

**ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ І ТЕХНОЛОГІЇ**

УДК 004.712

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ ДАННЫХ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ ETHERNET**Коломоєц Г.П.***Классический частный университет,
ул. Жуковского, 70-б, г. Запорожье, 69002, Украина***Введение**

Стремительное увеличение скоростей передачи данных в компьютерных сетях и ограниченная полоса пропускания традиционных сред передачи (особенно кабелей типа "витая пара" на основе медных проводов) выдвигают повышенные требования к методам физического кодирования данных. Такое кодирование преследует несколько целей, включая, прежде всего, синхронизацию приемника и передатчика и минимизацию ширины спектра полученного в результате кодирования сигнала [1].

Технология компьютерных сетей Ethernet за 36 лет своего развития продемонстрировала увеличение скоростей передачи данных с примерно 3 Мбит/с при использовании толстого коаксиального кабеля до 10 Гбит/с для всех традиционно используемых сред передачи. В настоящее время разрабатывается стандарт IEEE 802.3ba технологии передачи данных Ethernet на скоростях 40 и 100 Гбит/с. Начиная с технологии Fast Ethernet (IEEE 802.3u – 100 Мбит/с), повышенное внимание уделяется разработке и использованию методов физического кодирования как средства увеличения пропускной способности сети при ограниченной полосе пропускания. Учитывая тот факт, что скорости передачи данных приближаются к физическим ограничениям полосы пропускания традиционных сред передачи, представляет особый интерес проведение исследований влияния различных параметров на спектры полученных в результате кодирования сигналов при использовании различных методов кодирования.

Одной из методик исследования формы и спектра дискретных сигналов является анализ Фурье, позволяющий моделировать сигнал в виде суммы гармонических сигналов, частота которых кратна частоте сигнала. Амплитуды таких гармонических сигналов позволяют судить о спектре мощности моделируемого сигнала и оценивать, какая ее часть помещается в ту либо иную полосу пропускания [2].

Целью данной работы являлось исследование влияния значений передаваемых по сети бит данных на ширину спектра сигналов, полученных методами физического кодирования NRZ, NRZI и MLT-3.

Методика исследования

Известно, что сигнал $g(t)$, имеющий конечную длительность, может быть разложен в ряд Фурье, если представить, что весь сигнал бесконечно повторяется (то есть интервал от T до $2T$ полностью повторяет интервал от 0 до T , и т. д.) [2]:

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(2\pi nft), \quad (1)$$

где $f = 1/T$ – основная частота; n – номер гармоники основной частоты; a_n и b_n – амплитуды косинусов и синусов n -й гармоники (n – целые числа, большие 0, c – константа, описывающая постоянную составляющую функции $g(t)$).



Амплитуды косинусов a_n и синусов b_n , а также постоянная составляющая c определяются [2]:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt \quad (3)$$

$$c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} g(t) dt \quad (4)$$

При передаче двоичного сигнала, представляющего собой периодическую последовательность бит, значение функции $g(t)$ будет равно единице или нулю при передаче соответствующих бит в тех частях периода сигнала, в которых эти биты передаются. С учетом этого, можно получить следующие выражения для коэффициентов:

$$a_n = \sum_{i=1}^k g(t_i) \frac{1}{\pi n} (\sin(nt_{i+1}) - \sin(nt_i)) \quad (5)$$

$$b_n = \sum_{i=1}^k g(t_i) \frac{1}{\pi n} (\cos(nt_i) - \cos(nt_{i+1})) \quad (6)$$

$$c = \sum_{i=1}^k g(t_i) \frac{1}{\pi} (t_{i+1} - t_i) \quad (7)$$

где i – номер бита в периоде; k – максимальный номер бита в периоде; t_i – нижняя граница временного интервала, в течение которого передается i -й бит периодической k -битовой последовательности; t_{i+1} – верхняя граница временного интервала, в течение которого передается i -й бит периодической k -битовой последовательности; $g(t_i)$ – значение функции $g(t)$ (равное нулю или единице) на интервале, в течение которого передается i -й бит периодической k -битовой последовательности; n – номер гармоники.

После расчета суммарных значений коэффициентов для периода сигнала, можно восстановить зависимость амплитуды сигнала, передающего информационную последовательность бит, от времени:

$$g(t) = \frac{1}{2} c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(nt) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(nt) \quad (8)$$

Поскольку каждая гармоника переносит часть мощности сигнала, имеет смысл проанализировать зависимость среднеквадратичных амплитуд от количества учитываемых гармоник. Среднеквадратичная амплитуда рассчитывается как

$$A_{\text{square}} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (9)$$

Основываясь на выражениях (5)–(8) в данной работе разработано приложение, позволяющее рассчитывать и отображать форму и спектр периодических последовательностей двоичных сигналов в зависимости от количества и значений бит повторяющейся последовательности с учетом количества гармоник и используемых методов кодирования. От



дельный модуль приложения может выполнять сортировку суммарных по гармоникам среднеквадратичных амплитуд для различных последовательностей бит с целью определения наихудших с точки зрения потребления полосы пропускания последовательностей для заданного количества бит. Приложение разработано в среде программирования Microsoft Visual Studio 2008 на языке C# и представляет собой форму с компонентами для ввода информации и отображения результатов моделирования (рис. 1.). Программа использует разработанные функции проверки правильности ввода данных, кодирования входной последовательности бит в соответствии с выбранным методом кодирования, реализации Фурье-анализа, построения графиков и диаграмм, а также сортировки двумерного массива суммарных по гармоникам среднеквадратичных амплитуд для всех возможных значений битовой последовательности с заданным количеством бит [3].

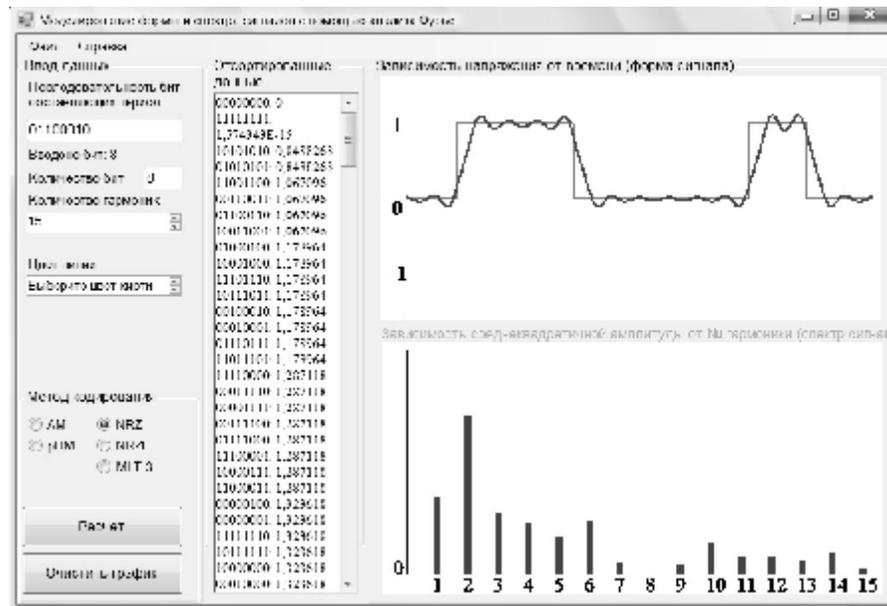


Рис. 2. Результаты моделирования формы и спектра сигнала, закодированного методом NRZ с учетом 15 гармоник для несимметричной битовой последовательности

Описание методов кодирования и результатов моделирования

В работе исследовались следующие методы кодирования:

NRZ – *Non Return to Zero* – *без возврата к нулю* – метод кодирования, в котором нулевому значению бита соответствует низкий потенциал, а единичному значению бита – высокий, применяется для передачи данных по интерфейсу RS-232, в данной работе выбран в качестве простейшего референсного метода;

NRZI – *Non Return to Zero Inverted* – *без возврата к нулю инвертированный* – метод кодирования, в котором нулевому значению бита соответствует потенциал, такой же, как при передаче предыдущего бита, а для единичного значения бита потенциал инвертируется на противоположный потенциалу при передаче предыдущего бита. Используется спецификацией Fast Ethernet для передачи по оптоволокну 100Base-FX (вместе с предварительным логическим кодированием 4B/5B);

MLT-3 – *Multi Level Transmission - 3* – *трехуровневое кодирование* – метод кодирования, в котором нулевому значению бита соответствует потенциал, такой же, как при передаче предыдущего бита, а для единичного значения бита значение меняется на следующее по цепочке +V, 0, -V, 0, +V. Используется спецификацией Fast Ethernet для передачи по медному кабелю типа "витая пара" 100Base-TX (вместе с предварительным логическим кодированием 4B/5B);



ностей бит после NRZI-кодирования, то они могут быть получены из 5-битовых последовательностей – результатов предварительного логического кодирования исходного сигнала по методу 4B/5B (табл. 1).

Таблица 1

5-битовые последовательности, приводящие к симметричным последовательностям бит в результате NRZI кодирования

Последовательность после 4B/5B кодирования	Последовательность после NRZI кодирования
11111	01010
10101	11001
10001	11110

На рис. 3 показаны форма и спектр сигнала для 10 подряд идущих единичных бит информационной последовательности, которая подверглась кодированию по методу NRZI. Количество бит учитывает обычно используемое вместе с NRZI в спецификациях Fast Ethernet 100Base-TX/FX предварительное логическое кодирование 4B/5B, по которому каждые 4 бита исходной битовой последовательности заменяются 5 битами, предотвращающими появление длинных непрерывных последовательностей нулей (отсортированный массив на рис. 3 показывает наличие и других симметричных последовательностей бит (1010101010, 0101010101, 0000100001, 1111011110 и др), демонстрирующих относительно низкие значения суммарных среднеквадратичных амплитуд, что является показателем расширения спектра кодированного сигнала. Нужно отметить, что кодирование 4B/5B устраняет некоторые из них, например, 0000100001, т.к. подобные последовательности имеют более трех нулей подряд и не могут появляться после логического кодирования. Однако достаточно большое количество симметричных последовательностей все же остается.

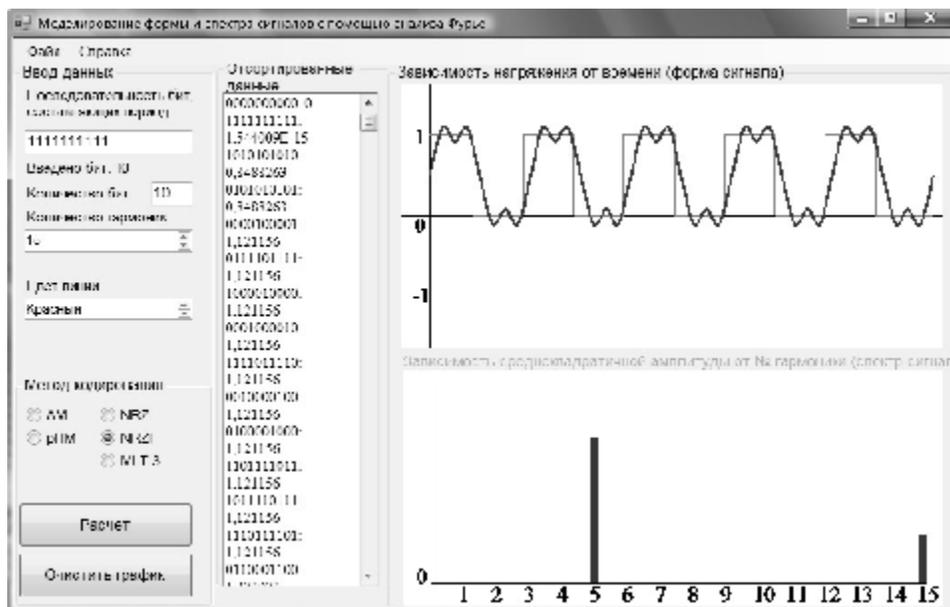


Рис. 4. Результаты моделирования формы и спектра 10-битного сигнала, кодированного методом NRZI с учетом 15 гармоник для симметричной битовой последовательности

Очевидно, что кодирование NRZI приводит к последовательности, показанной на рис. 3 при передаче символа Idle (11111), который заполняет промежутки между пакетами и



служит для обеспечения поддержки синхронности приемника и передатчика, а также для контроля целостности линии связи [1]. В этом случае результирующий код получается симметричным и его спектр расширяется, что выдвигает повышенные требования к полосе пропускания передающей среды.

Отсортированный массив на рис. 3 показывает наличие и других симметричных последовательностей бит (10101010, 01010101, 0000100001, 1111011110 и др), демонстрирующих относительно низкие значения суммарных среднеквадратичных амплитуд, что является показателем расширения спектра кодированного сигнала. Нужно отметить, что кодирование 4В/5В устраняет некоторые из них, например, 0000100001, т.к. подобные последовательности имеют более трех нулей подряд и не могут появляться после логического кодирования. Однако достаточно большое количество симметричных последовательностей все же остается.

Таблица 2

Соответствие исходных 4-битовых и результирующих 5-битовых кодов для логического кодирования 4В/5В

Символ	5-битовый код	4-битовый код	Символ	5-битовый код	Служебные и запрещенные символы
0	11110	0000	I	11111	межпакетный символ Idle
1	01001	0001	J	11000	1-й начальный символ пакета
2	10100	0010	K	10001	2-й начальный символ пакета
3	10101	0011	T	01101	1-й конечный символ пакета
4	01010	0100	R	00111	2-й конечный символ пакета
5	01011	0101	V	00000	запрещенный символ
6	01110	0110	V	00001	запрещенный символ
7	01111	0111	V	00010	запрещенный символ
8	10010	1000	V	00011	запрещенный символ
9	10011	1001	V	00100	запрещенный символ
A	10110	1010	v	00101	запрещенный символ
B	10111	1011	V	00110	запрещенный символ
C	11010	1100	V	01000	запрещенный символ
D	11011	1101	V	01100	запрещенный символ
E	11100	1110	V	10000	контроль потока
F	11101	1111	V	11001	запрещенный символ

Результатом кодирования по методу MLT-3 является трехуровневая (-1, 0, 1) битовая последовательность, форма и спектр которой могут быть смоделированы с помощью Фурье-анализа подобно моделированию битовой последовательности, кодированной методом NRZ, с учетом того, что функция $g(t)$ может принимать значения -1, 0 и 1.

На рис. 4 показаны форма и спектр сигнала для 10 подряд идущих единичных бит информационной последовательности, которая подверглась кодированию по методу MLT-3 с учетом предварительного логического кодирования 4В/5В для двух символов Idle. Видно, что при использовании этого метода кодирования наблюдается симметричная форма сигнала, однако, расширение спектра в этом случае не происходит (во всяком случае, по сравнению с методами NRZ и NRZI).

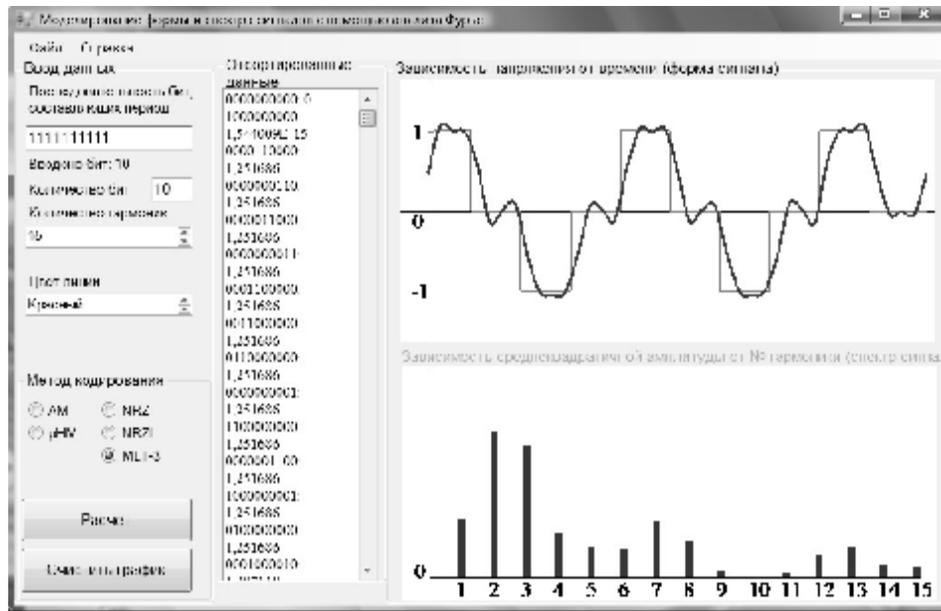


Рис. 5. Результати моделювання форми і спектра 10-бітного сигналу, кодованого методом MLT-3 з урахуванням 15 гармонік для симетричної біткової послідовності

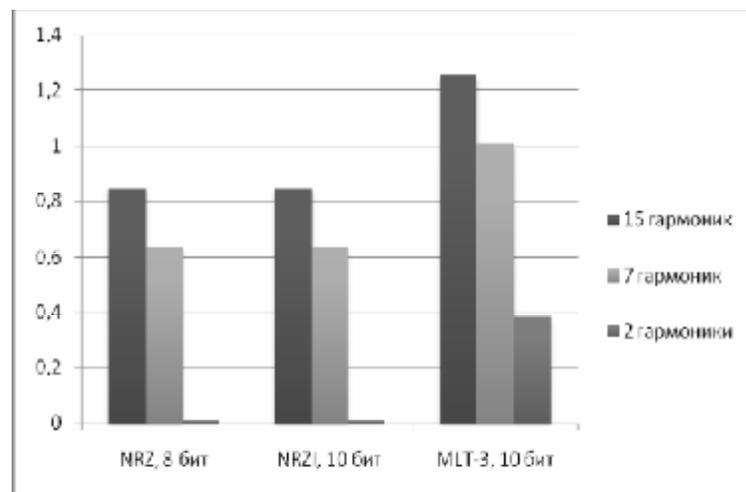


Рис. 6. Сравнение суммарных минимальных среднеквадратичных амплитуд сигналов, кодированных различными методами (NRZ – для последовательностей 10101010 и 01010101, NRZI – для последовательностей 1111111111 и 0111111111, MLT-3 – для последовательностей 0000110000, 0000000110, 0000011000, 0000000011, 0001100000, 0011000000, 0110000000, 0000000001, 1100000000, 0000001100, 1000000001, 0100000000)

На рис. 5 приведены суммарные среднеквадратичные амплитуды кодированных различными методами битовых последовательностей с учетом различного количества гармоник. Видно, что для методов кодирования NRZ и NRZI наблюдаются одинаковые значения этих величин для всех учитываемых гармоник. Меняются только битовые последовательности, которые приводят к получению таких спектров (10101010 и 01010101 для NRZ-кодирования и 1111111111 и 0111111111 для NRZI-кодирования). Следует отметить, что учет только двух гармоник приводит к получению практически равного нулю значения суммарных среднеквадратичных амплитуд, что свидетельствует о необходимости учета



большого количества гармоник и, как следствие, расширения полосы пропускания среды передачи. Переход же к трехуровневому кодированию приводит к возрастанию минимального значения суммарной среднеквадратичной амплитуды, при этом количество битовых комбинаций для одного и того же значения этой величины увеличивается до двенадцати (0000110000, 0000001110, 0000011000, 0000000011, 0001100000, 0011000000, 0110000000, 0000000001, 1100000000, 0000001100, 1000000001, 0100000000).

Следует отметить, что все эти комбинации (в отличие от ранее рассмотренных методов кодирования) являются запрещенными для логического кодирования 4В/5В (отсортированный массив на рис. 3 показывает наличие и других симметричных последовательностей бит (1010101010, 0101010101, 0000100001, 1111011110 и др), демонстрирующих относительно низкие значения суммарных среднеквадратичных амплитуд, что является показателем расширения спектра кодированного сигнала. Нужно отметить, что кодирование 4В/5В устраняет некоторые из них, например, 0000100001, т.к. подобные последовательности имеют более трех нулей подряд и не могут появляться после логического кодирования. Однако достаточно большое количество симметричных последовательностей все же остается.

Учитывая этот факт можно заключить, что для разрешенных комбинаций бит суммарное значение среднеквадратичной амплитуды возрастает, что положительно сказывается на ширине спектра сигнала. Обратим внимание, что при кодировании сигнала методом MLT-3 спектры даже наихудших с точки зрения значения суммарной среднеквадратичной амплитуды передают достаточно большую мощность на нижних двух гармониках, что позволяет на практике использовать этот метод кодирования для узкополосных сред, например кабеля витая пара 5 категории (с полосой пропускания до 100МГц).

Выводы

Разработано приложение, позволяющее с помощью Фурье-анализа моделировать форму и спектр дискретных сигналов, полученных применяемыми в технологии Fast Ethernet методами физического кодирования, а также выполнять расчет значений суммарной по гармоникам среднеквадратичной амплитуды сигналов для всех комбинаций бит в периодической последовательности. Результаты моделирования свидетельствуют о расширении спектра кодированных сигналов для симметричных битовых последовательностей при кодировании их методами NRZ и NRZI, причем, чем чаще чередуются единицы и нули, тем шире оказывается спектр сигнала. Переход к многоуровневому кодированию (MLT-3) сопровождается уменьшением ширины спектра для любых битовых последовательностей.

Литература

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. –3-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 958с.
2. Таненбаум Э. Компьютерные сети. 4-е изд. /. – СПб.: Питер, 2003. – 992с.
3. Коломеец Г.П. "Моделирование сигналов передаваемых в компьютерных сетях данных"/Сборник научных трудов 9-й Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии», Одесса, Одесский национальный политехнический университет, 19–23 мая 2008 г, т.1.–с 118.
4. IEEE Standard 802.3–2005: Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications – <http://www.ieee.org>.