



Факультет программной инженерии и компьютерной техники

Домашнее задание
по дисциплине «Компьютерные сети»
Вариант: ЧМВ

Выполнила:

Студент группы Р3332

Чмурова М.В.

Преподаватель:

Алиев Тауфик Измайлович

Санкт-Петербург

2025

Оглавление

<i>Цель работы.....</i>	<i>3</i>
<i>Этап 1. Формирование сообщения</i>	<i>3</i>
<i>Этап 2. Физическое кодирование исходного сообщения</i>	<i>3</i>
<i>Потенциальный код с инверсией при единице (NRZI).....</i>	<i>5</i>
<i>Пятиуровневый метод РМ-5</i>	<i>7</i>
<i>Манчестерский код (Манчестер 2).....</i>	<i>9</i>
<i>Сравнительный анализ</i>	<i>11</i>
<i>Логическое (избыточное) кодирование.....</i>	<i>12</i>
<i>Скремблирование.....</i>	<i>15</i>
<i>Сравнительный анализ результатов кодирования</i>	<i>19</i>
<i>Вывод</i>	<i>20</i>

Цель работы

Изучение физического и логического кодирования, используемых в цифровых сетях передачи данных

Этап 1. Формирование сообщения

Исходное сообщение: ЧМВ

В шестнадцатеричном коде: D7 CC C2

В двоичном коде: 1101 0111 1100 1100 1100 0010

Длина сообщения: 3 байта (24 бита)

Этап 2. Физическое кодирование исходного сообщения

Потенциальный код без возврата к нулю (NRZ)

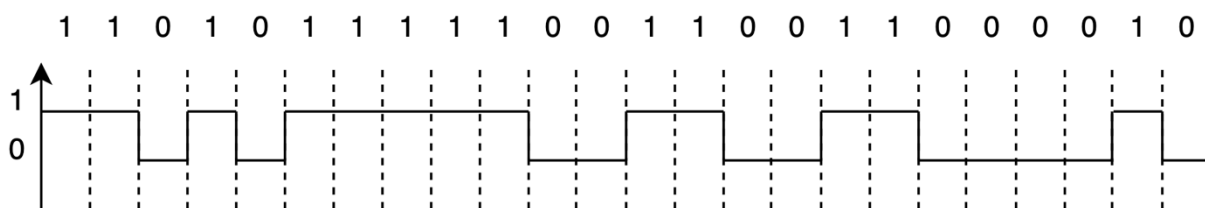


Рисунок 1. NRZ-кодирование исходного сообщения

Для определения верхней границы частот нужно найти наиболее высокочастотную составляющую спектра в передаваемом сообщении. В NRZ она образуется при передаче чередующихся значений 0 и 1. В этот момент период гармонического сигнала для передачи прямоугольных сигналов 0 и 1 будет равен удвоенной длительности битового интервала. $T = 2t_b$, а $t_b = \frac{1}{C}$.

Таким образом, верхняя граница частот:

$$f_b = \frac{1}{T} = \frac{C}{2} = 50 \text{ [МГц]}$$

Битовый интервал: $t_b = 10 \text{ [нс]}$. А наименьшая, нижняя частота достигается при передаче длинных (в пределе – бесконечных)

последовательностей нулей и единиц, что делает нижнюю границу частот близкой и в пределе равной нулю: $f_H = 0$

Тогда в предельном случае спектр: $S = f_B - f_H = f_B = \frac{C}{2} = 50$ [МГц]

Однако при передаче конкретного сообщения нижняя частота зависит от максимальной длины последовательностей нулей и единиц, а также всегда больше нуля. Тогда найдем максимальную последовательность 0 или 1. В данном сообщении низкочастотная составляющая формируется при передаче 5 последовательных единиц. Период синусоидального сигнала при передаче таких последовательностей равен 10 битовым интервалам. Таким образом, нижняя границы частот будет равна:

$$f_H = \frac{1}{10t_b} = \frac{C}{10} = 10 \text{ [МГц]}$$

Тогда спектр при передаче данного сообщения кодом NRZ равен:

$$S = f_B - f_H = \frac{C}{2} - \frac{C}{10} = \frac{2C}{5} = 40 \text{ [МГц]}$$

Среднее значение частоты передаваемого сообщения находится в интервале $(f_H; f_B)$ и показывает какие частоты преобладают в спектре сигнала для передачи. Для оценки для каждого битового интервала определяется соответствующая частота сигнала, они суммируются и делится на количество битовых интервалов. Тогда средняя частота рассматриваемого сообщения:

$$f_{cp} = \frac{\left(5f_0 + 10\frac{f_0}{2} + 4\frac{f_0}{4} + 5\frac{f_0}{5}\right)}{24} = 25 \text{ [МГц]}$$

Середина спектра $f_{1/2} = \frac{f_H + f_B}{2} = \frac{\frac{C}{10} + \frac{C}{2}}{2} = \frac{3C}{10} = 30$ [МГц]. Так как $f_{cp} < f_{1/2}$, то можно констатировать, что в спектре сигнала незначительно преобладают низкие частоты.

Для качественного распознавания сигнала на приемной стороне при передаче чередующихся значений 0 и 1 достаточно сформировать сигнал, содержащий первые 4 гармоники (так как более высокочастотные гармоники

оказывают незначительное влияние на результирующий сигнал) с частоты $f_0 = \frac{C}{2}, f_1 = 3f_0, f_2 = 5f_0, f_3 = 7f_0$. Тогда верхняя граница частот $f_B = 7f_0$, а ширина спектра будет равна:

$$S = f_B - f_H = 7f_0 - \frac{f_0}{5} = 340 \text{ [МГц]}$$

Таким образом:

- Верхняя граница $f_B = 50 \text{ [МГц]}$
- Нижняя граница $f_H = 10 \text{ [МГц]}$
- Спектр сигнала $S = 40 \text{ [МГц]}$
- Среднее значение частоты $f_{cp} = 25 \text{ [МГц]}$
- Необходимая полоса пропускания $F = 340 \text{ [МГц]}$

Потенциальный код с инверсией при единице (NRZI)

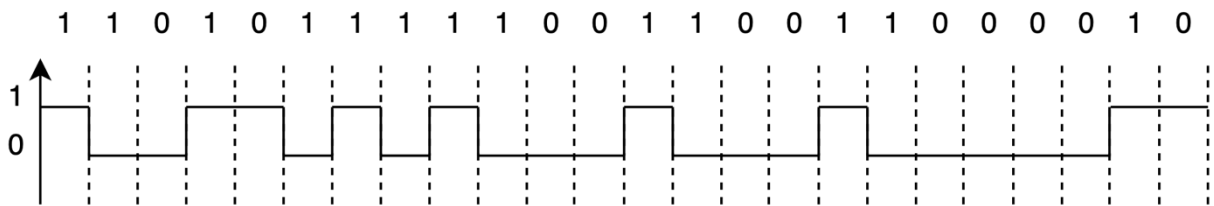


Рисунок 2. NRZI-кодирование исходного сообщения

Для определения верхней границы частот нужно найти наиболее высокочастотную составляющую спектра в передаваемом сообщении. В NRZI она образуется при передаче чередующихся значений 0 и 1. В этот момент период гармонического сигнала для передачи прямоугольных сигналов 0 и 1 будет равен удвоенной длительности битового интервала. $T = 2t_b$, а $t_b = \frac{1}{C}$. Таким образом, верхняя граница частот:

$$f_B = \frac{1}{T} = \frac{C}{2} = 50 \text{ [МГц]}$$

Битовый интервал: $t_b = 10 \text{ [нс]}$. А наименьшая, нижняя частота достигается при передаче длинных (в пределе – бесконечных)

последовательностей нулей и единиц, что делает нижнюю границу частот близкой и в пределе равной нулю: $f_H = 0$

Тогда в предельном случае спектр: $S = f_B - f_H = f_B = \frac{C}{2} = 50$ [МГц]

Однако при передаче конкретного сообщения нижняя частота зависит от максимальной длины последовательностей нулей и единиц, а также всегда больше нуля. Тогда найдем максимальную последовательность 0 или 1. В данном сообщении низкочастотная составляющая формируется при передаче 4 последовательных нулей. Период синусоидального сигнала при передаче таких последовательностей равен 10 битовым интервалам. Таким образом, нижняя границы частот будет равна:

$$f_H = \frac{1}{10t_b} = \frac{C}{10} = 10 \text{ [МГц]}$$

Тогда спектр при передаче данного сообщения кодом NRZ равен:

$$S = f_B - f_H = \frac{C}{2} - \frac{C}{10} = \frac{2C}{5} = 40 \text{ [МГц]}$$

Среднее значение частоты передаваемого сообщения находится в интервале $(f_H; f_B)$ и показывает какие частоты преобладают в спектре сигнала для передачи. Для оценки для каждого битового интервала определяется соответствующая частота сигнала, они суммируются и делятся на количество битовых интервалов. Тогда средняя частота рассматриваемого сообщения:

$$f_{cp} = \frac{(7f_0 + 6\frac{f_0}{2} + 6\frac{f_0}{3} + 5\frac{f_0}{5})}{24} = \frac{13f_0}{24} = 27.083 \text{ [МГц]}$$

Середина спектра $f_{1/2} = \frac{f_H + f_B}{2} = \frac{\frac{C}{10} + \frac{C}{2}}{2} = \frac{3C}{10} = 30$ [МГц]. Так как $f_{cp} < f_{1/2}$, то можно констатировать, что в спектре сигнала незначительно преобладают низкие частоты.

Для качественного распознавания сигнала на приемной стороне при передаче чередующихся значений 0 и 1 достаточно сформировать сигнал, содержащий первые 4 гармоники (так как более высокочастотные гармоники

оказывают незначительное влияние на результирующий сигнал) с частоты $f_0 = \frac{c}{2}, f_1 = 3f_0, f_2 = 5f_0, f_3 = 7f_0$. Тогда верхняя граница частот $f_B = 7f_0$, а ширина спектра будет равна:

$$S = f_B - f_H = 7f_0 - \frac{f_0}{5} = 340 \text{ [МГц]}$$

Таким образом:

- Верхняя граница $f_B = 50 \text{ [МГц]}$
- Нижняя граница $f_H = 10 \text{ [МГц]}$
- Спектр сигнала $S = 40 \text{ [МГц]}$
- Среднее значение частоты $f_{cp} = 27.083 \text{ [МГц]}$
- Необходимая полоса пропускания $F = 340 \text{ [МГц]}$

Пятиуровневый метод РАМ-5

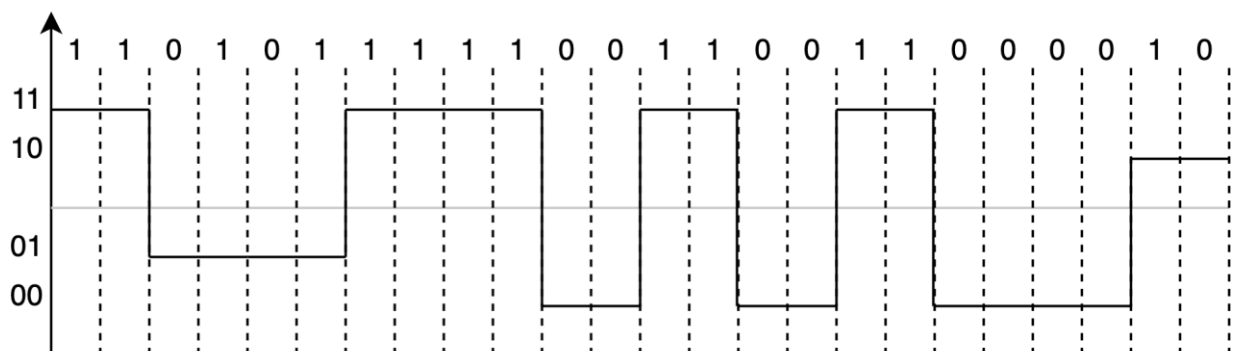


Рисунок 3. РАМ-5 кодирование исходного сообщения

Для определения верхней границы частот нужно найти наиболее высокочастотную составляющую спектра в передаваемом сообщении. В РАМ-5 она образуется при передаче сменяющихся пар нулей и единиц. В этот момент период гармонического сигнала для передачи прямоугольных сигналов 0 и 1 будет равен: $T = 4t_b$, а $t_b = \frac{1}{c}$. Таким образом, верхняя граница частот:

$$f_B = \frac{1}{T} = \frac{c}{4} = 25 \text{ [МГц]}$$

Битовый интервал: $t_b = 10$ [нс]. А наименьшая, нижняя частота достигается при передаче длинных (в пределе – бесконечных) неизменяемых последовательностей 0 и 1. В данном случае это последовательность из 4 бит. Тогда период синусоидального сигнала будет составлять 8 битовых интервалов. Тогда нижняя граница частот будет: $f_n = \frac{1}{T} = \frac{C}{8} = 12,5$ [МГц]

Тогда спектр при передаче данного сообщения кодом РАМ-5 равен:

$$S = f_b - f_n = 25 - 12,5 = 12,5 \text{ [МГц]}$$

Среднее значение частоты передаваемого сообщения находится в интервале $(f_n; f_b)$ и показывает какие частоты преобладают в спектре сигнала для передачи. Для оценки для каждого битового интервала определяется соответствующая частота сигнала, они суммируются и делится на количество битовых интервалов. Тогда средняя частота рассматриваемого сообщения:

$$f_{cp} = \frac{(12f_0 + 12\frac{f_0}{2})}{24} = \frac{3f_0}{4} = 18,75 \text{ [МГц]}$$

Середина спектра $f_{1/2} = \frac{f_n + f_b}{2} = \frac{\frac{C}{8} + \frac{C}{4}}{2} = \frac{3C}{16} = 18,75$ [МГц]. Так как $f_{cp} = f_{1/2}$, то можно констатировать, что в спектре сигнала низкие и высокие частоты равны.

Для качественного распознавания сигнала на приемной стороне при передаче чередующихся значений 0 и 1 достаточно сформировать сигнал, содержащий первые 4 гармоники (так как более высокочастотные гармоники оказывают незначительное влияние на результирующий сигнал) с частоты $f_0 = \frac{C}{2}, f_1 = 3f_0, f_2 = 5f_0, f_3 = 7f_0$. Тогда верхняя граница частот $f_b = 7f_0$, а ширина спектра будет равна:

$$S = f_b - f_n = 7f_0 - \frac{f_0}{2} = 162,5 \text{ [МГц]}$$

Таким образом:

- Верхняя граница $f_b = 25$ [МГц]

- Нижняя граница $f_n = 12,5$ [МГц]
- Спектр сигнала $S = 12,5$ [МГц]
- Среднее значение частоты $f_{cp} = 18,75$ [МГц]
- Необходимая полоса пропускания $F = 165$ [МГц]

Манчестерский код (Манчестер 2)

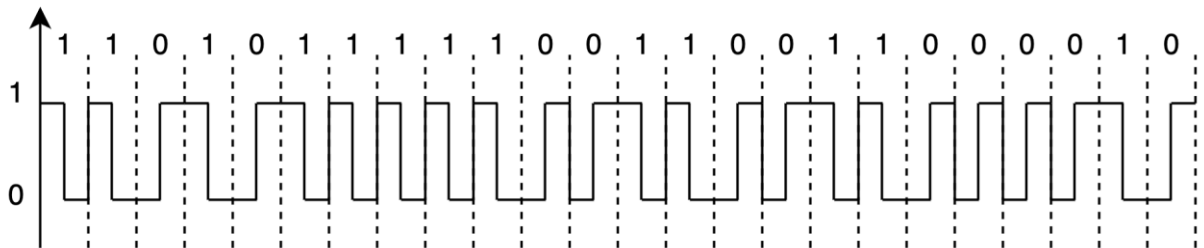


Рисунок 4. Манчестерский код - кодирование исходного сообщения

Для определения верхней границы частот нужно найти наиболее высокочастотную составляющую спектра в передаваемом сообщении. В М2 она образуется при передаче последовательных значений 0 и 1. В этот момент период гармонического сигнала для передачи прямоугольных сигналов 0 и 1 будет равен удвоенной длительности битового интервала. $T = t_b$, а $t_b = \frac{1}{C}$. Таким образом, верхняя граница частот:

$$f_v = \frac{1}{T} = C = 100 \text{ [МГц]}$$

Битовый интервал: $t_b = 10$ [нс]. А наименьшая, нижняя частота достигается при передаче чередующихся значений с 0 на 1. При этом период гармонического сигнала будет равен удвоенной длительности битового интервала: $T = 2t_b$. Тогда нижняя граница частот: $f_n = \frac{1}{T} = \frac{C}{2} = 50$ [МГц]

Тогда в предельном случае спектр: $S = f_v - f_n = 100 - 50 = 50$ [МГц]

Среднее значение частоты передаваемого сообщения находится в интервале $(f_n; f_v)$ и показывает какие частоты преобладают в спектре сигнала для передачи. Для оценки для каждого битового интервала определяется соответствующая частота сигнала, они суммируются и делится

на количество битовых интервалов. Тогда средняя частота рассматриваемого сообщения:

$$f_{\text{cp}} = \frac{\left(26f_0 + 22\frac{f_0}{2}\right)}{48} = \frac{37f_0}{48} = 77,083 \text{ [МГц]}$$

Середина спектра $f_{1/2} = \frac{f_{\text{H}} + f_{\text{B}}}{2} = \frac{C + \frac{C}{2}}{2} = \frac{3C}{4} = 75 \text{ [МГц]}$. Так как $f_{\text{cp}} > f_{1/2}$, то можно констатировать, что в спектре сигнала незначительно преобладают высокие частоты.

Для качественного распознавания сигнала на приемной стороне при передаче чередующихся значений 0 и 1 достаточно сформировать сигнал, содержащий первые 4 гармоники (так как более высокочастотные гармоники оказывают незначительное влияние на результирующий сигнал) с частоты $f_0 = \frac{C}{2}, f_1 = 3f_0, f_2 = 5f_0, f_3 = 7f_0$. Тогда верхняя граница частот $f_{\text{B}} = 7f_0$, а ширина спектра будет равна:

$$S = f_{\text{B}} - f_{\text{H}} = 7f_0 - \frac{f_0}{2} = 650 \text{ [МГц]}$$

Таким образом:

- Верхняя граница $f_{\text{B}} = 100 \text{ [МГц]}$
- Нижняя граница $f_{\text{H}} = 50 \text{ [МГц]}$
- Спектр сигнала $S = 50 \text{ [МГц]}$
- Среднее значение частоты $f_{\text{cp}} = 77,083 \text{ [МГц]}$
- Необходимая полоса пропускания $F = 650 \text{ [МГц]}$

Сравнительный анализ

Рассмотрим достоинства и недостатки представленных способов физического кодирования для обоснования выбора двух лучших способов кодирования для передачи исходного сообщения.

Метод	Спектр	Постоянная составляющая	Самосинхронизация	Обнаружение ошибок	Стоимость реализации
Потенциальный код без возврата к нулю (NRZ)	Маленькая ширина спектра ($0 - \frac{C}{2}$) Итоговый спектр: $\frac{2C}{5}$	Есть	Нет	Нет	Низкая сложность, низкая стоимость реализации
Потенциальный код с инверсией при единице (NRZI)	Маленькая ширина спектра ($0 - \frac{C}{2}$) Итоговый спектр: $\frac{2C}{5}$	Есть	Нет	Есть	Низкая сложность, низкая стоимость реализации
Пятиуровневый код PAM-5	Меньше, чем у NRZ и NRZI: $\frac{C}{4}$ Спектр сообщения: $\frac{C}{8}$	Есть	Нет	Нет	Высокая сложность и высокая стоимость из-за 5 уровней
Манчестерский код (M2)	Умеренная ширина спектра: $\frac{C}{2}$	Нет	Есть	Нет	Средняя сложность реализации, умеренная стоимость реализации

Метод NRZ прост в реализации, с малой шириной спектра – это повышает скорость передачи. Из-за наличия постоянной составляющей и слабой синхронизации является ненадежным, особенно при длинных последовательностях одинаковых бит.

Метод NRZI однако имеет более низкую постоянную составляющую и простую реализацию. Могут возникать проблемы синхронизации при длинных последовательностях «0», есть постоянная составляющая. Имеет лишь 2 уровня потенциала, что делает его дешевле и предпочтительнее для использования

РАМ-5 метод использует 5 уровней, 4 из которых соответствуют двум передаваемым битам и один уровень для создания избыточности для обнаружения ошибок. По сравнению с NRZI данные передаются в два раза быстрее благодаря передаче сразу 2 бит в одном битовом интервале. Имеет самый узкий спектр. Однако имеет высокую сложность реализации и стоимость из-за наличия 4 уровней для передачи, также может присутствовать постоянная составляющая

Метод M2 обеспечивает хорошую синхронизацию, не имеет постоянной составляющей, повышая надежность передачи. Однако это достигается за счет удвоения полосы пропускания и увеличения сложности реализации.

В качестве двух лучших методов выбираются Манчестерский код и РАМ-5. Исходное сообщение содержит много последовательных единиц. Манчестерский код гарантирует смену значения потенциала в середине битового интервала, благодаря чему не будет постоянной составляющей. РАМ-5 же имеет самый узкий спектр и позволяет передавать больше информации в той же полосе пропускания.

Логическое (избыточное) кодирование

Исходной сообщения A = 1101 0111 1100 1100 1100 0010

Результат кодирования B = 11011 01111 11010 11010 11010 10100

Результат кодирования в 16-ой CC: 36 FD 6B 54

Длина сообщения, полученного при помощи 4B/5B: 30 бит

Избыточность: $\frac{30-24}{24} \cdot 100\% = 25\%$

Рассмотрим метод NRZI, имеющий постоянную составляющую и отсутствие встроенной синхронизации, что может привести к проблемам при передаче данных на больших расстояниях или на высоких скоростях. Однако, чтобы устранить эти недостатки, можно применить логическое кодирование 4B/5B: каждое 5-битовое слово гарантирует наличие определённых переходов, что облегчает восстановление синхронизации при получении данных

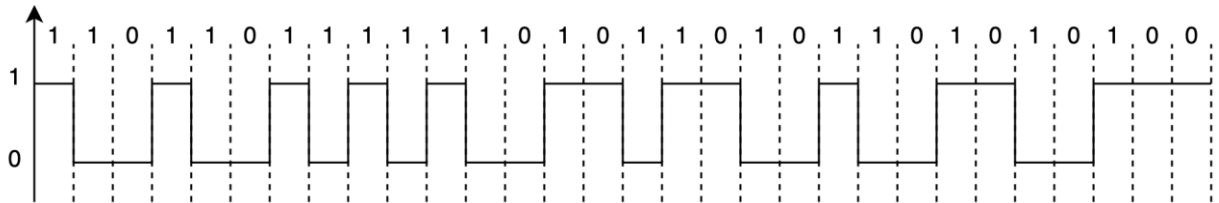


Рисунок 5. Кодирование исходного сообщения методом NRZI с применением к нему избыточного кодирования 4B/5B

Для определения верхней границы частот нужно найти наиболее высокочастотную составляющую спектра в передаваемом сообщении. В NRZI она образуется при передаче чередующихся значений 0 и 1. В этот момент период гармонического сигнала для передачи прямоугольных сигналов 0 и 1 будет равен удвоенной длительности битового интервала. $T = 2t_b$, а $t_b = \frac{1}{c}$. Таким образом, верхняя граница частот:

$$f_v = \frac{1}{T} = \frac{c}{2} = 50 \text{ [МГц]}$$

Битовый интервал: $t_b = 10 \text{ [нс]}$. А наименьшая, нижняя частота достигается при передаче длинных (в пределе – бесконечных) последовательностей нулей и единиц, что делает нижнюю границу частот близкой и в пределе равной нулю: $f_n = 0$

$$\text{Тогда в предельном случае спектр: } S = f_v - f_n = f_v = \frac{c}{2} = 50 \text{ [МГц]}$$

Однако при передаче конкретного сообщения нижняя частота зависит от максимальной длины последовательностей нулей и единиц, а также всегда больше нуля. Тогда найдем максимальную последовательность 0 или 1. В данном сообщении низкочастотная составляющая формируется при передаче

единицы и 2 последовательных нулей. Период синусоидального сигнала при передаче таких последовательностей равен 6 битовым интервалам. Таким образом, нижняя границы частот будет равна:

$$f_{\text{н}} = \frac{1}{6t_b} = \frac{C}{6} = 16,667 \text{ [МГц]}$$

Тогда спектр при передаче данного сообщения кодом NRZ равен:

$$S = f_{\text{в}} - f_{\text{н}} = \frac{C}{2} - \frac{C}{6} = \frac{C}{3} = 33,333 \text{ [МГц]}$$

Среднее значение частоты передаваемого сообщения находится в интервале $(f_{\text{н}}; f_{\text{в}})$ и показывает какие частоты преобладают в спектре сигнала для передачи. Для оценки для каждого битового интервала определяется соответствующая частота сигнала, они суммируются и делятся на количество битовых интервалов. Тогда средняя частота рассматриваемого сообщения:

$$f_{\text{ср}} = \frac{\left(9f_0 + 9\frac{f_0}{2} + \frac{f_0}{3}\right)}{19} = \frac{83f_0}{114} = 36,403 \text{ [МГц]}$$

Середина спектра $f_{1/2} = \frac{f_{\text{н}} + f_{\text{в}}}{2} = \frac{\frac{C}{6} + \frac{C}{2}}{2} = \frac{C}{3} = 33,333 \text{ [МГц]}$. Так как $f_{\text{ср}} > f_{1/2}$, то можно констатировать, что в спектре сигнала незначительно преобладают высокие частоты.

Для качественного распознавания сигнала на приемной стороне при передаче чередующихся значений 0 и 1 достаточно сформировать сигнал, содержащий первые 4 гармоники (так как более высокочастотные гармоники оказывают незначительное влияние на результирующий сигнал) с частоты $f_0 = \frac{C}{2}, f_1 = 3f_0, f_2 = 5f_0, f_3 = 7f_0$. Тогда верхняя граница частот $f_{\text{в}} = 7f_0$, а ширина спектра будет равна:

$$S = f_{\text{в}} - f_{\text{н}} = 7f_0 - \frac{f_0}{3} = 333,333 \text{ [МГц]}$$

Таким образом:

- Верхняя граница $f_{\text{в}} = 50 \text{ [МГц]}$

- Нижняя граница $f_n = 16,667$ [МГц]
- Спектр сигнала $S = 36,403$ [МГц]
- Среднее значение частоты $f_{cp} = 36,403$ [МГц]
- Необходимая полоса пропускания $F = 335$ [МГц]

	f_b , МГц	f_n , МГц	f_{cp} , МГц	$f_{1/2}$, МГц	S, МГц	S2, МГц	F, МГц
NRZI без 4B/5B	50	10	27,083	30	40	340	340
NRZI используя 4B/5B	50	16,667	36,403	33,333	36,403	333,333	335

Применение логического кодирования 4B/5B к NRZI приводит к заметному улучшению характеристик сигнала, в том числе уменьшению спектра. Хотя постоянная составляющая не исчезает полностью, её влияние становится меньше, что способствует улучшению качества передачи. Улучшение полосы пропускания и снижение ширины спектра в сочетании с увеличением нижней частоты создают более эффективный сигнал для передачи данных, что подтверждается результатами изменений в характеристиках.

Скремблирование

Алгоритм преобразования: $B_i = A_i \oplus B_{i-3} \oplus B_{i-5}$ ($i = 1, 2, \dots, 32$)

Исходное сообщение: 1101 0111 1100 1100 1100 0010

$$B_1 = A_1 = 1$$

$$B_2 = A_2 = 1$$

$$B_3 = A_3 = 0$$

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

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

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

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

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

$$B_9 = A_9 \oplus B_6 \oplus B_4 = 1 \oplus 0 \oplus 0 = 1$$

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

$$B_{11} = A_{11} \oplus B_8 \oplus B_6 = 0 \oplus 0 \oplus 0 = 0$$

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

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

$$B_{14} = A_{14} \oplus B_{11} \oplus B_9 = 1 \oplus 0 \oplus 1 = 0$$

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

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

$$B_{17} = A_{17} \oplus B_{14} \oplus B_{12} = 1 \oplus 0 \oplus 1 = 0$$

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

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

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

$$B_{21} = A_{21} \oplus B_{18} \oplus B_{16} = 0 \oplus 1 \oplus 1 = 0$$

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

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

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

Результат скремблирования: 1100 1000 1001 1011 0111 0111

Реализуем метод физического кодирования NRZI:

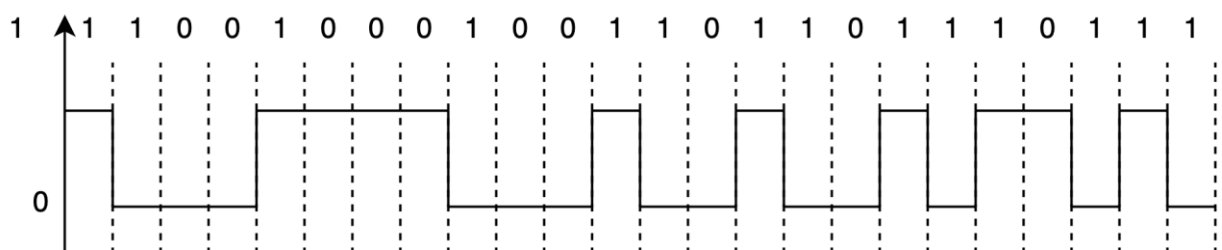


Рисунок 6. Схема при скремблировании исходного сообщения метод NRZI

Для определения верхней границы частот нужно найти наиболее высокочастотную составляющую спектра в передаваемом сообщении. В NRZI она образуется при передаче чередующихся значений 0 и 1. В этот

момент период гармонического сигнала для передачи прямоугольных сигналов 0 и 1 будет равен удвоенной длительности битового интервала. $T = 2t_b$, а $t_b = \frac{1}{C}$. Таким образом, верхняя граница частот:

$$f_v = \frac{1}{T} = \frac{C}{2} = 50 \text{ [МГц]}$$

Битовый интервал: $t_b = 10 \text{ [нс]}$. А наименьшая, нижняя частота достигается при передаче длинных (в пределе – бесконечных) последовательностей нулей и единиц, что делает нижнюю границу частот близкой и в пределе равной нулю: $f_n = 0$

$$\text{Тогда в предельном случае спектр: } S = f_v - f_n = f_v = \frac{C}{2} = 50 \text{ [МГц]}$$

Однако при передаче конкретного сообщения нижняя частота зависит от максимальной длины последовательностей нулей и единиц, а также всегда больше нуля. Тогда найдем максимальную последовательность 0 или 1. В данном сообщении низкочастотная составляющая формируется при передаче единицы и 3 последовательных нулей. Период синусоидального сигнала при передаче таких последовательностей равен 8 битовым интервалам. Таким образом, нижняя границы частот будет равна:

$$f_n = \frac{1}{8t_b} = \frac{C}{8} = 12,5 \text{ [МГц]}$$

Тогда спектр при передаче данного сообщения кодом NRZ равен:

$$S = f_v - f_n = \frac{C}{2} - \frac{C}{8} = \frac{3C}{8} = 37,5 \text{ [МГц]}$$

Среднее значение частоты передаваемого сообщения находится в интервале $(f_n; f_v)$ и показывает какие частоты преобладают в спектре сигнала для передачи. Для оценки для каждого битового интервала определяется соответствующая частота сигнала, они суммируются и делится на количество битовых интервалов. Тогда средняя частота рассматриваемого сообщения:

$$f_{cp} = \frac{\left(8f_0 + 3\frac{f_0}{2} + 2\frac{f_0}{3} + \frac{f_0}{4}\right)}{14} = \frac{125f_0}{168} = 37,202 \text{ [МГц]}$$

Середина спектра $f_{1/2} = \frac{f_H + f_B}{2} = \frac{\frac{C}{2} + \frac{C}{8}}{2} = \frac{5C}{16} = 31,25$ [МГц]. Так как $f_{cp} > f_{1/2}$, то можно констатировать, что в спектре сигнала значительно преобладают высокие частоты.

Для качественного распознавания сигнала на приемной стороне при передаче чередующихся значений 0 и 1 достаточно сформировать сигнал, содержащий первые 4 гармоники (так как более высокочастотные гармоники оказывают незначительное влияние на результирующий сигнал) с частоты $f_0 = \frac{C}{2}, f_1 = 3f_0, f_2 = 5f_0, f_3 = 7f_0$. Тогда верхняя граница частот $f_B = 7f_0$, а ширина спектра будет равна:

$$S = f_B - f_H = 7f_0 - \frac{f_0}{4} = 337,5 \text{ [МГц]}$$

Таким образом:

- Верхняя граница $f_B = 50$ [МГц]
- Нижняя граница $f_H = 12,5$ [МГц]
- Спектр сигнала $S = 37,5$ [МГц]
- Среднее значение частоты $f_{cp} = 37,202$ [МГц]
- Необходимая полоса пропускания $F = 340$ [МГц]

	f_B , МГц	f_H , МГц	f_{cp} , МГц	$f_{1/2}$, МГц	S, МГц	S2, МГц	F, МГц
NRZI без скремблирования	50	10	27,083	30	40	340	340
NRZI используя скремблирование	50	12,6	37,202	31,25	37,5	337,5	340

Скремблирование по сравнению с логическим кодированием 4В/5В практически не дало сильного выигрыша, однако мы смогли достигнуть таких же хороших характеристик сигнала, не прибегая к избыточности. То есть полезная пропускная способность у нас не изменилась по сравнению с физическим кодированием, однако частотные характеристики заметно улучшились.

Сравнительный анализ результатов кодирования

Метод	Спектр	Постоянная составляющая	Самосинхронизация	Обнаружение ошибок	Стоимость реализации
Потенциальный код без возврата к нулю (NRZ)	Маленькая ширина спектра ($0 - \frac{C}{2}$) Итоговый спектр: $\frac{2C}{5}$	Есть	Нет	Нет	Низкая сложность, низкая стоимость реализации
Потенциальный код с инверсией при единице (NRZI)	Маленькая ширина спектра ($0 - \frac{C}{2}$) Итоговый спектр: $\frac{2C}{5}$	Есть	Нет	Есть	Низкая сложность, низкая стоимость реализации
Пятиуровневый код PAM-5	Меньше, чем у NRZ и NRZI: $\frac{C}{4}$ Спектр сообщения: $\frac{C}{8}$	Есть	Нет	Нет	Высокая сложность и высокая стоимость из-за 5 уровней
Манчестерский код (M2)	Умеренная ширина спектра: $\frac{C}{2}$	Нет	Есть	Нет	Средняя сложность реализации, умеренная стоимость реализации
NRZI с избыточным	Спектр: $\frac{C}{3}$	Нет	Есть	Есть из-за запрещенных	Низкая сложность

кодированием 4B/5B				последова- тельности	и стоимость реализации
NRZI со скремблированием	Спектр: $\frac{3C}{8}$	Нет	Лучше, чем NRZI, но не исключены длинные послед-сти 0 и 1	Нет	Средняя сложность и стоимость реализации

NRZI дает небольшую ширину спектра и простую реализацию, однако не имеет самосинхронизации и обнаружения ошибок. Не исключает появления постоянных составляющих, поэтому был использован метод 4B/5B и скремблирование.

NRZI и избыточным кодированием 4B/5B имеет хорошие характеристики: ширина спектра уменьшилась, длинные последовательности нулей исчезли. Кроме того, можно отслеживать запрещенные комбинации нулей и единиц и корректировать ошибки при их возникновении.

NRZI со скремблированием не так оптимален как 4B/5B, однако смогло достичь хороших характеристик сигнала по сравнению со стандартным NRZI.

Манчестерский код (M2) имеет хорошую синхронизацию, однако используя различные методы кодирования NRZI добавляется возможность синхронизации и обнаружения ошибок (для 4B/5B), а реализация становится дешевле

РАМ-5 показал самый узкий спектр, но он имеет постоянную составляющую и высокий уровень сложности реализации. За счет этого его применение не всегда может быть оправдано

Вывод

В ходе данной лабораторной работы была проведена работа с несколькими методами кодирования и выполнен анализ наиболее выгодного

из них. Было установлено, что применение логического кодирования позволяет существенно оптимизировать спектральные характеристики сигнала

Манчестерский код обеспечивает высокую устойчивость к ошибкам и самосинхронизацию, несмотря на широкую полосу частот. В свою очередь, РАМ-5 требует меньше спектра, но отличается сложной аппаратной реализацией и высокими вычислительными затратами, что ограничивает его использование системами с мощными ресурсами

Выбор метода кодирования зависит от технических и экономических условий. NRZI со скремблированием подходит для снижения аппаратной сложности при достаточной надежности. Манчестерский код предпочтителен для высокой помехоустойчивости и самосинхронизации. А РАМ-5 оптимален для максимальной спектральной эффективности при отсутствии ограничений по стоимости и сложности