_1 можно найти, поделив соответственно среднее число 0 и 1 в кодовом слове на среднее число разрядов кодового слова:

$$p_0 = \frac{\sum_{i=0}^{K-1} k_i^0 p(a_i)}{\bar{k}},$$
$$p_1 = \frac{\sum_{i=0}^{K-1} k_i^1 p(a_i)}{\bar{k}} = 1 - p_0.$$

Здесь k_i^0 и k_i^1 — число нулей и единиц в кодовой комбинации i -го символа соответственно.

На каждый символ источника на входе кодер в среднем выдаёт \bar{k} двоичных символов на выходе. Следовательно, средняя скорость выдачи двоичных символов на выходе кодера источника $V_{\text{ки}}$ будет в \bar{k} раз больше скорости выдачи символов источником сообщений.

При описании процедур кодирования и декодирования символов источника экономным кодом не следует переписывать общую теорию из учебника. Необходимо дать *конкретные* описания для *вашего* способа кодирования.

3 Исследование тракта кодер-декодер канала

Для выполнения этого пункта задания потребуется изучение главы 7 [1] или главы 5 [2]. Коды Хемминга описаны в п. 7.3.4 [1], п. 5.2 [2] и п. 3 [3]. Избыточность линейного двоичного кода определяется как

$$\rho_{\text{к}} = \frac{r}{n},$$

а скорость — как

$$R = \frac{k}{n}.$$

Здесь n — общее число разрядов кодовой комбинации, k — число информационных, а r — число проверочных разрядов.

Среднее число кодированных бит, приходящееся на один символ источника \bar{n} , и, соответственно, средняя битовая скорость на выходе кодера канала $V_{\text{кк}}$, увеличиваются в $1/R$ раз по сравнению с аналогичными величинами на выходе кодера источника.

Формулы для расчёта вероятности необнаруженной $p_{\text{но}}$ и неисправленной $p_{\text{к}}$ ошибки (вероятности ошибки на блок на выходе декодера) можно найти в п. 3 [3] или вывести самостоятельно, зная исправляющую $q_{\text{и}}$ и обнаруживающую $q_{\text{о}}$ способность кода. Для нахождения вероятности ошибки на бит $p_{\text{дек}}$ необходимо учесть, что ошибочно декодированный блок интерпретируется как пачка ошибок на выходе декодера, внутри которой вероятность ошибки на бит равна 0,5. Следовательно,

$$p_{\text{дек}} = 0,5p_{\text{к}}$$

в режиме исправления или

$$p_{\text{дек}} = 0,5p_{\text{но}}$$

в режиме обнаружения.

Среднее число перезапросов на блок (кодovou комбинацию из 7 бит) можно найти следующим образом. В среднем при передаче N блоков произойдёт $Np_{\text{пз}}$ перезапросов. Однако, при повторной передаче (перезапросе) также может быть обнаружена ошибка и сделан новый перезапрос. Таким образом, получаем рекуррентную формулу

$$N_{\text{пз}} = (N + N_{\text{пз}}) p_{\text{пз}},$$

где $N_{\text{пз}}$ — число перезапросов в последовательности длиной N блоков, $p_{\text{пз}}$ — вероятность перезапроса. Отсюда среднее число перезапросов на 1 блок

$$w_{\text{пз}} = \frac{N_{\text{пз}}}{N} = \frac{p_{\text{пз}}}{1 - p_{\text{пз}}}.$$

Вероятность перезапроса $p_{\text{пз}}$ равна вероятности того, что декодер обнаружит ошибку:

$$\begin{aligned} p_{\text{пз}} &= P(1 \text{ ош.}) + P(2 \text{ ош.}) + \dots + P(q_{\text{о}} \text{ ош.}) = \\ &= 1 - P(0 \text{ ош.}) - p_{\text{но}}. \end{aligned}$$

При описании процедур кодирования и декодирования помехоустойчивым кодом, как и в предыдущем пункте, не следует переписывать общую теорию из учебника. Необходимо дать *конкретные* описания для *вашего* способа кодирования.

4 Исследование тракта модулятор-демодулятор

Для выполнения этого пункта задания потребуется изучение глав 3, 5 и 6 [1] или глав 2, 4 и 6 [2].

Модуляция гармонической несущей дискретными сообщениями описана в п. 3.5 [1] и п. 2.1 [2]. Поскольку в работе используется двоичная модуляция, скорость модуляции V_0 будет равна скорости выдачи информации канальным кодером $V_{\text{кк}}$. Тактовый интервал T_0 определяется как величина, обратная скорости модуляции. Минимально необходимая полоса пропускания канала в соответствии с теоремой Найквиста (стр. 133 [2]) рассчитывается как

$$\Delta F_{\min} = V_0/2.$$

При АМ, ФМ и ОФМ полоса частот передаваемого сигнала увеличивается в два раза, следовательно, во столько же увеличивается и минимально необходимая полоса пропускания канала:

$$\Delta F_{\text{к}} = 2\Delta F_{\min}.$$

При ЧМ эта величина будет равна

$$\Delta F_{\text{к}} = 2\Delta F_{\min} + 2\Delta f,$$

где $\Delta f = \frac{1}{2T_0}$ — минимально допустимая девиация частоты.

Аналитическое выражение АМ-сигнала при двоичной модуляции в общем виде можно записать как

$$u_{\text{АМ}}(t) = \frac{U_0}{2} [1 + b(t)] \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0),$$

для ФМ как

$$u_{\text{ФМ}}(t) = U_0 \cos\left(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2} [b(t) - 1]\right),$$

что эквивалентно

$$u_{\text{ФМ}}(t) = U_0 b(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0),$$

для ЧМ — как сумму двух сигналов АМ:

$$u_{\text{ЧМ}}(t) = \frac{U_0}{2} [1 - b(t)] \cos [2\pi (f_0 - \Delta f) t + \varphi_0] + \frac{U_0}{2} [1 + b(t)] \cos [2\pi (f_0 + \Delta f) t + \varphi_0].$$

Здесь $b(t)$ — первичный сигнал, представляющий двоичные символы на выходе кодера канала (нулю соответствует $b(t) = -1$, единице — $b(t) = 1$), U_0 , f_0 и φ_0 — соответственно амплитуда, частота и начальная фаза несущего колебания (φ_0 можно положить равной нулю).

Помимо общих выражений следует также записать отдельные выражения для сигналов, соответствующих передаче 0 и 1: $u_0(t) = u(t)|_{b(t)=-1}$ и $u_1(t) = u(t)|_{b(t)=1}$.

Амплитуду несущего колебания U_0 можно рассчитать после вычисления минимально необходимой мощности единичного сигнала (пиковой мощности) на передаче $P_{\text{пд}}$ (см. стр. 13). Аналитическое выражение мощности единичного сигнала на передаче имеет вид:

$$P_{\text{пд}} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} u_1^2(t) dt.$$

Подставляя сюда соответствующее выражение для $u_1(t)$, можно выразить амплитуду U_0 через мощность $P_{\text{пд}}$.

При записи аналитического выражения сигнала ОФМ необходимо учесть, что система ОФМ является системой сигналов, ортогональных на интервале $[-T_0, T_0]$:

$$\begin{cases} u_{0\text{ОФМ}}(t) = U_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), & -T_0 < t \leq T_0; \\ u_{1\text{ОФМ}}(t) = \begin{cases} U_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), & -T_0 < t \leq 0; \\ -U_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), & 0 < t \leq T_0. \end{cases} \end{cases}$$

Сигнал ОФМ можно также получить с помощью модуляции несущей по фазе предварительно перекодированной последовательностью бит $c_i = c_{i-1} \oplus b_i$ (см. [1, стр. 190]):

$$u_{\text{ОФМ}}(t) = U_0 c(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0).$$

Здесь $c(t)$ — сигнал, представляющий перекодированную последовательность (нулю в потоке перекодированных бит соответствует $c(t) = -1$, а единице — $c(t) = 1$).

Выражение, связывающее сигналы на входе и выходе канала, должно быть записано с учётом заданного вида канала (гауссовский или гауссовский с неопределённой фазой). Описание гауссовского канала можно найти в п. 4.4.2 [1], гауссовского канала с неопределённой фазой — в п. 4.4.3 [1].

Оптимальный приём дискретных сообщений описан в главе 5 [1] и главе 6 [2]. Когерентный приём описан в п. 5.3–5.5 [1] и п. 6.3–6.5 [2], а некогерентный — в п. 5.7 [1] и п. 6.6–6.8 [2]. Решающее правило и алгоритм должны быть записаны для *двоичной* системы сигналов и *заданного* вида модуляции, а схема приёмника должна в точности соответствовать записанному алгоритму. При записи алгоритма когерентного приёма ОФМ необходимо учесть, что решающее устройство выносит решение о перекодированной последовательности символов \hat{c}_i . Последовательность \hat{b}_i появляется только на выходе устройства обратной перекодировки: $\hat{b}_i = \hat{c}_{i-1} \oplus \hat{c}_i$.

Минимально необходимая мощность единичного сигнала на приёмной стороне P_1 находится из выражения для средней вероятности ошибки при соответствующем способе приёма (когерентный или некогерентный). Формулы для вероятностей ошибки при когерентном (слева) и некогерентном (справа) приёме:

$$\begin{aligned} p_{\text{АМ}} &= Q\left(\sqrt{h^2/2}\right), & p_{\text{АМ}} &\approx 0,5 \exp(-h^2/4), \\ p_{\text{ЧМ}} &= Q\left(\sqrt{h^2}\right), & p_{\text{ЧМ}} &= 0,5 \exp(-h^2/2), \\ p_{\text{ФМ}} &= Q\left(\sqrt{2h^2}\right), & p_{\text{ОФМ}} &= 0,5 \exp(-h^2). \\ p_{\text{ОФМ}} &\approx 2Q\left(\sqrt{2h^2}\right). \end{aligned}$$

Здесь $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ — функция ошибок, $h^2 = E_1/N_0$ — отношение сигнал-шум (пиковое), $E_1 = P_1 T_0$ — энергия единичного сигнала на приёме.

Как видно из приведённых формул, при когерентном приёме вероятность ошибки демодулятора $p_{\text{дем}}$ и отношение сигнал-шум h^2 (мощность единичного элемента сигнала на приёме P_1) связаны через функцию Q . Это означает, что при известной $p_{\text{дем}}$ для отыскания h^2 (или P_1) требуется вычислить обратную функцию Q :

$$x = Q^{-1}(y).$$

Это легко делается с помощью таблицы функции Q [4]: для известного значения y находим в таблице значение x , затем приравниваем аргумент функции Q к найденному значению и выражаем отсюда h^2 (или P_1).

Средняя мощность рассчитывается как

$$P_{\text{ср}} = p_0 P_0 + p_1 P_1.$$

Здесь P_0 — мощность сигнала, соответствующего передаче нуля, на приёме. Для АМ $P_0 = 0$, для ФМ, ЧМ и ОФМ $P_0 = P_1$.

При прохождении сигнала по каналу его амплитуда изменяется в γ раз. Поскольку мощность сигнала пропорциональна квадрату его амплитуды,

$$P_{\text{пм}} = P_1 = \gamma^2 P_{\text{пд}}.$$

Здесь $P_{\text{пм}} = P_1$ — мощность единичного сигнала на приёме, а $P_{\text{пд}}$ — на передаче.

Понятие пропускной способности канала, а также формулы для её расчёта можно найти в п. 6.3.2 [1] или п. 4.5 [2]. Следует учесть, что для расчёта пропускной способности используется средняя мощность сигнала на приёмной стороне $P_{\text{ср}}$.

5 Демонстрация работы системы передачи

Выполнение этого пункта работы необходимо проводить с учётом всех проделанных ранее расчётов. Кодовые комбинации, временные и спектральные диаграммы должны быть построены не в общем виде, а рассчитаны на основании данных п. 2–4 работы.

Оси всех графиков должны быть подписаны и размечены в соответствии с рассчитанными значениями.

При построении временных диаграмм первичного и модулированного сигналов можно ограничиться 8–10 тактовыми интервалами передачи. При построении спектральных диаграмм — 3–4 «лепестками» спектральной плотности на положительных частотах.

При построении спектральных диаграмм необходимо сначала привести соответствующие аналитические выражения, записанные как в общем виде, так и с учётом рассчитанных параметров сигнала.

Литература

- [1] Теория электрической связи / Зюко А. Г., Кловский Д. Д., Коржик В. И., Назаров М. В. // Под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1998.
- [2] Кловский Д. Д. Теория передачи сигналов. – М.: Радио и связь, 1973.
- [3] Методическая разработка к лабораторной работе № 8 по дисциплине «Теория электрической связи» «Исследование линейных блочных кодов» (для студентов 3 курса специальностей 550400, 201800, 201100, 201000, 200900), каф. ТОРС, Самара, 2004.
- [4] http://tors.psati.ru/metod_web/q.pdf