*Этап 1. Формирование исходного сообщения*

Исходное сообщение: Васюткин А.О.

В шестнадцатеричном коде: C2 E0 F1 FE F2 EA E8 ED 20 C0 2E CE 2E

В двоичном коде: 11000010 11100000 11110001 11111110 11110010 11101010 11101000 11101101 00100000 11000000 00101110 11001110 00101110  
Длина сообщения: 13 байт (104 бита)

*Этап 2. Физическое кодирование исходного сообщения*

Результат манчестерского кодирования: 1010010101011001101010010101010110101010010101101010101010101001101010100101100110101001100110011010100110010101101010011010011001011001010101011010010101010101010110011010100110100101101010010101100110101001

Изображение выглядит как снимок экрана, линия, График, Прямоугольник

Автоматически созданное описание

*Для всех расчетов полагаем, что пропускная способность канала связи .*

Верхняя граница частот:

Нижняя граница частот:

Среднее значение частоты в спектре:

Полоса пропускания, необходимая для качественной передачи:

Результат дифференциального манчестерского кодирования: 1001010101011010011001010101010110011001010101100110011001100101100110010101101001100101101001011001101001010101100110100110100101011010101010100110101010101010101001011001101001101010011001010101101001100101

Изображение выглядит как снимок экрана, линия, График, Шрифт

Автоматически созданное описание

Верхняя граница частот:

Нижняя граница частот:

Среднее значение частоты в спектре:

Полоса пропускания, необходимая для качественной передачи:

Результат биполярного кодирования с чередующейся инверсией (AMI):

1, -1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, -1, 1, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, -1, 1, -1, 0, 0, 0, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 0, 1, -1, 1, -1, 0, 0, 1, 0, -1, 1, -1, 0, 1, 0, -1, 0, 1, -1, 1, 0, -1, 0, 0, 0, 1, -1, 1, 0, -1, 1, 0, -1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, -1, *1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 1*, -1, 1, 0, -1, 1, 0, 0, -1, 1, -1, 0, 0, 0, 1, 0, -1, 1, -1, 0

Изображение выглядит как линия, диаграмма, График, Прямоугольник

Автоматически созданное описание

Верхняя граница частот:

Нижняя граница частот (для бесконечно длинных последовательностей нулей):

Нижняя граница частот (исходя из *характеристик* последовательности):

Среднее значение частоты в спектре:

Полоса пропускания, необходимая для качественной передачи:

Результат кодирования MLT-3:

1, 0, 0, 0, 0, 0, -1, -1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 1, 0, -1, 0, 1, 0, 0, -1, 0, 1, 0, 0, 0, -1, -1, 0, 1, 0, 0, -1, -1, 0, 0, 1, 0, -1, -1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, -1, -1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, -1, -1, -1, -1, -1, -1, 0, 1, *1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, -1, 0, 1*, 1, 0, -1, -1, -1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, -1, -1, 0, 1, 0, 0

Изображение выглядит как линия, диаграмма, График, Прямоугольник

Автоматически созданное описание

Верхняя граница частот:

Нижняя граница частот (для бесконечно длинных последовательностей нулей):

Нижняя граница частот (исходя из *характеристик* последовательности):

Среднее значение частоты в спектре:

Полоса пропускания, необходимая для качественной передачи:

Результат кодирования PAM-5:

2, -2, -2, 1, 2, 1, -2, -2, 2, *2, -2, -1, 2,* 2, 2, 1, 2, 2, -2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, -2, 2, 1, 2, -1, -2, 1, -2, -2, 2, -2, -2, -2, -2, 1, 2, 1, 2, -2, 2, 1, -2, 1, 2, 1

Изображение выглядит как линия, диаграмма, График, Прямоугольник

Автоматически созданное описание

Верхняя граница частот:

Нижняя граница частот (при длительной передаче неизменяющихся значений):

Нижняя граница частот (исходя из *характеристик* последовательности):

Среднее значение частоты в спектре:

Полоса пропускания, необходимая для качественной передачи:

Сравнение рассмотренных способов физического кодирования:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Манчестерское | Дифф. манчестерское | AMI | MLT-3 | PAM-5 |
| fв | 1 ГГц | 1 ГГц | 500 МГц | 250 МГц | 250 МГц |
| fн | 500 МГц | 500 МГц | 90 МГц | 77 МГц | 63 МГц |
| fср | 784 МГц | 746 МГц | 260 МГц | 125 МГц | 116 МГц |
| S | 6,6 ГГц | 6,6 ГГц | 3,5 ГГц | 1,7 ГГц | 1,7 ГГц |
| Самосинх-ронизация | + | + | - (если нули) | - (если нули) | - |
| Начилие постоянной составляющей | - | - | + (если нули) | + (если нули) | + (при передаче однородной последова-тельности) |
| Обнаружение ошибок | - (если из-за помехи произошёл ложный перепад, он может быть интерпретирован как корректный бит) | +- (может не обнаружить потерю битов) | - (если 0 превратился в 1 (но с правильной полярностью), ошибка не обнаружится) | +- (может быть проблема при длинной последова-тельности нулей) | + (приёмник знает, какие комбинации уровней возможны, а какие – нет) |

Исходя из данных, представленных в таблице, для дальнейшего выполнения работы были выбраны MLT-3 и PAM-5, поскольку они обеспечивают минимальные числовые характеристики среднего значения частоты и ширины полосы пропускания, необходимой для качественной передачи сообщения. Несмотря на то, что у обоих есть вероятность наличия постоянной составляющей, оба этих метода имеют преимущество по скорости передачи, а также обеспечивают снижение спектра помех за счет меньшего количества переходов.

*Этап 3. Логическое (избыточное) кодирование исходного сообщения*

Результат кодирования 4B/5B в двоичном коде: 0011 0101 0100 1110 0111 1011 1010 1001 1110 1111 0011 1011 0100 1110 0101 1011 1001 0010 1110 0110 1110 1001 1110 1101 0111 1010 1001 1100 1101 0111 0010 1001 1100

Результат кодирования 4B/5B в шестнадцатеричном коде: 35 4E 7B A9 EF 3B 4E 5B 92 E6 E9 ED 7A 9C D7 29 C

Длина сообщения: 16,25 байт (130 бит / 132 бит)

Избыточность сообщения: (130−104) / 104 = 26 / 104 = 0,25 (25%)

Избыточность дополненного сообщения: (132−104) / 104 = 28 / 104 = 0,27 (27%)

Результат кодирования MLT-3:

0, 0, 1, 0, 0, -1, -1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, -1, 0, 0, 0, 1, 0, -1, 0, 0, 1, 0, -1, -1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, -1, 0, 1, 1, 0, -1, 0, 1, 1, 1, 0, -1, 0, 0, 1, 0, 0, -1, -1, -1, 0, 1, 0, 0, 0, -1, -1, 0, 1, 1, 0, -1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, -1, 0, 1, 1, 1, 0, -1, -1, 0, 1, 0, 0, -1, -1, -1, 0, 1, 0, -1, -1, 0, 1, 1, 0, 0, -1, 0, 1, 0, 0, -1, -1, 0, 0, 0, 1, 0, -1, -1, -1, 0, 1, 1, 0, 0, -1, 0, *1, 1, 1, 0, 0, -1, -1, -1, 0,* 1, 0, 0, 0

Изображение выглядит как линия, диаграмма, График, Прямоугольник

Автоматически созданное описание

Верхняя граница частот:

Нижняя граница частот (для бесконечно длинных последовательностей нулей):

Нижняя граница частот (исходя из *характеристик* последовательности):

Среднее значение частоты в спектре:

Полоса пропускания, необходимая для качественной передачи:

Результат кодирования PAM-5:

-2, 2, -1, -1, -1, -2, 2, 1, -1, 2, 1, 2, 1, 1, 1, -1, 2, 1, 2, 2, -2, 2, 1, 2, -1, -2, 2, 1, -1, -1, 1, 2, 1, -1, -2, *1, 2, 1, -1, 1, 2, 1, 1, -1, 2, 1, 2, -1, -1, 2, 1, 1, 1, -1, 2, -2*, 2, -1, -1, 2, -2, 1, 1, -1, 2, -2

Изображение выглядит как линия, диаграмма, График, Прямоугольник

Автоматически созданное описание

Верхняя граница частот:

Нижняя граница частот (при длительной передаче неизменяющихся значений):

Нижняя граница частот (исходя из *характеристик* последовательности):

Среднее значение частоты в спектре:

Полоса пропускания, необходимая для качественной передачи:

Кодирование методом 4B/5B обеспечивает синхронизацию за счет отсутствия длинных последовательностей нулей и единиц, а также сужает спектр сигнала в связи с отсутствием постоянной составляющей, однако, принимая во внимание особенности метода кодирования PAM-5, результат может обмануть ожидания – на графике заметно, что чередующиеся последовательности нулей и единиц дают постоянную составляющую (в случае конкретной рассмотренной последовательности такие постоянные составляющие не являются слишком продолжительными). Однако несмотря на это, метод PAM-5 демонстрирует лучший результат по характеристикам минимального среднего значений частоты в спектре по сравнению с MLT-3. Также упомянутые характеристики, полученные в результате физического кодирования методом MLT-3 последовательности, закодированной методом 4B/5B, не намного, но все же уступают характеристикам, полученным в результате физического кодирования MLT-3 исходной последовательности.

*Этап 4. Скремблирование исходного сообщения*

Выбранный полином: Bi = Ai ⊕ Bi-1 ⊕ Bi-2 ⊕ Bi-3 ⊕ Bi-7

Выбранный полином относится к числу примитивных полиномов, обеспечивающих последовательность с максимально возможным периодом (генерирует все возможные *2n-1* состояний для LFSR длины *n*), имеющую равномерное распределение и обладающую псевдослучайными свойствами, что в результате позволяет получить сигнал, похожий на белый шум (что очень хорошо с точки зрения безопасности информации).

Результат скремблирования в двоичном коде: 10101000 11100111 11011100 10101110 10010001 00111111 00101111 00011011 00101111 00100011 01101010 10111101 00101100

Результат скремблирования в шестнадцатеричном коде: A8 E7 DC AE 91 3F 2F 1B 2F 23 6A BD 2C

Результат кодирования MLT-3:

1, *1, 0, 0, -1, -1, -1, -1, 0, 1*, 0, 0, 0, -1, 0, 1, 0, -1, -1, 0, 1, 0, 0, 0, -1, -1, 0, 0, 1, 0, -1, -1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, -1, 0, 1, 0, -1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, -1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, -1, -1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, -1, 0, 1, 0, 0, 0, -1, -1, -1, -1, 0, 1, 1, 0, -1, -1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, -1, 0, 1, 0, 0, -1, -1, -1, 0, 0, 1, 0, 0, 0

Изображение выглядит как линия, диаграмма, График, Прямоугольник

Автоматически созданное описание

Верхняя граница частот:

Нижняя граница частот (для бесконечно длинных последовательностей нулей):

Нижняя граница частот (исходя из *характеристик* последовательности):

Среднее значение частоты в спектре:

Полоса пропускания, необходимая для качественной передачи:

Результат кодирования PAM-5:

1, 1, 1, -2, 2, 1, -1, 2, 2, -1, 2, -2, 1, *1, 2, 1, 1, -1, -2, -1, -2, 2, 2, 2, -2, 1*, 2, 2, -2, -1, 1, 2, -2, 1, 2, 2, -2, 1, -2, 2, -1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, -1, -2, 1, 2, -2

Изображение выглядит как линия, диаграмма, График, Прямоугольник

Автоматически созданное описание

Верхняя граница частот:

Нижняя граница частот (при длительной передаче неизменяющихся значений):

Нижняя граница частот (исходя из *характеристик* последовательности):

Среднее значение частоты в спектре:

Полоса пропускания, необходимая для качественной передачи:

К сожалению, применение скремблирования не позволило добиться значимого уменьшения значений параметров средней частоты и ширины спектра сигнала ни для одного из описанных ранее методов физического кодирования для рассматриваемой последовательности. Несмотря на эффективность скремблирования в задаче выравнивания спектра сигнала, его внедрение сопровождается возрастанием вычислительных затрат, особенно в системах с ограниченными ресурсами.

Результаты сравнения рассмотренных способов кодирования:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Без логического кодирования | | | 4B/5B | | | Скремблирование | | |
|  | fн | fср | S | fн | fср | S | fн | fср | S |
| Манчестер | 500 МГц | 784 МГц | 6,6 ГГц |  |  |  |  |  |  |
| Дифф.  Манчестер | 500 МГц | 746 МГц | 6,6 ГГц |  |  |  |  |  |  |
| AMI | 90 МГц | 260 МГц | 3,5 ГГц |  |  |  |  |  |  |
| MLT-3 | 77 МГц | 125 МГц | 1,7 ГГц | 112 МГц | 152 МГц | 1,7 ГГц | 112 МГц | 145 МГц | 1,7 ГГц |
| PAM-5 | 63 МГц | 116 МГц | 1,7 ГГц | 48 МГц | 107 МГц | 1,7 ГГц | 84 МГц | 116 МГц | 1,7 ГГц |

На основании проведённого анализа различных методов физического и логического кодирования можно сформулировать следующие выводы. Наибольшей спектральной эффективностью обладают методы многоуровневого кодирования, в частности MLT-3 и PAM-5, которые обеспечивают передачу данных при существенно меньших значениях частотной составляющей сигнала (fн, fcp) по сравнению, например, с манчестерским кодированием.

Методы, содержащие в своей структуре регулярные переходы уровня сигнала (манчестерское и дифференциальное манчестерское кодирование), обеспечивают надёжную самосинхронизацию. В то время как методы, не гарантирующие наличие переходов, например, при передаче нулей, требуют дополнительных мер синхронизации или применения логического кодирования/скремблирования.

Манчестерские методы не допускают возникновения постоянной составляющей благодаря чередованию уровней. Методы типа PAM-5 и MLT-3, при передаче повторяющихся символов, напротив, могут генерировать постоянную составляющую. Тем не менее, её наличие частично нивелируется при скремблировании.

Наивысшую способность к идентификации ошибок демонстрирует метод PAM-5, поскольку приёмник может распознавать недопустимые переходы. Следует отметить, что манчестерское кодирование потенциально подвержено интерпретации ложных переходов как валидных битов, что снижает его надёжность в условиях зашумлённого канала.

Методы MLT-3 и PAM-5 демонстрируют наилучшие характеристики по спектральной эффективности, тогда как Манчестерские методы сохраняют актуальность при необходимости надёжной синхронизации без применения дополнительных логических преобразований. Применение методов логического кодирования и скремблирования в случае рассматриваемой исходной последовательности не дает существенного улучшения результатов.