

УДК 681.391

М. Ф. Виткова, аспирант (БГТУ);**Д. М. Романенко**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)**ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА КАНАЛА СВЯЗИ ПРИ МНОГОПороГОВОМ ДЕКОДИРОВАНИИ ИТЕРАТИВНЫХ КОДОВ**

В статье рассмотрены основные параметры качества бинарного цифрового канала связи, особенности их расчета. Описаны способы измерения параметров, достоинства и недостатки каждого из них. Проанализирована возможность определения качества канала при передаче реального трафика с точностью до бита в процессе многопорогового декодирования трехмерных итеративных кодов. Выявлены особенности исправления многократных ошибок при многопороговом декодировании, позволяющие определить число ошибочных бит в передаваемой последовательности в режиме без отключения связи.

The article describes the main quality parameters of binary digital communication channel, features of their calculation. Describes the methods of measuring parameters, each of them the advantages and disadvantages. Possibility of channel quality determination at transfer of a real traffic with an bit accuracy during multithreshold decoding process of three-dimensional iterative codes is analysed. Features of multiple mistakes correction during the multithreshold decoding, which allow to define number of wrong bits in the transmitted sequence in a mode without communication disconnect, are identified.

Введение. В настоящее время весьма актуальна проблема надежной передачи информации по каналам связи, связанная с необходимостью коррекции появляющихся ошибок. Под каналом понимается комплекс технических средств и среды распространения, обеспечивающих передачу сигнала электросвязи в полосе частот и со скоростью, характерных для данного канала. Если в канале информация передается в дискретном (цифровом) виде, такой канал называется цифровым каналом. Соответственно, важнейшим параметром канала передачи информации, который необходимо измерять, является достоверность передачи информации. В цифровых каналах этот показатель характеризуется числом ошибок, возникающих при передаче дискретной информации.

Стоит отметить, что в современных системах для передачи цифровой информации используются различные типы модуляции и многоуровневого кодирования, однако окончательное оборудование систем передачи в той или иной степени использует именно бинарный цифровой канал, поэтому методология измерений бинарного канала составляет фундамент измерений цифровых каналов связи и имеет особенное значение.

Основная часть. Основное назначение бинарного цифрового канала – это передача цифровой информации в двоичной форме, т. е. в виде битов. Поэтому основными параметрами при измерении цифрового бинарного канала являются BIT (bit errors – количество ошибочных бит), BER (bit error rate – параметр ошибки по битам) и ES (error seconds – количество секунд, пораженных ошибками) [1]. Все остальные параметры являются производными этих трех параметров.

BIT или BIT ERR (bit errors) – число ошибочных бит – этот параметр, используемый при анализе канала на наличие битовых ошибок, является числителем в выражении для расчета BER. Битовые ошибки подсчитываются только во время пребывания канала в состоянии готовности [1].

BER или RATE (bit error rate) – это частота битовых ошибок или коэффициент ошибок по битам. Данный параметр является основным в системах цифровой передачи. Он равен отношению числа битовых ошибок к общему числу бит, переданных за время проведения теста по каналу:

$$BER = \frac{N_{\text{ош}}}{N_{\text{общ}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ош}}$ – число ошибочных бит, $N_{\text{общ}}$ – общее число передаваемых бит.

Для определения данного параметра требуется передача специальной тестовой последовательности, а следовательно, измерения могут быть проведены только в случае полного или частичного отключения цифрового канала от полезной нагрузки.

ES (errors seconds) – длительность поражения сигнала ошибками, т. е. количество секунд с ошибками. Фактически параметр ES показывает интервал времени поражения всеми видами ошибок в канале, находящемся в состоянии готовности.

Измерение параметров качества каналов может осуществляться в двух режимах: с отключением и без отключения канала.

Режим измерения с отключением подразумевает то, что канал не используется в процессе измерений для передачи реального цифрового

трафика. В этом случае в качестве источника и приемника двоичного сигнала используются генератор и анализатор тестовой последовательности соответственно. Между ними осуществляется синхронизация по тестовой последовательности, т. е. анализатор предсказывает следующий символ полученной последовательности. Существуют различные алгоритмы синхронизации тестовых последовательностей. На практике используются два типа тестовой последовательности – фиксированные и псевдослучайные.

Измерения с отключением канала – это единственный метод анализа параметров бинарного цифрового канала с точностью до единичной битовой ошибки. Это гарантируется принципом сравнения реальной принятой последовательности битов с предсказанной, которая, в свою очередь, точно совпадает с генерируемой последовательностью. Данный анализ сравнения позволяет рассчитать коэффициент ошибок по битам BER, что, в свою очередь, позволяет определить качество бинарного канала.

Измерения без отключения канала предусматривают использование специальных алгоритмов анализа параметров канала при передаче реального трафика.

В данном случае нет возможности предсказания передаваемой информации, следовательно, нет возможности простого сравнения реальной последовательности битов с предсказанной последовательностью, поэтому невозможно определить единичную битовую ошибку. Методы измерения без отключения канала основаны на идентификации битовой ошибки в некотором блоке переданной информации, таким образом, точность измерения ограничена размерами блока – несколько ошибок в блоке идентифицируются как одна. В то же время несомненное преимущество метода – отсутствие необходимости отключения канала – определило широкое его распространение.

С практической точки зрения наибольший интерес представляет режим измерений бинарного канала без отключения связи. Исходя из вышесказанного, можно сказать, что задачей данного исследования является определение числа ошибочных бит без использования метода сравнения передаваемых последовательностей.

Моделирование многопорогового декодирования трехмерных итеративных кодов [3] с модифицированным алгоритмом выбора пороговых значений [2] для стадии декодирования показало, что существует возможность определить кратность исправляемых ошибок непосредственно в процессе декодирования кодовой последовательности, т. е. при передаче реального трафика по каналу данных.

В методе многопорогового декодирования каждый информационный бит проверяется отдельно на каждой стадии. Исправление ошибочных битов зависит от значения порога на каждой стадии декодирования. Под стадией многопорогового декодирования следует понимать декодирование кодового слова с заданным пороговым значением. Стадии декодирования выполняются последовательно, друг за другом. Таким образом, можно сказать, что идентификация и исправление ошибок в информационной последовательности выполняются несколько раз при различных пороговых значениях. При декодировании итеративных кодов число стадий и пороговое значение зависят от числа паритетов. Пороговое значение – это недопустимое число проверочных символов, указывающих на наличие ошибки в проверяемом бите. При достижении порогового значения проверяемый бит принимается за ошибочный и инвертируется.

В исследовании осуществлялось декодирование трехмерных итеративных кодов с пятью линейно-независимыми паритетами. Процесс декодирования будет осуществляться в 3 стадии с тремя различными пороговыми значениями [2]. Максимальное пороговое значение ($T_1 = T_{\max}$), используемое на первой стадии, принимается равным числу линейно-независимых паритетов. Минимальное же пороговое значение, используемое на последней (третьей) стадии, принимается равным $T_3 = T_{\max}/2$ и с учетом правила округления будет равно 3. Следовательно, T_2 принимается равным 4.

Для изучения особенностей исправления ошибок многопороговым декодером были сгенерированы и исправлены все возможные ошибки заданной кратности m в кодовой последовательности длиной n . Исследование проводилось при декодировании кодового сообщения с длиной информационной части 64 бит.

Общее число возможных ошибок рассчитывается по формуле:

$$C_n^m = \frac{n!}{(n-m)!m!}, \quad (2)$$

где m – кратность генерируемой ошибки, n – длина кодовой последовательности, которая рассчитывается по формуле:

$$n = k + r, \quad (3)$$

где k – количество информационных битов, r – количество проверочных символов.

Результаты декодирования показали, что, зная особенности исправления многократных ошибок, можно определить кратность этих ошибок в режиме без отключения связи.

Для определения числа ошибочных бит был разработан алгоритм определения кратности ошибок. Для того, чтобы описать разработанный алгоритм, необходимо ввести следующие обозначения:

- i – номер стадии, на которой осуществляется проверка;
- j – номер проверяемого бита;
- t_{ij} – число паритетов, свидетельствующих об ошибочности проверяемого бита;
- T_i – пороговое значение на текущей стадии;
- c – число инвертированных бит;
- n – длина кодового сообщения;
- f – флаг наличия паритетов, указывающих на ошибочность проверяемого бита;
- l – длина пакета ошибок.

Алгоритм определения кратности появляющихся в процессе передачи ошибок можно разбить на следующие этапы.

Этап 1:

а) переменной i присваиваем значение 1 ($i = 1$) – начинаем проверку с первой стадии декодирования;

б) переменной j присваиваем значение 1 ($j = 1$) – проверяем первый бит в кодовом сообщении;

в) задаем $T_i = 5$ – пороговое значение на первой стадии, т. к. используем итеративный код с пятью паритетами [2];

г) присваиваем $c = 0$;

д) $n = 64$ – длина информационного сообщения;

е) присваиваем $f = 0$ – на начальном этапе ни один паритет не указывает на ошибку.

Этап 2: подсчитываем количество паритетов t_{ij} на i -ой стадии декодирования j -ого переданного символа, указывающих на ошибочность проверяемого бита.

Этап 3:

а) если $t_{ij} > 0$, то переменной $f = 1$, иначе – переходим к этапу 4;

б) если $t_{ij} \geq T_i$ (достигнуто пороговое значение), то инвертируем бит, иначе переходим к этапу 4;

в) переменную c увеличиваем на 1 ($c = c + 1$).

Этап 4:

а) переходим к анализу следующего полученного кодового символа, т. е. если $j < n$, то $j = j + 1$, переходим к подпункту в 1-го этапа.

Этап 5:

а) если $i < 3$ (т. к. процесс декодирования осуществляется в 3 стадии [2]), то $i = i + 1$ – переходим к следующей стадии декодирования, иначе – процесс декодирования завершен, переходим к этапу 6;

б) присваиваем $j = 1$ – начинаем проверку на следующей стадии с первого бита;

в) присваиваем $f = 0$;

г) присваиваем $t_{ij} = 0$ и возвращаемся к этапу 2.

Этап 6: если $f = 0$, то $m = c$, иначе делаем вывод о том, что определить кратность ошибки по процессу декодирования не можем.

Таким образом, данный алгоритм позволяет определить кратность ошибки, если на последней (третьей) стадии ни один паритет не свидетельствует об ошибочности хоть одного бита. В таком случае мы можем утверждать, что кратность ошибки m равняется числу инвертированных бит c . К тому же, если была инвертирована последовательность подряд идущих бит, а именно:

$$\begin{aligned} t_{ij} &\geq T_i, \\ t_{i,j+1} &\geq T_i, \\ t_{i,j+l} &\geq T_i, \end{aligned} \quad (4)$$

то была исправлена модульная ошибка кратностью l , в противном случае ошибка была независимая. Стоит отметить, что некоторые биты многократной модульной ошибки могут быть обнаружены и исправлены на более поздних стадиях декодирования, поэтому позиции инвертированных бит необходимо запоминать, чтобы по окончании декодирования можно было проверить, действительно ли были исправлены подряд идущие биты.

Кроме описанного выше алгоритма, были выявлены другие особенности исправления однократных и двукратных ошибок. Однако обозначенные ниже признаки характерны для однократных и двукратных ошибок также только в том случае, если на последней стадии декодирования ни один проверочный символ не указывает на ошибочность проверяемых битов:

– если произошла ошибка однократная, то на первой стадии декодирования 5 паритетов указывают на один ошибочный бит в j -ом кодовом символе, то есть $t_{1,j} = 5$, при этом на второй стадии имеем $t_{2,j} = 0$ для всех $j \in [1; k]$;

– если произошла двукратная ошибка, то на первой стадии на каждый ошибочный бит указывают по 5 паритетов ($t_{1,j} = 5$), при этом на второй стадии таких паритетов нет ($t_{2,j} = 0$ для всех $j \in [1; k]$); или на первой и второй стадии по 4 паритета указывают на ошибочность двух битов ($t_{1,j} = 4$, $t_{2,j} = 4$), а для третьей стадии декодирования характерно следующее: $t_{3,j} = 0$ для всех $j \in [1; k]$.

Как упоминалось ранее, исследования проводились на примере трехмерного итеративного кода с числом паритетов 5. Тем не менее, учитывая то, что корректирующая способность итеративных кодов с числом паритетов 7 и 9 выше, предполагается, что при использовании таких кодов будут наблюдаться аналогичные особенности исправления однократных и двукратных ошибок. Более того, можно предположить, что

при декодировании таких кодов будут обозначены признаки исправления не только однократных и двукратных ошибок, но и ошибок более высокой кратности.

Зная кратность ошибки, возникшей в кодовой последовательности, путем суммирования можно определить число ошибочных бит в передаваемых по каналу данных пакетах. Это позволит рассчитать коэффициент по битам BER (1).

В зависимости от значения данного коэффициента можно определить качество канала (табл. 1). Предлагается условно разделить качество канала на пять категорий: А (высокое), В (хорошее), С (среднее), D (низкое) и Е (деградация).

Таблица 1
Определение качества канала по коэффициенту BER

Категория	Значение BER
А (высокое)	$BER \rightarrow 0$
В (хорошее)	$10^{-8} < BER < 10^{-7}$
С (среднее)	$10^{-7} < BER < 10^{-5}$
Д (низкое)	$10^{-4} < BER < 10^{-3}$
Е (деградация)	$BER < 10^{-3}$

Если же нет возможности определить кратность ошибки, а соответственно, рассчитать параметр BER, то предлагается определять качество канала по числу пропущенных стадий, как показано в табл. 2. Отметим, что определить число пропущенных стадий позволяет модифицированный алгоритм выбора пороговых значений, описанный в [2].

Таблица 2
Определение качества канала по числу пропущенных стадий

Категория	Количество пропущенных стадий, %	Число паритетов
А (высокое)	>66	5
В (хорошее)	52–66	
С (среднее)	41–52	
Д (низкое)	32–41	
Е (деградация)	24–32	

Окончание табл. 2

Категория	Количество пропущенных стадий, %	Число паритетов
А (высокое)	>75	7
В (хорошее)	66–75	
С (среднее)	58–66	
Д (низкое)	51–58	
Е (деградация)	44–51	
А (высокое)	>80	9
В (хорошее)	74–80	
С (среднее)	68–74	
Д (низкое)	63–68	
Е (деградация)	56–63	

Заключение. Таким образом, разработан алгоритм, позволяющий определить число ошибочных бит в режиме без отключения канала при использовании многомерных итеративных кодов и модифицированного метода многопорогового декодирования. При этом, зная число ошибочных бит и объем передаваемых по каналу связи пакетов, можно рассчитать коэффициент ошибок по битам BER, то есть определить качество канала с точностью до бита.

Литература

1. Канаков, В. А. Новые технологии измерения в цифровых каналах передачи информации. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Современные системы мобильной цифровой связи, проблемы помехозащищенности и защиты информации» / В. А. Канаков. – Нижний Новгород, 2006. – 91 с.
2. Виткова, М. Ф. Анализ возможности оптимизации многопорогового декодирования многомерных итеративных кодов // Сборник научных работ 63-й НТК студентов и магистрантов БГТУ, 23–28 апреля 2012. – Минск, БГТУ. – Ч. 4. – 2012, с. 332–335.
3. Романенко, Д. М. Многопороговое мажоритарное декодирование низкоплотностных кодов / Д. М. Романенко, Д. В. Шиман, М. Ф. Виткова // Труды БГТУ. – 2011. – № 6: Физ.-мат. науки и информатика. – С. 128–132.

Поступила 07.03.2013