

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО КОДИРОВАНИЯ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

Цель работы: изучить требования и параметры кодов, применяемых в волоконно-оптических системах связи, научиться применять методы кодирования для двоичных последовательностей сигналов.

Краткие сведения из теории

Оптическое волокно как среда передачи сигнала, а также оптоэлектронные компоненты оптического передающего и приемного устройств налагают ограничения на характеристики цифрового сигнала, поступающего в линейный тракт волоконно-оптической системы передачи (ВОСП), поэтому этот сигнал подвергается перекодированию с помощью преобразователя кода в линейный код.

К кодам цифровых ВОСП предъявляются следующие *требования*:

1 Энергетический спектр кода в линии должен иметь минимальное содержание низкочастотных (НЧ) и высокочастотных (ВЧ) компонентов. Ограничение спектра в области нижних частот вызвано требованием передачи принимаемого сигнала без искажений в усилителе переменного тока фотоприемника. В противном случае для реализации оптимальных условий приема перед решающим устройством регенератора необходимо вводить дополнительное устройство, предназначенное для восстановления НЧ-составляющей. Это усложняет оборудование линейного тракта и увеличивает его стоимость. Существует еще одна причина, по которой необходимо уменьшить уровень НЧ-составляющей спектра. Оптическая мощность, излучаемая полупроводниковым лазерным диодом, зависит от окружающей температуры, но ее можно стабилизировать введением отрицательной обратной связи по среднему значению излучаемой мощности только в том случае, когда отсутствует НЧ-часть спектра, изменяющаяся во времени под

действием передаваемого информационного сигнала. В ином случае в цепи отрицательной обратной связи должно быть предусмотрено специальное устройство, компенсирующее эти изменения. Это также приводит к усложнению и удорожанию схемы оптического передатчика.

2 Код не должен налагать какие-либо ограничения на передаваемое сообщение и обеспечивать однозначную передачу любой последовательности единиц и нулей. Это требование формулируется как «независимость процесса кодирования источника информации».

3 Код в линии должен содержать информацию о тактовой частоте передаваемого сигнала. В приемнике эта информация используется для восстановления фазы и частоты колебания, необходимого для управления процессом принятия решения пороговыми устройствами регенераторов. Осуществить выделение тактовой частоты тем проще, чем больше число переходов уровня в цифровом сигнале, т. е. 10 или 01. В наилучшем случае энергетический спектр цифрового сигнала должен иметь дискретную составляющую на тактовой частоте. Если это условие не выполняется, то приходится вводить предварительную нелинейную обработку информационной цифровой последовательности.

4 Статистические характеристики цифровых сигналов в линиях не должны быть произвольными для обеспечения устойчивой работы регенераторов, в частности, должно быть ограничено максимальное число последовательностей символов одного уровня или одной амплитуды.

5 Структура цифрового сигнала в линии должна позволять организовывать контроль ошибок в регенераторах. Кодеры и декодеры линейного тракта, а также устройства контроля ошибок должны быть простыми в схемном отношении, иметь низкое потребление электроэнергии.

6 Код в линии должен иметь ограниченное число уровней передачи, что вызвано нелинейностью модуляционных характеристик и температурной зависимостью излучаемой оптической мощности лазерных диодов.

7 Желательно, чтобы код в линии позволял обеспечить передачу сервисных сигналов.

Реализация всех перечисленных требований к кодам в линиях осуществляется введением избыточности (R). Для двухуровневых кодов введение избыточности осуществляется увеличением тактовой частоты. При сохранении или снижении значений тактовой частоты избыточность вводится увеличением числа уровней передаваемого сигнала, т. е. использованием многоуровневых кодов.

$$R = \frac{F_{\text{тл}} \log_2(L) - F_{\text{т}} \log_2(m)}{F_{\text{тл}} \log_2(L)}, \quad (1)$$

где $F_{\text{тл}}$ – тактовая частота информационного цифрового сигнала на выходе кодера линейного тракта (или входе декодера линейного тракта), т. е. в линии передачи;

$F_{\text{т}}$ – тактовая частота информационного цифрового сигнала на входе кодера линейного тракта (или выходе декодера);

m – число разрешенных уровней входного сигнала;

L – число разрешенных уровней выходного сигнала.

Цифровая сумма D , накопленная или текущая, определяется алгебраической суммой амплитуд символов (b_i) от момента времени, равного нулю, до момента наблюдения за вычетом среднего значения сигнала (B_0), отнесенного к абсолютному значению разности соседних по величине уровней символов цифрового сигнала (Δ):

$$D_n = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^n (b_i - B_0). \quad (2)$$

Для анализа бинарных сигналов в ряде работ используется «диспаритетность», которая определяется разностью единиц и нулей цифрового сигнала в соответствии с рекомендацией ITU-T. При расчете диспаритетности бинарных сигналов следует число единиц умножить на вес одной единицы, равный $+0,5$, а число нулей – на вес одного нуля, равный $-0,5$. При таком расчете диспаритетности цифрового сигнала, содержащего нули и единицы, ее значение совпадает со значением цифровой суммы реализации этого же цифрового сигнала, содержащего -1 и $+1$.

Для анализа бинарных сигналов используется диспаритетность кодовых слов. Цифровая сумма d кодового слова или кодовой группы определяется по формуле

$$d_n = \sum_{l=-\infty}^k D_{nk}, \quad (3)$$

где n – число элементов блока;

l – порядковый индекс;

k – индекс текущего блока.

Чем больше число значений текущей диспаритетности $S(D)$, тем больше НЧ-составляющая спектральной плотности мощности цифрового сигнала.

Для бинарных сигналов максимальное число последовательных одинаковых по амплитуде символов состоит из максимального числа $l(1)$ последовательных единиц и максимального числа $l(0)$ последовательных нулей.

Для оптимизации спектра сигнала, подаваемого в линию связи, используется так называемое линейное кодирование. Оно должно обеспечить:

– минимальную спектральную плотность на нулевой частоте и ее ограничение на нижних частотах;

- информацию о тактовой частоте передаваемого сигнала в виде дискретной составляющей, легко выделяемой на фоне непрерывной части спектра;
- достаточную узкополосность непрерывного спектра для передачи через канал связи без искажений;
- малую избыточность для снижения относительной скорости передачи в канале связи;
- минимально возможные длины блоков повторяющихся символов («1» или «0») и диспаратетность (неравенство чисел «1» и «0» в кодовых комбинациях).

Для двоичного кодирования число уровней входного сигнала $m = 2$, а число уровней выходного сигнала n может быть 2 (двухуровневое кодирование) или 3 (трехуровневое кодирование). Двухуровневое кодирование может быть однополярным (+1, 0) и двуполярным или симметричным (+1, -1); трехуровневое – однополярным (+2, +1, 0) и двуполярным (+1, 0, -1). Например, оптические линии связи требуют однополярных методов кодирования, тогда как электрические линии связи могут использовать как однополярные, так и двуполярные методы кодирования.

NRZ – Non Return to Zero code – основополагающий двухуровневый код без возвращения к нулю, может быть как двуполярным, так и однополярным. На рисунке 1 представлен однополярный NRZ код. Недостатки кода:

- безызыточность исключает возможность контроля за качеством работы регенераторов без прерывания связи и использования специальных испытательных сигналов, т. к. любые комбинации импульсов и пауз при таком кодировании являются разрешенными;
- затрудняется синхронизация приемного устройства, установление границ тактовых интервалов, т. к. в спектре сигнала отсутствуют дискретные составляющие на тактовой частоте $f_T = 1/T$, либо на кратных ей частотах;
- возможность группирования импульсов и пауз в любом их сочетании приводит к значительному содержанию низкочастотных составляющих, вплоть до нулевой частоты, что усложняет обработку сигнала в приемном устройстве.

RZ – Return to Zero code – основополагающий трехуровневый код с возвращением к нулю (см. рисунок 1). В нем «1» и «0» передаются импульсом, длительность которого в два раза меньше, чтобы обеспечить запретные интервалы между элементарными сигналами. Формально полученный сигнал можно рассматривать как избыточный двоичный сигнал с тактовой частотой $f_T = 2/T$. Преимущество кода в том, что источник оптического излучения работает меньше времени, поэтому степень деградации его параметров снижается.

Недостаток кода RZ заключается в необходимости использования широкой полосы частот передачи из-за применения импульсов меньшей длительности. Код используется на линиях небольшой протяженности при отсутствии регенерационных участков.

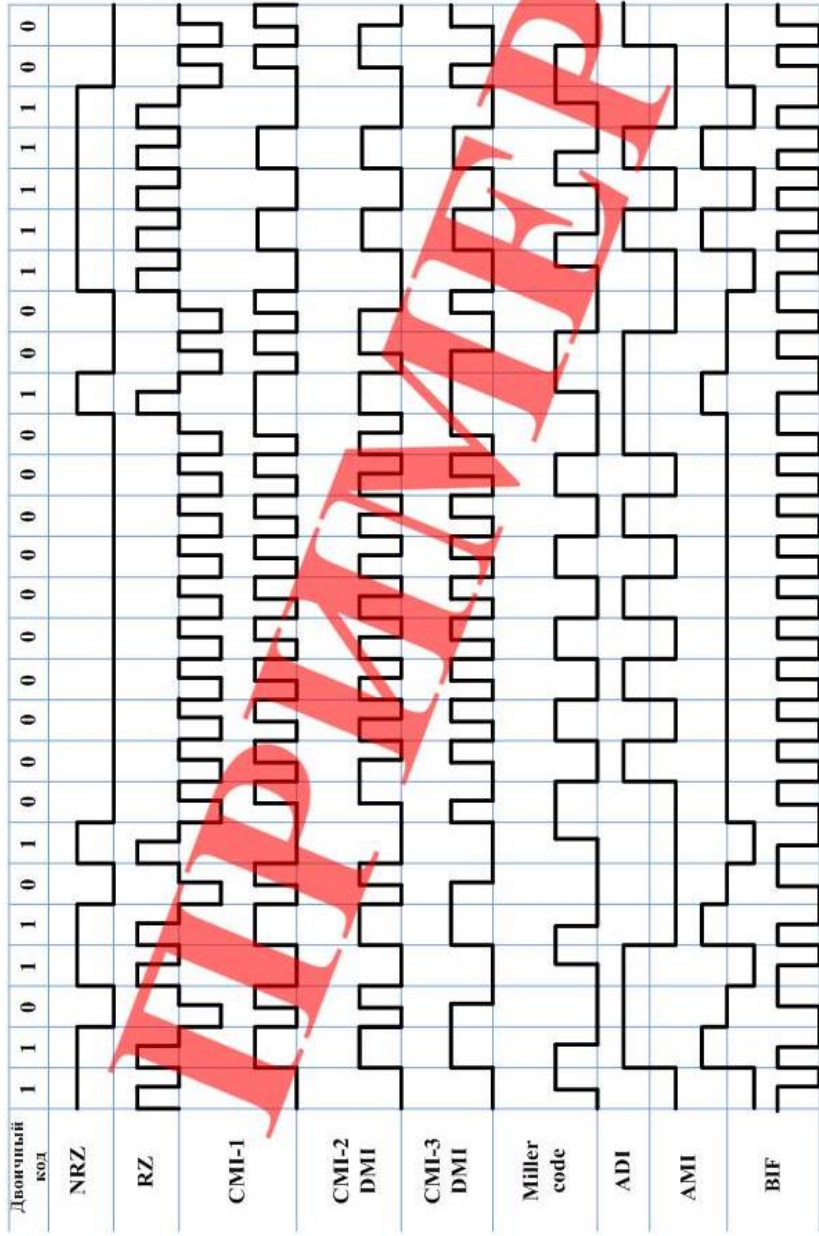


Рисунок 1 – Примеры линейного кодирования в канале связи

Для снижения содержания в спектре сигнала низкочастотных компонентов применяются блочные коды. $mBnB$ – общее обозначение класса блочных кодов (m – длина в битах блоков, на которые разбивается исходная последовательность, а n – соответствующая им длина в битах блоков, составленных из кодовых символов).

Предложен целый ряд кодов класса $mBnB$, предназначенных для передачи в линиях связи со скоростями несколько десятков мегабит в секунду. Некоторые из них были разработаны специально для оптических систем передачи 2, 8, 34 Мбит/с. К таким кодам относятся: CMI-1, CMI-2 (DMI), CMI-3, код Миллера, 1B2B.

Из них наиболее широко используется класс 1B2B – код, в котором 1 бит исходной последовательности длительностью T кодируется комбинацией из двух бит длительностью $T/2$ (относительная скорость передачи в канале связи при этом возрастает в два раза).

Коды CMI-1 (Coded Mark Inversion), CMI-2 или DMI (Differential Mark Inversion) и CMI-3 характеризуются увеличением скорости передачи в линии в два раза. Их особенностью является то, что единицы информационного сигнала передаются чередованием комбинаций символов 11 и 00. Различие алгоритмов формирования кодов CMI-1, DMI и CMI-3 состоит в особенности передачи нулей информационного сигнала. В CMI-1 нули информационного сигнала всегда передаются комбинацией символов 01; в DMI – комбинацией 01, если предшествующий символ 1 и 10, если 0; в CMI-3 – комбинацией 01, если предшествующий символ был 0 и 10, если 1.

ADI (Alternate Digit Inversion code) – двоичный код с инверсией полярности сигнала на каждом втором двоичном разряде (неважно, какой он: «1» или «0»); в результате формируется двуполярный двухуровневый код.

AMI (Alternate Mark Inversion code) – двоичный код двуполярный NRZ с инверсией на каждой «1», может быть получен из кода ADI путем инверсии каждой четной «1»; в результате формируется двуполярный трехуровневый код.

В локальных сетях до недавнего времени самым распространенным методом кодирования был так называемый манчестерский код (BIF). Он применялся в технологиях Ethernet и Token Ring. В этом коде для кодирования нулей и единиц используется перепад потенциала, то есть фронт импульса. Единица кодируется перепадом от высокого уровня сигнала к низкому, а ноль – обратным перепадом. В начале каждого такта может происходить служебный перепад сигнала, если нужно представить несколько единиц или нулей подряд. В среднем ширина полосы манчестерского кода в полтора раза уже, чем у биполярного импульсного кода.

Манчестерский код имеет еще одно преимущество перед биполярным импульсным кодом: в последнем для передачи данных используется три уровня сигнала, а в манчестерском – два.

Код Миллера (Miller code) – двополярный двухуровневый код класса 1В2В, имеющий множество состояний (00, 01, 10, 11), переходы между которыми описываются графом, приведенным на рисунке 2. Например, для приведенной на рисунке 1 исходной последовательности 1101101000000... процесс генерации (перехода из состояния в состояние) имеет вид:

1 → 11; 1 → 10; 0 → 00; 1 → 01; 1 → 10; 0 → 00; 1 → 01; 0 → 11 и т. д.

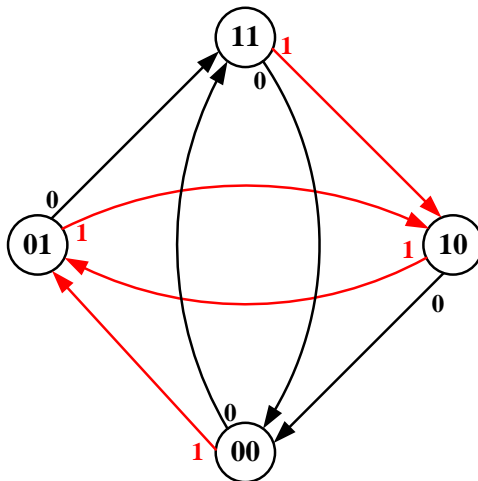


Рисунок 2 – Граф формирования кодовых комбинаций кода Миллера

При использовании кода Миллера скорость передачи увеличивается вдвое из-за увеличения в два раза тактовой частоты. Код Миллера так же, как СМІ-3, характеризуется более узким энергетическим спектром (рисунок 3).

В цифровых ВОСП большой скорости получили применение блочные коды, такие как 2В3В, 5В6В, 7В8В и другие, в которых $m > 1$, а $n = m + 1$ или $n = m + 2$. Эти коды формируют более сложные кодеры, чем кодеры кода 1В2В, но вводимая избыточность при этом меньше 0,5, т. е. эти коды не требуют увеличения тактовой частоты в два раза, что позволяет при тех же требованиях к сигналам на входе решающих устройств регенераторов увеличить длины регенерационных участков.

Таким образом, за счет усложнения кодеров и декодеров линейного тракта можно снизить стоимость ВОСП, уменьшая стоимость аппаратуры линейных трактов.

В таблице 1 приведены кодовые карты модификаций кодов 2В3В (альтернативного и low density соответственно), предназначенных для цифровых ВОСП. Представляет интерес low density код 2В3В, разработанный с целью снижения мощности излучения передатчика, поскольку вероятность появления единиц у этого кода равна 0,33.

Одиночные ошибки в цифровых линейных трактах при использовании блочных кодов $mBnB$ при $m > 2$ приводят к появлению одной, а иногда и большего числа ошибок в информационном сигнале на выходе декодера линейного тракта. Для кода 3B4B коэффициент размножения ошибок равен 1,5.

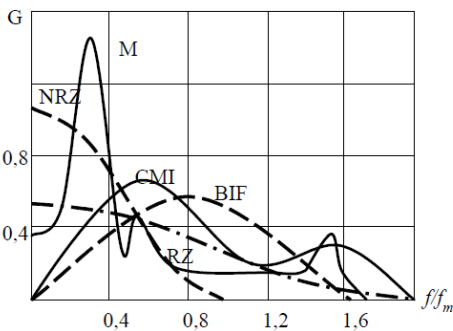


Рисунок 3 – Энергетические спектры линейных кодов

Контроль ошибок в регенераторах может быть реализован по контролю величины текущей дискретности или по контролю величины спектральных составляющих кода на частотах вблизи нуля. В коде 5B6B каждые пять последовательных символов исходного сигнала преобразуются в шестиразрядные комбинации линейного сигнала. В таблице 2 приведены кодовые карты модификаций кодов 5B6B.

Таблица 1 – Карта кода 2B3B

Исходная комбинация	Модификации кода 2B3B	
	альтернативный	low density
00	110	001
01	011	010
10	101	100
11	111	000

Кодовая карта кода 5B6B по алгоритму 1 получена по правилам составления альтернативных кодов, а в случае 2 – произвольно.

Код 7B8B имеет лучшие значения ряда параметров, чем код 5B6B. Например, избыточность кода 7B8B меньше, чем для кода 5B6B, однако большее количество свободных кодовых групп, не входящих в алфавиты, может быть использовано для передачи сервисных сигналов.

В некоторых высокоскоростных системах используются коды $mB1C$. При формировании кодов $mB1C$ к m информационным символам добавляется один дополнительный, обозначаемый 1C (Complimentary).

Дополнительный символ принимает значение 1 или 0 в зависимости от последнего (m -го) информационного символа. Если информационный символ был 1, то C-символ принимает значение 0, если же m -й символ имел значение 0, то символ C принимает значение 1. К кодам $mB1C$, используемым в цифровых ВОСП, относится бифазный код (или Manchester), коды 8B1C и 10B1C.

Таблица 2 – Карты кодов 5В6В

Исходная комбинация	Алгоритм 1	Алгоритм 2	Исходная комбинация	Алгоритм 1	Алгоритм 2
00000	010100	101000	10000	001011	100010
00001	011100	011000	10001	100010	100011
00010	110001	100100	10010	100100	100101
00011	101001	000111	10011	111000	100110
00100	011010	010100	10100	001001	101001
00101	010011	001011	10101	000101	101010
00110	101100	001101	10110	101010	101100
00111	000110	001110	10111	011001	001010
01000	100110	001100	11000	010010	110001
01001	010101	010011	11001	001101	110010
01010	101000	010101	11010	110010	110100
01011	011000	010110	11011	010110	000110
01100	000111	011001	11100	100101	111000
01101	100001	011010	11101	100011	010001
01110	010001	011100	11110	001110	001001
01111	110100	010010	11111	001010	000101

Бифазный код в терминах кодов $mB1C$ можно записать как код $1B1C$. Его избыточность равна $0,5$, т. е. тактовая частота сигналов в линии при использовании этого кода увеличивается в 2 раза. Для снижения избыточности кода значение m следует увеличивать, но при этом увеличивается и максимальное число последовательных одинаковых символов, поскольку для кодов $mB1C$ оно равно $(m + 1)$. Если устойчивая работа регенераторов при формировании тактового синхросигнала обеспечивается при числе одинаковых символов не более 10, то в цифровых ВОСП применяются коды с $m < 10$, такие как $8B1C$ и $10B1C$.

Порядок выполнения работы

1 Изучите краткие сведения из теории и ответьте на контрольный вопрос, заданный преподавателем.

2 Выберите и запишите исходные данные для расчета из таблицы 3 в соответствии с заданным вариантом.

3 Используя теоретические сведения, закодируйте заданную по заданию кодовую последовательность, используя коды NRZ, RZ, CMI, DMI, CMI-3, код Миллера, ADI, AMI, Манчестерский код. Результат выполнения задания представьте в виде рисунка (см. рисунок 1).

4 Заданную по заданию кодовую последовательность закодируйте кодом 2В3В и 5В6В, используя таблицы 1 и 2.

5 Сделайте вывод по работе.

Таблица 3 – Исходные данные

Номер варианта	Кодовая последовательность	Номер варианта	Кодовая последовательность
1	101111110110111011011010	8	0010100111101110001101010
2	0101110100010111101000001	9	1010111011011000011010011
3	1111000100001111000110101	10	1100110010101011110110000
4	0101011110111000011100000	11	0001000110111011010100111
5	0000111101010100111000110	12	0101110101101000111010111
6	0101000011110101001011000	13	0000001101010111101110010
7	0101010001110100001111011	14	1110111100010101100111001

Содержание отчета

- 1 Ответ на контрольный вопрос.
- 2 Исходные данные для выполнения работы.
- 3 Закодированные кодовые комбинации.
- 4 Вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Требования, предъявляемые к кодам, используемым в ВОСП.
- 2 Параметры кодов.
- 3 Типы кодирования, используемого в ВОСП.
- 4 NRZ код и его недостатки.
- 5 RZ код и его недостатки.
- 6 Блочные коды.
- 7 Код 1В2В и его недостатки.
- 8 Отличия СМ1-1 и СМ1-2 кодов.
- 9 Отличия СМ1-2 и СМ1-3 кодов.
- 10 Отличия АМ1 и АД1 кодов.
- 11 Принцип работы Манчестерского кода.
- 12 Особенности кода Миллера.
- 13 Использование графа для представления переходов между кодовыми комбинациями.
- 14 Отличия энергетических спектров кодов.
- 15 Коды 5В6В и 7В8В.
- 16 Принцип кодирования *m*В1С кодов.