

Университет ИТМО
Факультет программной инженерии и компьютерной техники

Учебно-исследовательская работа №1 (УИР 1)
«Кодирование данных в телекоммуникационных системах»
по дисциплине “Телекоммуникационные системы”

Выполнили:
Студенты группы Р3332
Антипин Г. В.

Преподаватель:
Алиев Т. И.

Санкт-Петербург
2025 г.

Оглавление

Формирование сообщения	3
Физическое кодирование исходного сообщения	4
Манчестерский код.....	4
Потенциальный код без возврата к нулю (NRZ – Non Return to Zero).....	6
Дифференциальный манчестерский код.....	8
Биполярное кодирование с альтернативной версией (AMI)	10
Потенциальный код с инверсией при единице (NRZI).....	12
Сравнительный анализ методов физического кодирования	14
Логическое кодирование исходного сообщения	15
Избыточное кодирование (4B/5B)	15
Скремблирование	17
Сравнительный анализ методов логического кодирования.....	20
Вывод	21

Формирование сообщения

- Исходное сообщение: АнГВ
- В шестнадцатеричном коде: C0 ED C3 C2
- В двоичном коде: 1100 0000 1110 1101 1100 0011 1100 0010
- Длина сообщения: 4 байт (32 бит)

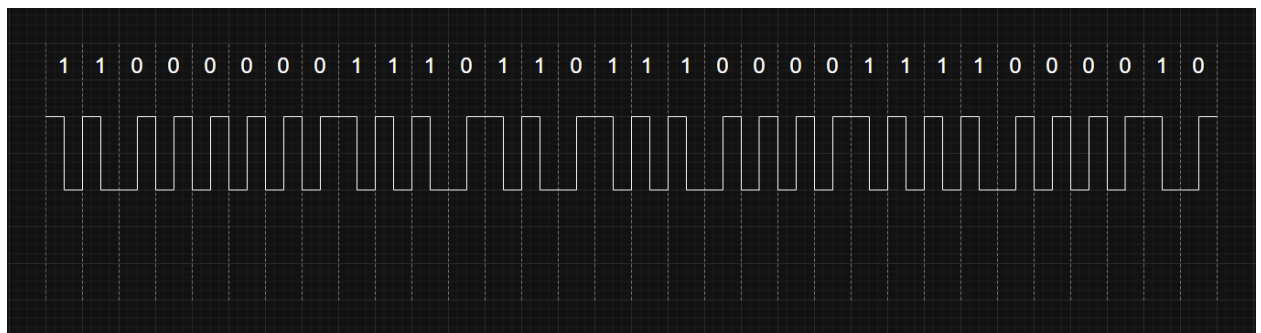
Физическое кодирование исходного сообщения

Рассмотрим кодирование данного сообщения 6 разными способами, а именно:

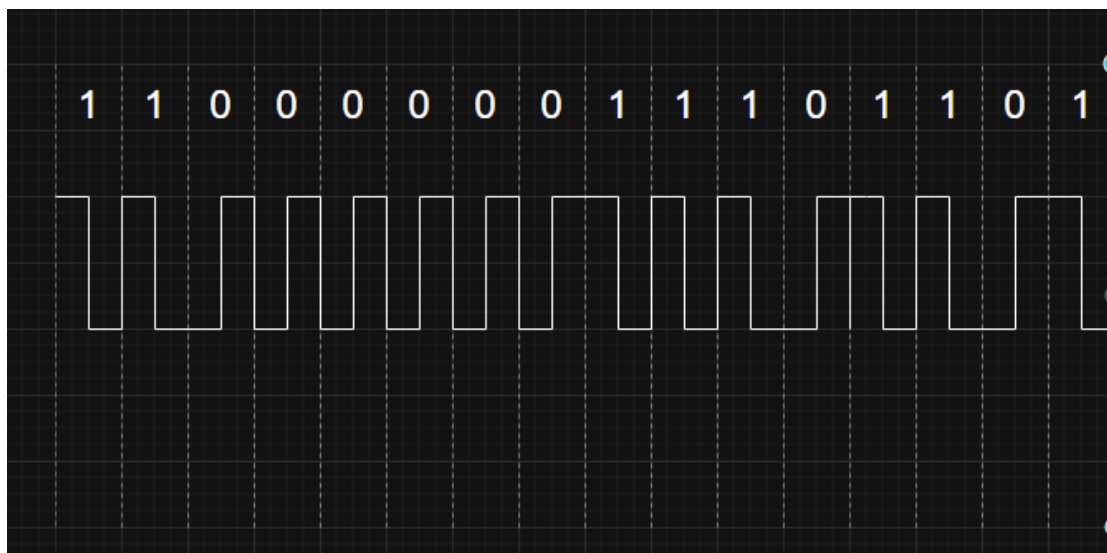
- Манчестерский код
- Потенциальный код без возврата к нулю
- Биполярный импульсный код
- Биполярное кодирование с альтернативной версией
- Потенциальный код с инверсией при единице
- Пятиуровневый код РАМ-5

Манчестерский код

Временная диаграмма кодирования первых 4 байт:



Временная диаграмма кодирования первых 2 байт:



Расчёт значений данного кодирования:

Расчёт верхней границы: $C = 100 \frac{\text{Мбит}}{с}$; $f_B = \frac{1}{T}$; $C = \frac{1}{t}$; $T = t \rightarrow f_B = C \text{ Гц} = 100 \text{ МГц}$;

Расчёт нижней границы: $T = 2t \rightarrow f_H = \frac{C}{2} \text{ Гц} = 50 \text{ МГц}$;

Следовательно спектр сообщения: $S = f_B - f_H = 0.5C \text{ Гц} = 50 \text{ МГц}$;

Средняя частота спектра: $f_{\text{ср}} = \frac{(21 f_0 + \frac{11 f_0}{2})}{32} = 0.828125 f_0 = 82,8125 \text{ МГц}$;

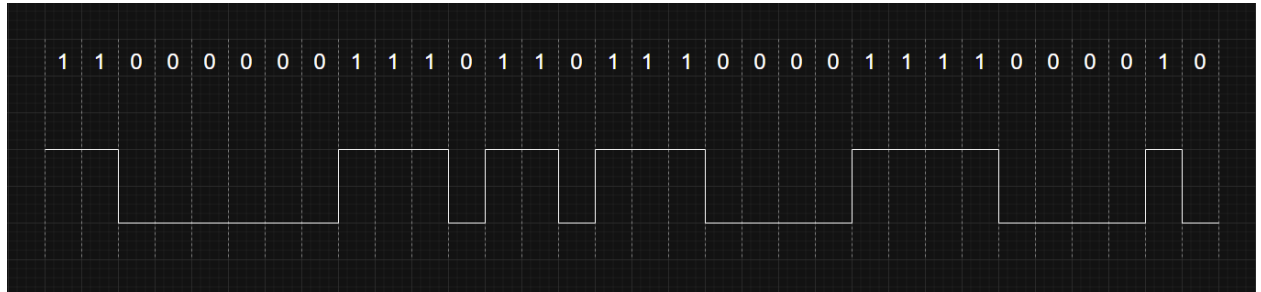
Середина спектра: $f_{\frac{1}{2}} = \frac{(f_B + f_H)}{2} = 75 \text{ МГц}$; $f_{\text{ср}} > f_{\frac{1}{2}} \Rightarrow$ следовательно в спектре сигнала преобладают высокие частоты.

Полоса пропускания, необходимая для точной передачи данного сообщения данным кодом, например: $F = 55 \text{ МГц}$;

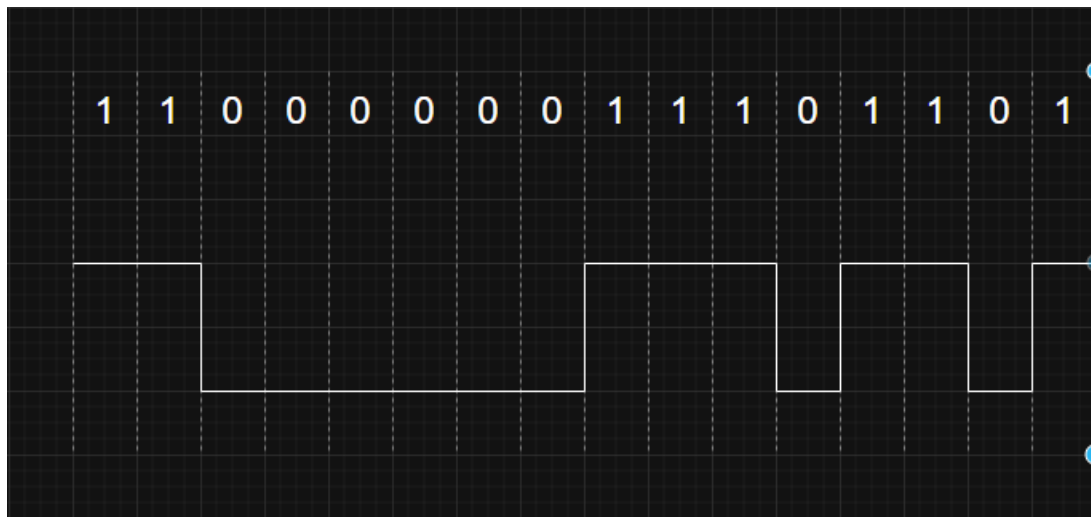
Отсюда можно сделать вывод, что манчестерский код очень даже неплох, так как не имеет постоянной составляющей и обладает способностью самосинхронизации. Но он уступает NRZ в спектре сигнала в общем случае, потому что больше, чем у потенциального. Также манчестерский имеет всего два уровня потенциала, что делает реализацию данного кодирования не очень дорогой.

Потенциальный код без возврата к нулю (NRZ – Non Return to Zero)

Временная диаграмма кодирования первых 4 байт:



Временная диаграмма кодирования первых 2 байт:



Расчёт верхней границы: $C = 100 \frac{\text{Мбит}}{c}$; $f_B = \frac{1}{T}$; $C = \frac{1}{t}$; $T = 2t \rightarrow f_B = \frac{c}{2}$ Гц = 50 МГц ;

Расчёт нижней границы: $T = 10t \rightarrow f_H = \frac{c}{10}$ Гц = 10 МГц ;

Следовательно спектр сообщения: $S = f_B - f_H = 0.4C$ Гц = 40 МГц ;

Средняя частота спектра: $f_{cp} = \frac{(3f_0 + \frac{8f_0}{2} + \frac{3f_0}{3} + \frac{8f_0}{4} + \frac{10f_0}{5})}{32} = 0.375f_0 = 18.75 \text{ МГц} ;$

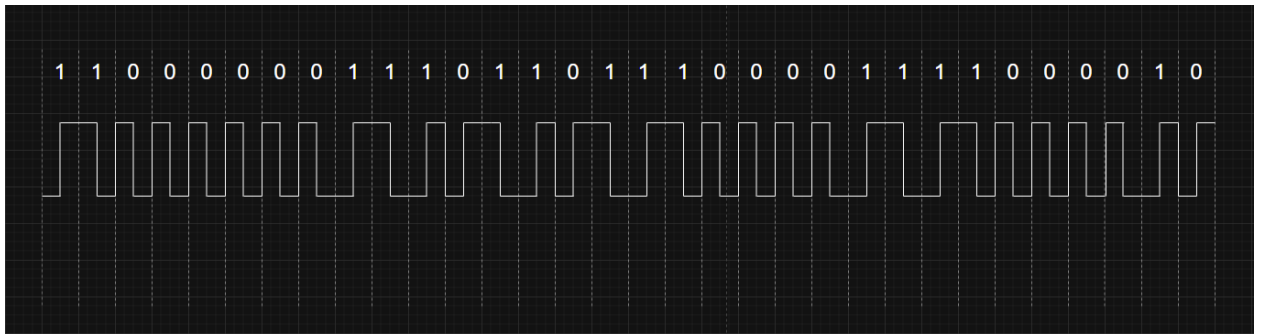
Середина спектра: $f_{\frac{1}{2}} = \frac{(f_B + f_H)}{2} = 30 \text{ МГц} ; f_{cp} < f_{\frac{1}{2}} \Rightarrow$ следовательно в спектре сигнала преобладают низкие частоты.

Полоса пропускания, необходимая для точной передачи данного сообщения данным кодом, например: $F = 45 \text{ МГц}$

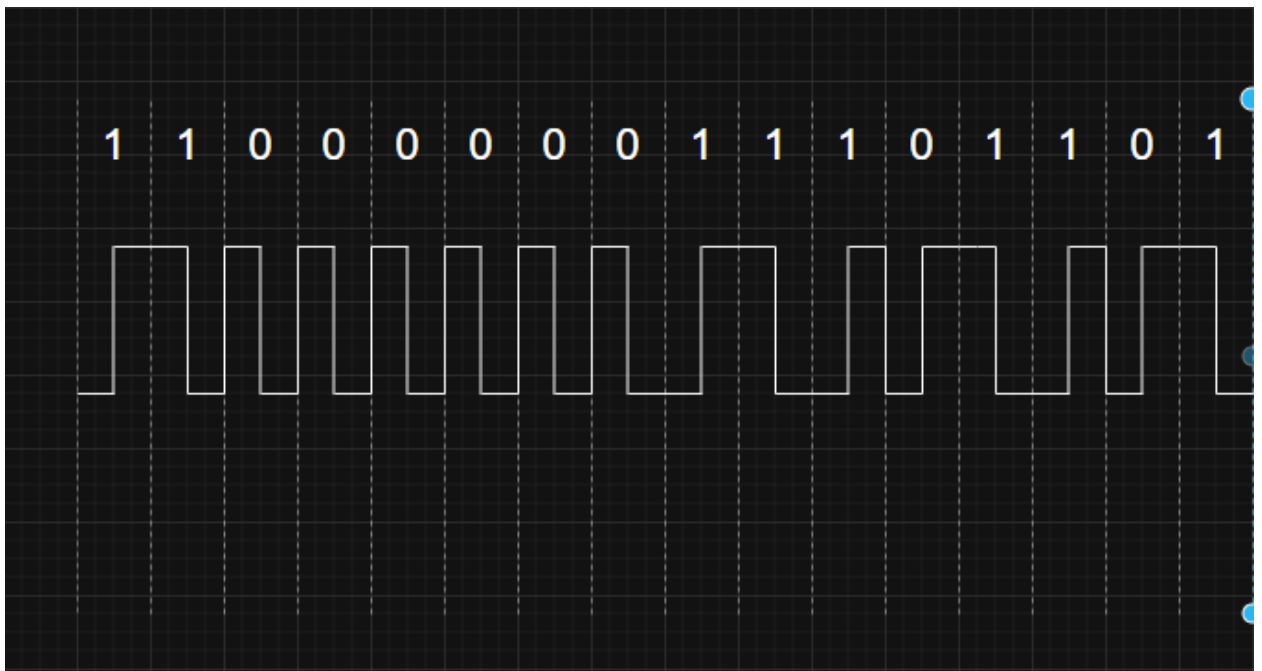
Отсюда можно сделать вывод, что потенциальный код уязвим к шумам и не обладает способностью распознавания ошибок. Также NRZ обладает постоянной составляющей и не имеет синхронизации. Но NRZ неплох в том, что в общем случае имеет относительно небольшой спектр сигнала. Также потенциальный код легко реализовать, и он имеет неплохую скорость передачи. В классическом виде на практике не используется.

Дифференциальный манчестерский код

Временная диаграмма кодирования первых 4 байт:



Временная диаграмма кодирования первых 2 байт:



Расчёт значений данного кодирования:

Расчёт верхней границы: $C = 100 \frac{\text{Мбит}}{\text{с}}$; $f_{\text{в}} = \frac{1}{T}$; $C = \frac{1}{t}$; $T = t \rightarrow f_{\text{в}} = C \text{ Гц} = 100 \text{ МГц}$;

Расчёт нижней границы: $T = 2t \rightarrow f_{\text{н}} = \frac{C}{2} \text{ Гц} = 50 \text{ МГц}$;

Следовательно спектр сообщения: $S = f_{\text{в}} - f_{\text{н}} = 0.5C \text{ Гц} = 50 \text{ МГц}$;

Средняя частота спектра: $f_{\text{ср}} = \frac{(21 f_0 + \frac{11 f_0}{2})}{32} = 0.828125 f_0 = 82,8125 \text{ МГц}$;

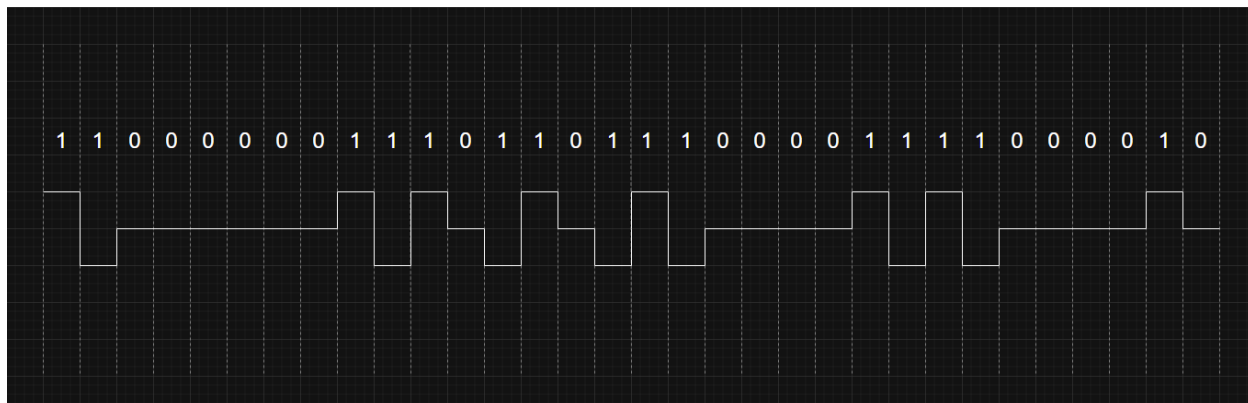
Середина спектра: $f_{\frac{1}{2}} = \frac{(f_{\text{в}} + f_{\text{н}})}{2} = 75 \text{ МГц}$; $f_{\text{ср}} > f_{\frac{1}{2}} \Rightarrow$ следовательно в спектре сигнала преобладают высокие частоты.

Полоса пропускания, необходимая для точной передачи данного сообщения данным кодом, например: $F = 55 \text{ МГц}$;

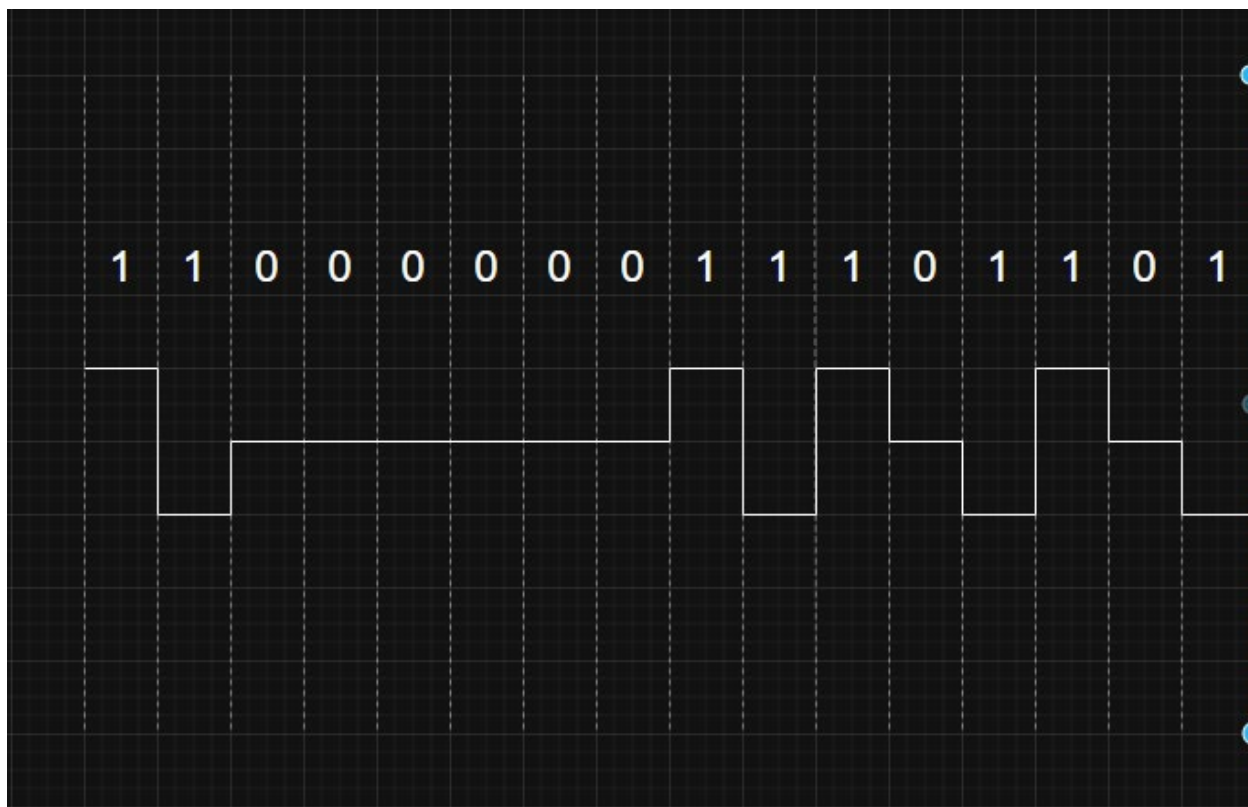
Отсюда можно сделать вывод, что манчестерский код очень даже неплох, так как не имеет постоянной составляющей и обладает способностью самосинхронизации. Но он уступает NRZ в спектре сигнала в общем случае, потому что больше, чем у потенциального. Также манчестерский имеет всего два уровня потенциала, что делает реализацию данного кодирования не очень дорогой.

Биполярное кодирование с альтернативной версией (AMI)

Временная диаграмма кодирования первых 4 байт:



Временная диаграмма кодирования первых 2 байт:



Расчёт верхней границы: $C = 100 \frac{\text{Мбит}}{c}$; $f_B = \frac{1}{T}$; $C = \frac{1}{t}$; $T = 2t \rightarrow f_B = \frac{C}{2}$ Гц = 50 МГц ;

Расчёт нижней границы: $T = 14t \rightarrow f_H = \frac{C}{14}$ Гц = 7.143 МГц ;

Следовательно спектр сообщения: $S = f_B - f_H = 0.42857C$ Гц = 42.857 МГц ;

Средняя частота спектра: $f_{\text{ср}} = \frac{(12f_0 + \frac{10f_0}{7} + \frac{4f_0}{6} + \frac{6f_0}{5})}{32} = 0.47798f_0 = 47.798 \text{ МГц}$

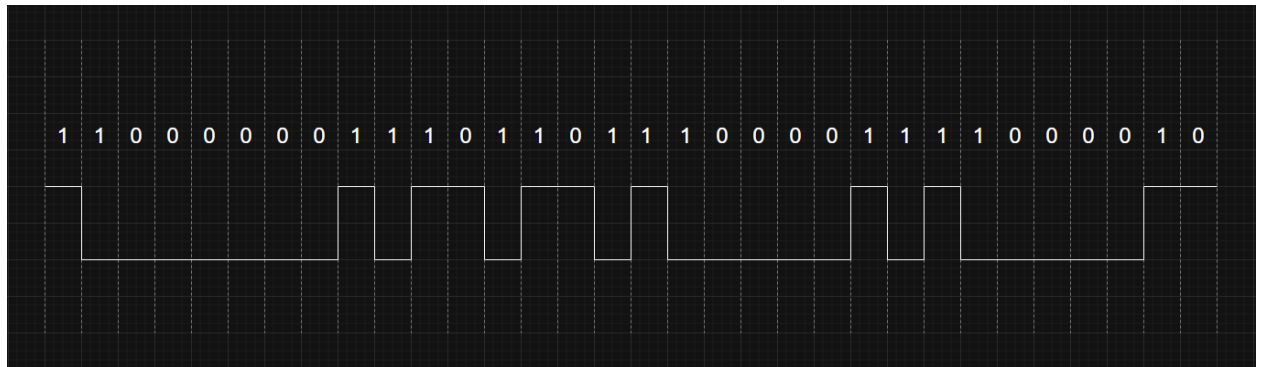
Середина спектра: $f_{\frac{1}{2}} = \frac{(f_{\text{в}} + f_{\text{н}})}{2} = 28.5715 \text{ МГц}$; $f_{\text{ср}} > f_{\frac{1}{2}} \Rightarrow$ следовательно в спектре сигнала преобладают высокие частоты.

Полоса пропускания, необходимая для точной передачи данного сообщения данным кодом, например: $F = 45 \text{ МГц}$

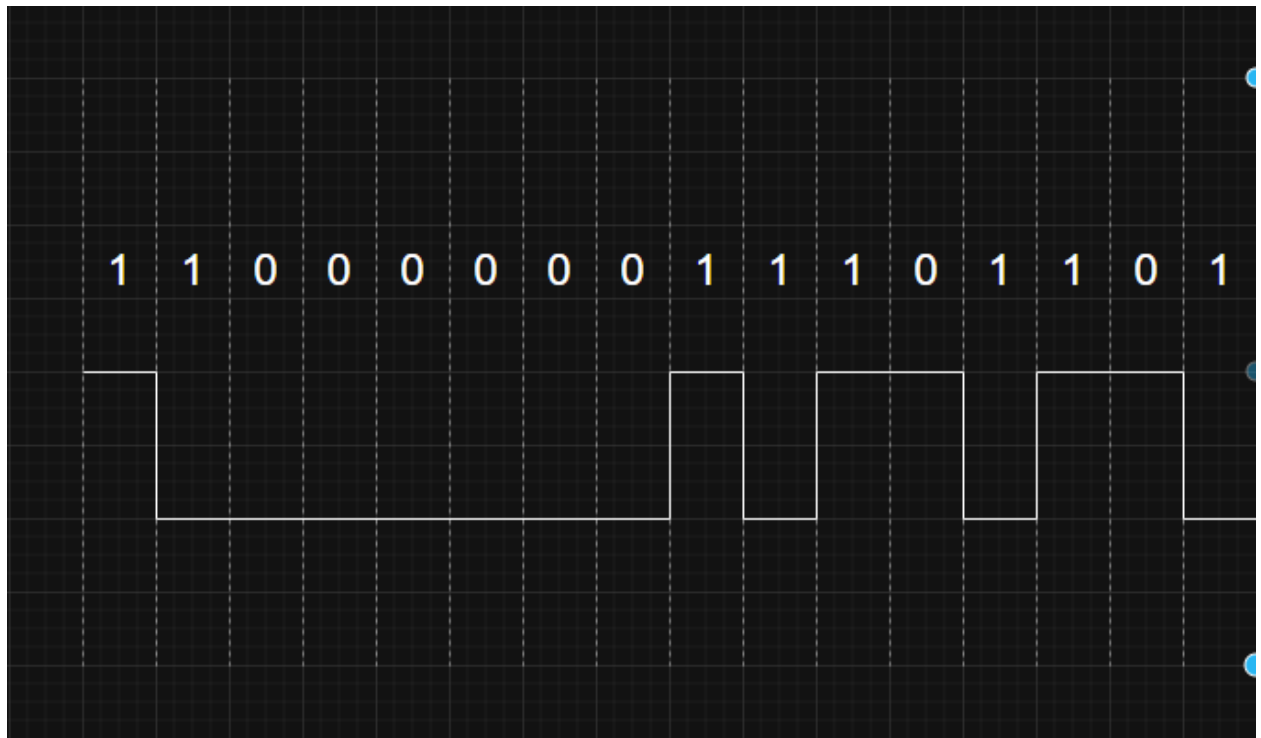
Отсюда сделаем вывод, что АМІ крайне плох для нашего сообщения, он обладает достаточно широким спектром, страдает от постоянных составляющих, не имеет самосинхронизации, да и к тому же имеет 3 уровня потенциала. У АМІ есть только один плюс в нашем случае – это обнаружение ошибок, благодаря чередованию единиц.

Потенциальный код с инверсией при единице (NRZI)

Временная диаграмма кодирования первых 4 байт:



Временная диаграмма кодирования первых 2 байт:



Расчёт верхней границы: $C = 100 \frac{\text{Мбит}}{\text{с}}$; $f_{\text{в}} = \frac{1}{T}$; $C = \frac{1}{t}$; $T = 2t \rightarrow f_{\text{в}} = \frac{C}{2} \text{ Гц} = 50 \text{ МГц}$;

Расчёт нижней границы: $T = 12t \rightarrow f_{\text{н}} = \frac{C}{12} \text{ Гц} = 8.333 \text{ МГц}$;

Следовательно спектр сообщения: $S = f_{\text{в}} - f_{\text{н}} = 0.417C \text{ Гц} = 41.667 \text{ МГц}$;

Средняя частота спектра: $f_{\text{ср}} = \frac{(6f_0 + \frac{2f_0}{2} + \frac{3f_0}{3} + \frac{4f_0}{4} + \frac{5f_0}{5} + \frac{12f_0}{6})}{32} = 0.375f_0 = 18.75 \text{ МГц}$

Середина спектра: $f_{\frac{1}{2}} = \frac{(f_{\text{в}} + f_{\text{н}})}{2} = 29.1665 \text{ МГц}$; $f_{\text{ср}} < f_{\frac{1}{2}} \Rightarrow$ следовательно в спектре сигнала преобладают низкие частоты.

Полоса пропускания, необходимая для точной передачи данного сообщения данным кодом, например: $F = 45 \text{ МГц}$

Неплохой способ передачи сообщения, но постоянные составляющие, отсутствие самосинхронизации и спектр шире, чем у NRZ, не делает этот метод полезным для нас.

Сравнительный анализ методов физического кодирования

Временная диаграмма всех методов кодирования первых 4 байт для сравнения:

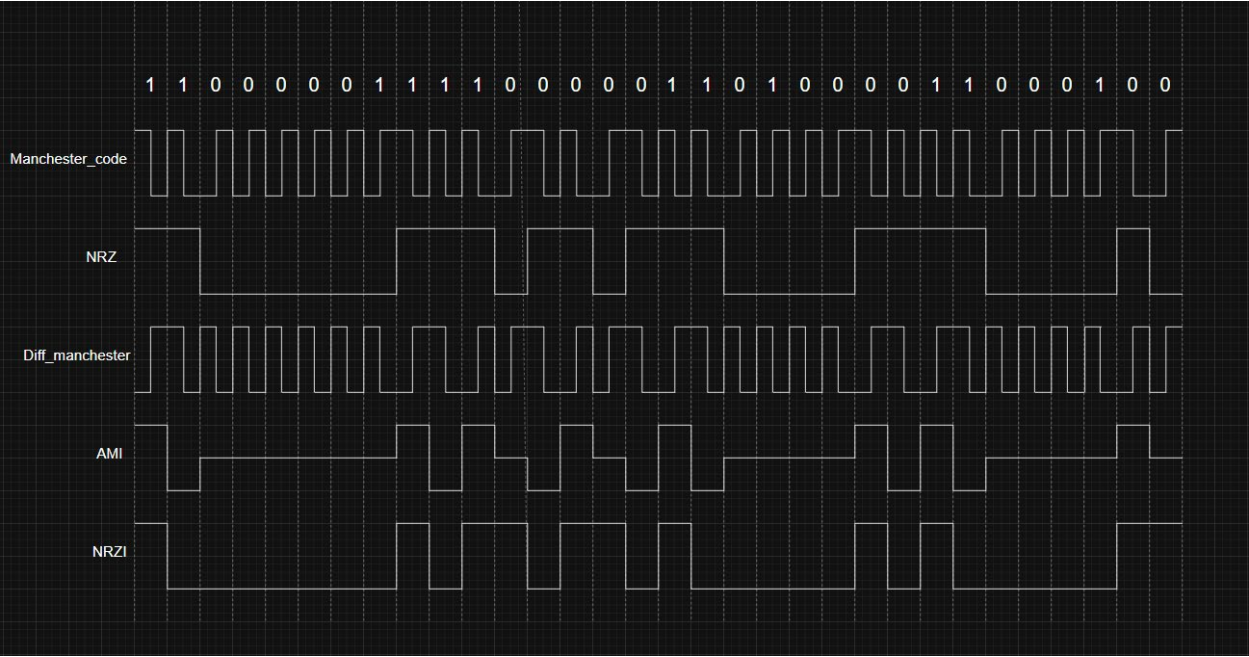


Таблица сравнения всех методов:

	1	2	3	4	5
Manchester	$f_0 = C$	Есть	Нет	Нет	2
NRZ	$f_0 = \frac{C}{2}$	Нет	Есть	Нет	2
Diff manchester	$f_0 = C$	Есть	Нет	нет	2
AMI	$f_0 = \frac{C}{2}$	Нет	Есть	Есть	3
NRZI	$f_0 = \frac{C}{2}$	Нет	Есть	Нет	2

Параметры сравнения:

1. Спектр сигнала
2. Самосинхронизация
3. Постоянная составляющая
4. Обнаружение ошибок
5. Стоимость реализации

Теперь определим два наилучших физических метода кодирования для данного сообщения.

NRZ и NRZI – теряют переходы при длинных нулях -> не подходит

AMI – дает провалы синхронизации при длинных нулях -> не подходит

Манчестерский и дифф манчестерский – самосинхронизируются и

устойчивы к длинным сериям нулей -> лучше всего подходит

Логическое кодирование исходного сообщения

Избыточное кодирование (4B/5B)

Воспользуемся таблицей перекодировки:

Исходные символы	Результирующие символы	Исходные символы	Результирующие символы
0000	11110	1000	10010
0001	01001	1001	10011
0010	10100	1010	10110
0011	10101	1011	10111
0100	01010	1100	11010
0101	01011	1101	11011
0110	01110	1110	11100
0111	01111	1111	11101

Исходное сообщение: $A = 1100\ 0000\ 1110\ 1101\ 1100\ 0011\ 1100\ 0010$

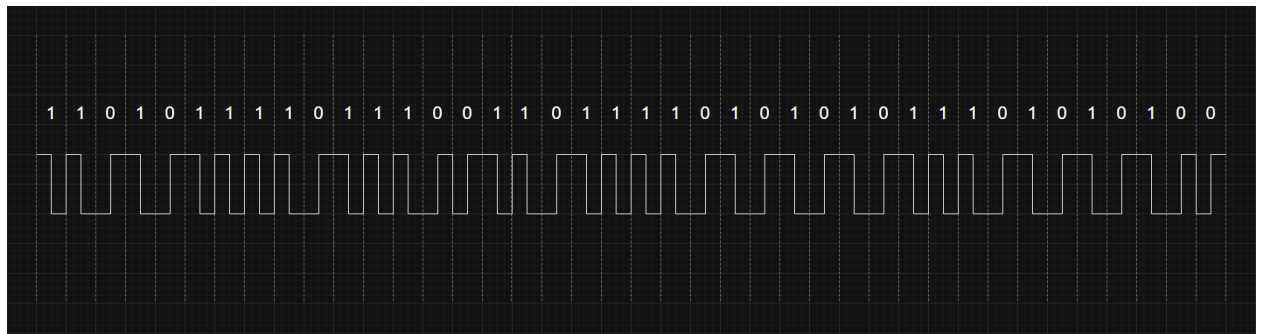
Результат: $B = 11010\ 11110\ 11100\ 11011\ 11010\ 10101\ 11010\ 10100$

Шестнадцатеричный код: D7 B9 BD 5A A8

Длина сообщения: 40 бит (5 байт)

Избыточность 25%

Временная диаграмма для манчестерского кода, модифицированного с помощью избыточного кодирования:



Расчёт верхней границы: $C = 100 \frac{\text{Мбит}}{c}$; $f_B = \frac{1}{T}$; $C = \frac{1}{t}$; $T = t \rightarrow f_B = C \text{ Гц} = 100 \text{ МГц}$;

Расчёт нижней границы: $T = 2t \rightarrow f_H = \frac{C}{2} \text{ Гц} = 50 \text{ МГц}$;

Следовательно спектр сообщения: $S = f_B - f_H = 0.5C \text{ Гц} = 50 \text{ МГц}$;

Средняя частота спектра: $f_{\text{ср}} = \frac{(20 f_0 + \frac{20 f_0}{2})}{40} = 0.75 f_0 = 75 \text{ МГц}$;

Середина спектра: $f_{\frac{1}{2}} = \frac{(f_B + f_H)}{2} = 75 \text{ МГц}$; $f_{\text{ср}} = f_{\frac{1}{2}} \Rightarrow$ следовательно в спектре сигнала не преобладают ни высокие, ни низкие частоты.

Полоса пропускания, необходимая для точной передачи данного сообщения данным кодом, например: $F = 55 \text{ МГц}$;

Так как избыточное кодирование применяется для модификации физического кодирования рассмотрим, как манчестерский код улучшился. Так как мы использовали манчестерский код спектр сигнала никак не изменился, но мы получили возможность обнаруживать ошибки в передаче сообщения, благодаря запрещённым кодировкам. Но в целом избыточное кодирование никак сильно не повлияло на качество кодирования.

Скремблирование

Исходное сообщение: $A = 1100\ 0000\ 1110\ 1101\ 1100\ 0011\ 1100\ 0010$

Полином для скремблирования: $B_i = A_i \oplus B_{i-3} \oplus B_{i-5}$;

Выбор обосновывается тем, что первые три символа это 110, поэтому не будет постоянной составляющей и такой выбор выгоден для нас.

$$B_1 = A_1 = 1;$$

$$B_2 = A_2 = 1;$$

$$B_3 = A_3 = 0;$$

$$B_4 = A_4 \oplus B_1 = 0 \oplus 1 = 1;$$

$$B_5 = A_5 \oplus B_2 = 0 \oplus 1 = 1;$$

$$B_6 = A_6 \oplus B_3 \oplus B_1 = 0 \oplus 0 \oplus 1 = 1;$$

$$B_7 = A_7 \oplus B_4 \oplus B_2 = 0 \oplus 1 \oplus 1 = 0;$$

$$B_8 = A_8 \oplus B_5 \oplus B_3 = 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1;$$

$$B_9 = A_9 \oplus B_6 \oplus B_4 = 1 \oplus 1 \oplus 1 = 1;$$

$$B_{10} = A_{10} \oplus B_7 \oplus B_5 = 1 \oplus 0 \oplus 1 = 0;$$

$$B_{11} = A_{11} \oplus B_8 \oplus B_6 = 1 \oplus 1 \oplus 1 = 1;$$

$$B_{12} = A_{12} \oplus B_9 \oplus B_7 = 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1;$$

$$B_{13} = A_{13} \oplus B_{10} \oplus B_8 = 1 \oplus 0 \oplus 1 = 0;$$

$$B_{14} = A_{14} \oplus B_{11} \oplus B_9 = 1 \oplus 1 \oplus 1 = 1;$$

$$B_{15} = A_{15} \oplus B_{12} \oplus B_{10} = 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1;$$

$$B_{16} = A_{16} \oplus B_{13} \oplus B_{11} = 1 \oplus 0 \oplus 1 = 0;$$

$$B_{17} = A_{17} \oplus B_{14} \oplus B_{12} = 1 \oplus 1 \oplus 1 = 1;$$

$$B_{18} = A_{18} \oplus B_{15} \oplus B_{13} = 1 \oplus 1 \oplus 0 = 0;$$

$$B_{19} = A_{19} \oplus B_{16} \oplus B_{14} = 0 \oplus 0 \oplus 1 = 1;$$

$$B_{20} = A_{20} \oplus B_{17} \oplus B_{15} = 0 \oplus 1 \oplus 1 = 0;$$

$$B_{21} = A_{21} \oplus B_{18} \oplus B_{16} = 0 \oplus 0 \oplus 0 = 0;$$

$$B_{22} = A_{22} \oplus B_{19} \oplus B_{17} = 0 \oplus 1 \oplus 1 = 0;$$

$$B_{23} = A_{23} \oplus B_{20} \oplus B_{18} = 1 \oplus 0 \oplus 0 = 1;$$

$$B_{24} = A_{24} \oplus B_{21} \oplus B_{19} = 1 \oplus 0 \oplus 1 = 0;$$

$$B_{25} = A_{25} \oplus B_{22} \oplus B_{20} = 1 \oplus 0 \oplus 0 = 1;$$

$$B_{26} = A_{26} \oplus B_{23} \oplus B_{21} = 1 \oplus 1 \oplus 0 = 0;$$

$$B_{27} = A_{27} \oplus B_{24} \oplus B_{22} = 0 \oplus 0 \oplus 0 = 0;$$

$$B_{28} = A_{28} \oplus B_{25} \oplus B_{23} = 0 \oplus 1 \oplus 1 = 0;$$

$$B_{29} = A_{29} \oplus B_{26} \oplus B_{24} = 0 \oplus 0 \oplus 0 = 0;$$

$$B_{30} = A_{30} \oplus B_{27} \oplus B_{25} = 0 \oplus 0 \oplus 1 = 1;$$

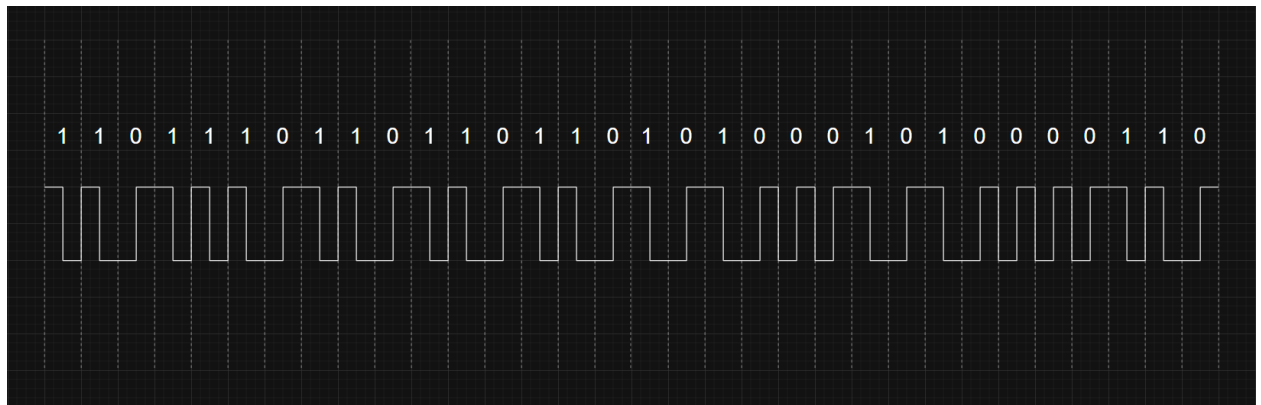
$$B_{31} = A_{31} \oplus B_{28} \oplus B_{26} = 1 \oplus 0 \oplus 0 = 1;$$

$$B_{32} = A_{32} \oplus B_{29} \oplus B_{27} = 0 \oplus 1 \oplus 1 = 0;$$

Результат: $B = 1101\ 1101\ 1011\ 0110\ 1010\ 0010\ 1000\ 0110$

Шестнадцатеричный код: DD B6 A2 86

Временная диаграмма для манчестерского кода, модифицированного с помощью скремблирования:



Расчёт верхней границы: $C = 100 \frac{\text{Мбит}}{c}$; $f_B = \frac{1}{T}$; $C = \frac{1}{t}$; $T = t \rightarrow f_B = C \text{ Гц} = 100 \text{ МГц}$;

Расчёт нижней границы: $T = 2t \rightarrow f_H = \frac{C}{2} \text{ Гц} = 50 \text{ МГц}$;

Следовательно спектр сообщения: $S = f_B - f_H = 0.5C \text{ Гц} = 50 \text{ МГц}$;

Средняя частота спектра: $f_{cp} = \frac{(21 f_0 + \frac{19 f_0}{2})}{40} = 0.7625 f_0 = 76.25 \text{ МГц}$;

Середина спектра: $f_{\frac{1}{2}} = \frac{(f_B + f_H)}{2} = 75 \text{ МГц}$; $f_{cp} > f_{\frac{1}{2}} \Rightarrow$ следовательно в спектре сигнала преобладают высокие частоты.

Полоса пропускания, необходимая для точной передачи данного сообщения данным кодом, например: $F = 55 \text{ МГц}$;

Отсюда мы можем сделать вывод, что скремблирование и вправду помогло избавиться от длинных последовательностей нулей и единиц, и если бы мы использовали какой-либо код, находящийся в зоне риска постоянных составляющих, то скремблирование нам бы очень помогло. Но так как мы выбрали скремблировать манчестерский код, то скремблирование не дало нам никакой выгоды.

Сравнительный анализ методов логического кодирования

Таблица сравнения методов кодирования:

	1	2	3	4	5
Избыточное	$f_0 = C$	Есть	Нет	Есть	2
Скремблирование	$f_0 = C$	Есть	Нет	Нет	2

Параметры сравнения:

1. Спектр сигнала
2. Самосинхронизация
3. Постоянная составляющая
4. Обнаружение ошибок
5. Стоимость реализации

Таким образом, можно заключить, что избыточное кодирование оказывается значительно более эффективным для модификации манчестерского кода, чем скремблирование.

Скремблирование не приносит практической пользы для манчестерского кодирования и конкретно для данного сообщения, а также требует заметных затрат на реализацию как скремблера, так и дескремблера.

В то же время избыточное кодирование отличается простотой реализации и позволяет обнаруживать ошибки благодаря использованию запрещённых комбинаций.

Вывод

В ходе лабораторной работы мы изучили основные методы кодирования: NRZ, NRZI, AMI, Манчестерское и Дифференциальное манчестерское. Анализ показал, что для нашего сообщения лучше всего подходят манчестерское и дифференциальное манчестерское кодирования — они обеспечивают надёжную синхронизацию, не имеют постоянной составляющей и просты в реализации.

Методы NRZ и NRZI теряют синхронизацию при длинных сериях одинаковых бит, а AMI хотя и убирает постоянную составляющую, уступает по устойчивости к ошибкам.

Скремблирование в манчестерском коде не даёт пользы, так как он уже самосинхронизируется, зато избыточное кодирование позволяет обнаруживать ошибки.

Однако избыточность снижает скорость передачи, поэтому оптимально передавать сообщение обычным манчестерским или дифференциальным манчестерским кодом.

Для NRZ же скремблирование было бы полезным — оно устранило бы постоянную составляющую и повысило надёжность передачи.