

Евгений Жиганов
Алексей Мощевикин
alexmtou@lab127.karelia.ru

Аппаратная коррекция ошибок (FEC)

в сетях стандарта nanoNET (IEEE 802.15.4a)

В беспроводных сетях вероятность ошибочной передачи данных намного выше, чем в проводных, из-за большого числа источников сигнала, использующих одну среду передачи — эфир. При проектировании проводных сетей обычно ограничиваются средствами, позволяющими лишь проверить, была ли ошибка и, в случае необходимости, запросить повторную передачу; средства же исправления ошибок передачи не применяются.

Введение

В качестве примера можно привести повсеместно распространенные технологии Ethernet+TCP/IP. В случае беспроводных сетей разработчики наряду с теми или иными способами обнаружения ошибок дополнительно применяют средства их исправления.

Общая идея как обнаружения, так и исправления ошибок основывается на использовании избыточных кодов. Простейший пример — это введение так называемого «бита четности» — такой прием позволяет обнаружить единичную ошибку.

На передающей стороне значение бита четности определяется следующим правилом: при четном количестве единиц в блоке информации проверочный бит должен быть равен нулю, в противном случае — единице. Таким образом, общее количество единиц в блоке (включая избыточный бит) должно быть четным. Если на приемной стороне количество единиц оказалось нечетным, этот блок считается поврежденным. Добавление одного бита фактически увеличивает число возможных кодовых слов в два раза, но при этом только половина из них является допустимо, разрешен-

ными, а другая половина в силу обозначенных правил невозможна, запрещена.

Декодер, встретив какую-либо комбинацию битов, которая входит в число невозможных, делает вывод, что кодовое слово было передано с ошибкой. Более сложные схемы основаны на аналогичной идее, но подразумевают большее количество добавочных битов и более сложные правила формирования их комбинаций; при этом эти правила дают возможность на приемной стороне определить, какой именно бит (или биты) были повреждены.

Поскольку применение рассматриваемых методов обнаружения и/или коррекции ошибок связано с передачей дополнительных проверочных битов, то совершенно ясно, что применение средств такого рода оправданно именно в ситуациях, когда велика вероятность сбоя при передаче — в противном случае введение дополнительных данных приведет лишь к уменьшению полезной пропускной способности канала передачи.

Общая теория помехоустойчивых кодов (кодов с исправлением ошибок) изложена в книге [1]. В англоязычной литературе схемы кодирования с избыточностью с целью исправления ошибок называются FEC (сокращение от Forward Error Correction). С общими сведениями о способах обнаружения и коррекции ошибок можно ознакомиться, например, в RFC2354 [2].

Коррекция ошибок в nanoNET

В соответствии с описанием стандарта nanoNET [3] передаваемые данные подвергаются многоступенчатой побитовой обработке (рис. 1).

После формирования кадра (составления заголовков и записи данных в трансивер) и получения команды начать передачу вычисляются контрольные суммы заголовков кадра CRC1 и поля данных CRC2. Затем (при включении соответствующей опции) поле данных и контрольная сумма CRC2 шифруются с помощью 128-битного ключа. После этого весь кадр подвергается так называемому скремблированию¹ (перемешиванию битов) — это делается для минимизации вероятности появления длинных цепочек нулей и повышения надежности передачи. Далее битовая последовательность проходит через описанную ниже схему помехоустойчивого кодирования FEC и только потом преобразуется в чирп-сигналы (импульсы длительностью 1 мкс с наполнением возрастающей и (или) убывающей частотой).



¹Примечание: в поставляемой с трансиверами nanoPAN демо-версии драйвера TRXdd 2.01 в процедуру инициализации скремблирование не включено (регистр 0x67 Transmit Scrambler).

На приемной стороне процесс происходит в обратном порядке, то есть сначала из помехоустойчивого кода получают информационные биты, возможно, с исправлением ошибок, затем производится процедура, обратная перемешиванию, расшифровка и проверка контрольных сумм. При этом контрольное суммирование и перемешивание являются обязательными стадиями (скремблирование рекомендовано к применению), в то время как шифрование и помехоустойчивое кодирование таковыми не являются (помечены на рис. 1 серым фоном).

Отметим, что трансиверы nanoNET можно конфигурировать на прием или передачу как с использованием корректирующих кодов, так и без их использования. При этом в передаваемом кадре не содержится никаких сведений о том, подвергался ли он такому кодированию FEC или нет. Это означает, что для того чтобы передатчик и приемник, выражаясь образно, «разговаривали на одном языке», нужно, чтобы они были одинаковым образом сконфигурированы в плане использования или неиспользования FEC.

Для кодирования FEC с возможностью исправления ошибок передачи трансиверы nanoNET используют классический код Хэмминга (7,4), то есть к каждой четверке информационных битов добавляется 3 проверочных, общая длина кодового слова равна 7. Из теории корректирующих кодов известно, что такой код имеет минимальное кодовое расстояние 3, и следовательно, приемник способен либо исправить одиночную ошибку, либо обнаружить двойную. Особенностью реализации помехоустойчивого кодирования в передатчиках рассматриваемого стандарта является совместное кодирование двух соседних полубайтов за счет перемежения битов кодовых слов, полученных при кодировании этих двух полубайтов: сначала кодируется один полубайт, то есть из комбинации битов (b0, b1, b2, b3) получается кодовое слово:

$$(b_0, b_1, b_2, b_3, P_0, P_1, P_2),$$

(символами b_i обозначены информационные биты, а символами P_k – проверочные биты), затем кодируется другой полубайт, получается кодовое слово:

$$(b_4, b_5, b_6, b_7, P_3, P_4, P_5),$$

далее эти два кодовых слова перемежаются следующим образом:

$$(b_0, b_4, b_1, b_5, P_0, P_3, b_2, b_6, P_1, P_4, b_3, b_7, P_2, P_5).$$

Это позволяет исправлять двойные ошибки в результирующем 14-разрядном кодовом слове даже в том случае, если эти ошибки произошли в соседних битах. Данное свойство особенно важно при использовании четверичной системы счисления, которая используется в nanoNET для кодирования одного символа данных двумя битами и позволяет передавать данные на скорости 2 Мбит/с.

Регистры модулей nanoPAN, связанные с FEC

FEC, CRC2 type, Symbols and Modulation (адрес 0x39 — регистр, отвечающий за включение FEC, тип контрольной суммы CRC2, систему модуляции и длину символа):

	TxRxMode	TxRxFwdEc	TxRxCrcType	TxRxDataRate	TxRxModSystem	
	6	4	3	2	1	0

TxRxMode — выбор режима (Auto или Transparent, по умолчанию TxRxMode=0=Auto).

TxRxFwdEc — включение или выключение FEC, по умолчанию TxRxFwdEc=0, FEC отключен.

TxRxCrcType — указание типа контрольной суммы данных.

TxRxDataRate — выбор битовой скорости передачи (500 или 1000 Ksps, по умолчанию TxRxDataRate=0, 1000 Ksps).

TxRxModSystem — выбор способа модуляции (двоичная или четверичная, по умолчанию TxRxModSystem=0, двоичная).

Receive FEC Single Bit Error Count (адреса 0x57 и 0x58 — регистры, в которых содержится число единичных ошибок, исправленных в предыдущем принятом кадре).

0x57:

RxFec1BitErr							
7	6	5	4	3	2	1	0

0x58:

RxFec1BitErr							
	14	13	12	11	10	9	8

RxFec1BitErr — 15-разрядное число единичных ошибок, встретившихся в предыдущем принятом кадре. Этот регистр содержит корректную информацию только в случае, если бит TxRxFwdEc в регистре 0x39 выставлен в значение 1).

Регулирование амплитуды выходного сигнала

Для сбора статистики по функционированию режима FEC использовалась возможность управления силой выходного сигнала в трансиверах nanoPAN. Для этого перед стартом передачи необходимо было занести число от 0 до 63 в младшие шесть байтов регистров RfTxOutputPower с адресами 0x2A и 0x2B (первый соответствует

управлению силой сигнала для кадров с данными, второй предназначен для служебных кадров). В документации на NA1TR8 [4] приводится зависимость выходной мощности сигнала от значения, записанного в указанном регистре (рис. 2).

Таким образом, трансиверы поддерживают 19 градаций мощности сигнала, которые соответствуют значениям (0, 1, 2, 3, 4, 5, 21, 22, 23, 39, 40, 41, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63) в регистре RfTxOutputPower.

Порядок проведения экспериментов

В предыдущих статьях авторов [5, 6] было описано некоторое количество экспериментов по определению условий и качества радиосвязи с использованием трансиверов nanoNET. На основе программного обеспечения, использовавшегося ранее, для изучения условий применения коррекции ошибок FEC была создана новая версия программы. Она загружалась и исполнялась в микроконтроллерах ATmega32L и управляла работой двух радиомодулей nanoNET по интерфейсу SPI. Также с ее помощью результаты измерений отсылались по com-порту в персональный компьютер.

В начале цикла измерений узел-мастер в течение 10 секунд посылал узлу-слейву кадры длиной 128 байт на максимальной выходной мощности. В журнал работы заносилось как значение общего количества отосланных кадров, так и количество кадров, на которые удаленный узел прислал подтверждение о приеме. Каждый кадр передавался не более чем с тремя ретрансляциями, которые автоматически осуществлялись в случае неуспешного приема.

После 10-секундного периода узел-мастер последовательно посылал узлу-слейву кадры, постепенно уменьшая амплитуду сигнала со значения 63 до 0, и фиксировал количество ретрансляций. Если счетчик попыток передачи пакета для текущей мощности сигнала равнялся трем, это означало, что пакет так и не был доставлен адресату (узлу-слейву). Пакеты подтверждения о приеме посылались всегда на максимальной мощности (63).

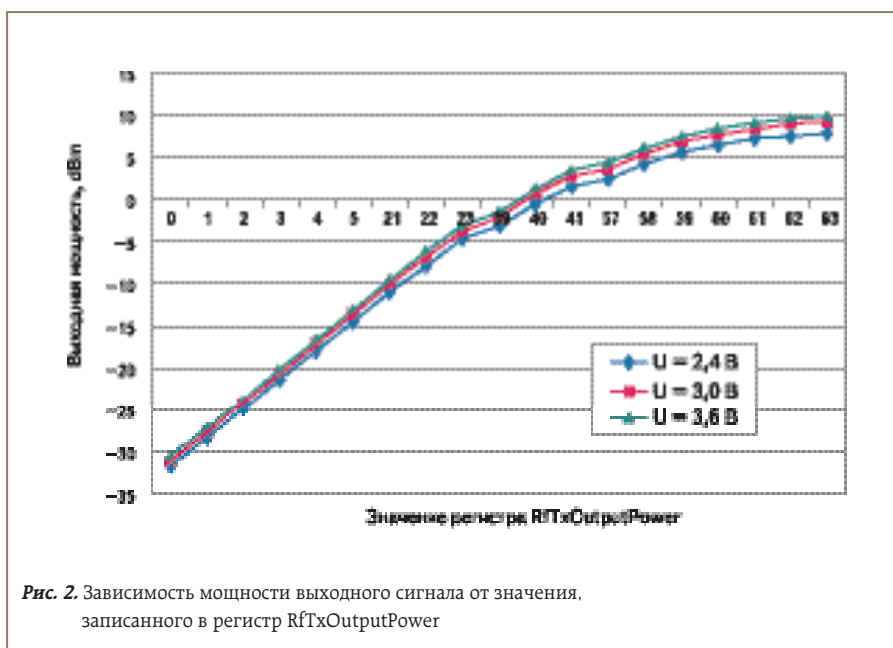


Рис. 2. Зависимость мощности выходного сигнала от значения, записанного в регистр RfTxOutputPower

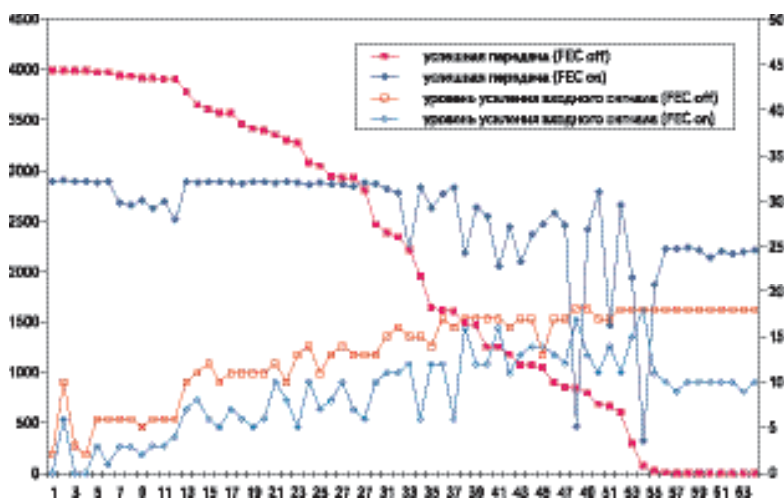


Рис. 5. Количество безошибочных передач кадров за 10 секунд (левая ось) и соответствующий ему пороговый уровень выходного сигнала на передающей стороне (правая ось) при включенной и выключенной коррекции ошибок FEC для 64 точек измерений

падает, а при уровне 18 связь крайне нестабильная (рис. 4).

Использование тестирования линий таким способом может помочь при проектировании маршрутов в сложных радиосетях типа mesh (ячеистая).

3. На рис. 5 представлены данные 64 измерений. Для каждой точки в обоих режимах (FEC on и FEC off) собиралась информация о количестве безошибочных передач и пороговом (минимальном) уровне мощности сигнала на передающей стороне, необходимом для успешной доставки кадра по назначению. Разница между измерениями заключалась в подборе внешних условий прохождения радиосигналов путем отключения антенн и изменения расстояния между источником и приемником кадров.

После набора данных они были отсортированы по убыванию значений количества безошибочно переданных кадров для режима с выключенной коррекцией ошибок FEC (монотонно убывающая кривая из сплошных квадратов на рис. 5, левая ось). Ей соответствует почти монотонно возраст

тающая линия с полыми квадратами. При пороговых уровнях мощности до 10 (правая ось для полых квадратов), уровень безошибочных передач достаточно высок, а уже после 13-й точки по горизонтальной оси начинает снижаться.

Подобная картина наблюдается и для кривых с ромбами (включенный FEC). До 33-й точки количество успешных передач максимально, тогда как с увеличением пороговой мощности выше 10 процент потерь также увеличивается. Разница в максимальных значениях количества отосланных кадров за 10 секунд для включенного и выключенного режима коррекции ошибок составляет примерно 40%, что объясняется увеличением времени передачи из-за введенных в поток дополнительных битов, обеспечивающих избыточность. Другими словами, при включении опции FEC скорость передачи падает примерно в 1,4 раза, что, однако, резко повышает надежность связи и, соответственно, увеличивает зону уверенного приема. При сравнении значений двух кривых с полыми квадратами и ромбами можно отметить,

что при одних и тех же условиях (для одной точки на графике) кривая с квадратами находится выше, в среднем, примерно на 4 деления по правой шкале. Это говорит о том, что благодаря коррекции ошибок можно из более слабого физического входного сигнала «добыть» информационную составляющую без использования дополнительных аппаратных усилителей и средств радиочастотной фильтрации.

Приняв во внимание график (рис. 6), полученный в ходе экспериментов [6], можно заметить, что уменьшение пороговой мощности, достаточной для установления связи, на 4 единицы примерно соответствует 60 метрам увеличения максимального расстояния между узлами, что представляется очень серьезной цифрой.

Заключение

Как уже было показано, введение аппаратной коррекции ошибок практически всегда позволяет достичь более устойчивой связи. «Платой» за это является уменьшение пропускной способности радиоканала.

В заключение необходимо отметить, что включение опции FEC не избавляет от ошибок, оно лишь помогает некоторые из них исправить. Даже если FEC-декодер вследствие случайности помех не определит наличие ошибки (например, строенная, счетверенная), то это почти наверняка будет определено на приемной стороне при CRC-декодировании.

Авторы благодарят Д. А. Екимову (Петрозаводский государственный университет) за высказанные критические замечания.

Данное исследование проведено в рамках проекта «Научно-образовательный центр по фундаментальным проблемам приложении физики низкотемпературной плазмы» (RUX0-013-PZ-06), поддерживаемого Министерством образования и науки РФ, Американским фондом гражданских исследований и развития (CRDF) и Правительством Республики Карелия, а также частично финансировалось Техническим Научно-исследовательским Центром Финляндии (VTT) в рамках договорных работ. [1]

Литература

1. Мак-Вильямс Ф. Дж., Слоэн Н. Дж. А. Теория кодов, исправляющих ошибки. М.: Радио и связь, 1979.
2. RFC 2354. Options for Repair of Streaming Media. June 1998. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2354.txt>
3. NanoNET PHY and MAC System Specifications, ver.1.04. Nanotron Technologies GmbH, Alt-Moabit 60, 10555 Berlin, Germany. NA-03-0101-0230-1.04.
4. NanoNET TRX (NA1TR8) Transceiver Datasheet, ver. 2.07. Nanotron Technologies GmbH, Alt-Moabit 60, 10555 Berlin, Germany. NA-03-0111-0239-2.07.
5. Мощевикин А. П. Исследование скорости передачи данных в беспроводных сетях Nanonet // Беспроводные технологии. 2006, № 3.
6. Жиганов Е. Д., Красков С. Е., Мощевикин А. П. Исследование условий применимости приемопередатчиков стандарта Nanonet в беспроводных сетях датчиков // Беспроводные технологии. 2007, № 1, 2.
7. Nanonet TRX (NA1TR8) Transceiver Register Description, ver. 1.06. Nanotron Technologies GmbH, Alt-Moabit 60, 10555 Berlin, Germany. NA-03-0100-0246-1.06.

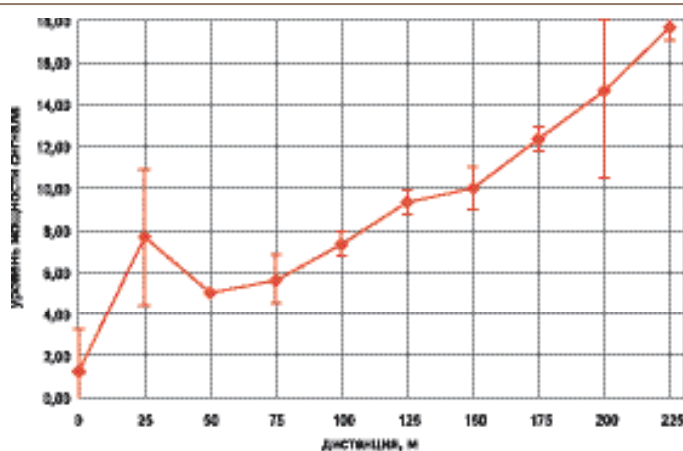


Рис. 6. Зависимость минимального уровня мощности (в соответствии со значением регистра RfTxOutputPower), от 0 до 18, достаточного для установления устойчивой связи между модулями, от расстояния между ними (значения точек на графике по вертикальной оси не соответствуют значениям целых чисел вследствие усреднения результатов для каждой отметки по оси расстояния) [6]