

УДК 621.396.96

В.М. Кичак, В.Д. Тромсюк

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК БИТОВЫХ ОШИБОК

Введение

В современных системах передачи-приема данных предъявляются высокие требования к помехоустойчивости, скорости передачи, надежности и характеристикам ошибок [1–5]. В любой системе, особенно при воздействии на нее интенсивных промышленных (преимущественно, импульсных) помех, возникают различные ошибки. Часто на выходе таких систем происходит вставка-выпадение битов, что приводит к сдвигу информационных последовательностей и образованию длинных пакетов ошибок, которые превышают корректирующую способность самых мощных помехоустойчивых кодов [1–3]. Поэтому для обеспечения высокой достоверности передачи данных необходима оценка таких параметров битовых ошибок, как вставка-выпадение битов. Такая оценка должна однозначно отвечать на вопросы, какие помехоустойчивые коды нужно использовать при передаче информации в промышленных системах передачи-приема данных с высоким уровнем помех, чтобы обеспечить заданный уровень надежности, помехоустойчивости и достоверности. При этом для исправления и оценки битовых ошибок в таких системах нужно знать уровни и длину этих ошибок. Существующие методы и фирменное измерительное оборудование для таких систем не позволяют выявлять и оценивать все необходимые характеристики битовых ошибок, а именно вставку и выпадение битов [1, 4, 6].

Основная задача, которая возникает при оценке битовых ошибок и является причиной принципиальных трудностей, состоит в том, что битовые ошибки (вставка-выпадение битов) непосредственно наблюдать невозможно. В отличие от единичных аддитивных ошибок задача достижения высокой точности локализации битовых ошибок является более сложной. Ситуация еще больше усложняется при наличии в рассматриваемом потоке данных единичных аддитивных ошибок в пределах битовых ошибок [1, 4]. Поэтому, помимо разработки новых методов, важна возможность их проверки с помощью имитационных моделей.

Для оценки качества промышленных компьютерных систем в условиях интенсивных промышленных (импульсных) помех и проектирования устройства, которое будет исправлять (корректировать) битовые ошибки, необходимо знать диапазон изменения их параметров: длин вставок-выпадений и их позиции в пакете анализируемых данных. Битовые ошибки могут быть выявлены и оценены в результате статистических исследований дискретных каналов с помощью программной реализации быстродействующих специализированных вычислительных устройств, работающих в режиме реального времени на тактовой частоте демоду-

© В.М. КИЧАК, В.Д. ТРОМСЮК, 2017

*Международный научно-технический журнал
«Проблемы управления и информатики», 2017, № 3*

лированной последовательности [5, 7–10]. Сложность создания программной модели указанных устройств состоит в том, что битовые ошибки проявляются на фоне единичных аддитивных ошибок, которые всегда присутствуют в промышленных компьютерных системах. Последние могут привести к повышению погрешности вычисления длин вставок, выпадений битов и их позиций. Степень влияния единичных аддитивных ошибок на погрешность вычисления параметров битовых ошибок еще практически не исследована [1, 9–12].

Анализ результатов исследований и публикаций показал, что разработка моделей оценивания параметров битовых ошибок при различных видах демодуляции дискретных сигналов достаточно подробно рассмотрена в работах И.Г. Бакланова, В.А. Канакова, E. James Gilley, D. Mitić, K. Chy Deepak, Md. Khaliluzaman, K.V. Sambasiva Rao, Hu Zhengbing, Jiwei Huang, Sen Yang [4, 11–19] и других авторов.

Применение результатов исследований этих авторов связано с многочисленными приближениями и значительными погрешностями выявления позиций и оценивания вставок-выпадений битов на фоне единичных аддитивных ошибок. Поэтому возникает задача оценки параметров битовых ошибок на фоне широкого диапазона вариаций изменений единичных аддитивных ошибок с помощью ранее предложенных методов и устройств [7, 8]. При этом для выявления и оценки битовых ошибок нужно разработать специальную программную имитационную модель, которая позволит найти позиции и значения вставок-выпадений битов в широком диапазоне вариаций параметров единичных аддитивных ошибок, что и является основной целью статьи. Для этого предполагается генерация тестовой псевдослучайной последовательности, моделирование источника ошибок для канала передачи информации и моделирование двух вариантов устройств оценивания параметров битовых ошибок (ПБО), построенных на базе разработанных ранее методов и алгоритмов [5, 7–10, 20].

Моделирование устройств оценивания ПБО

В качестве модели источника ошибок используется обобщенная модель Гильберта–Эллиота [21–23], т.е. простая и однородная цепь Маркова, в которой матрица переходных вероятностей P зависит от номера шага. Цепь содержит одно хорошее состояние (G — good) и три плохих (S — substitution, D — deletion, I — insertion) (рис. 1). В состоянии G ошибок нет, а каждое из трех плохих состояний генерирует особый тип ошибок. В состоянии I случайный бит вставляется в поток (INS), в состоянии D — бит выпадает (DEL). В состоянии S возникают единичные аддитивные ошибки. Вероятность перехода из состояния D в состояние S обозначается как $P_{D,S}$. Выходные параметры модели Маркова приведены в табл. 1 [21].

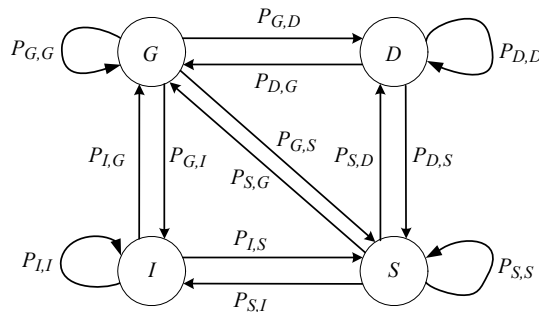


Рис. 1

Таблица 1

З/В	G	I	D	S
G	0,999995	0,000002	0,000002	0,000001
I	0,888888	1/9	0	0,000001
D	0,888888	0	1/9	0,000001
S	0,999995	0,000002	0,000002	0,000001

Цепь Маркова для обобщенной модели Гильберта–Эллиота является эргодической, т.е. для любых состояний c_j существуют независимо от начальных вероятностей P_{c_j} границы $\lim_{j \rightarrow \infty} P_{c_j} = P_{c_\infty}$, которые называются конечными вероятностями $\|P_{c_{j+1}}\| = \|P_{c_j}\| \cdot P$ (P — матрица вероятностей). При этом, полагая, что $j \rightarrow \infty$, и учитывая условия нормирования, можно подсчитать конечные вероятности эргодической цепи из системы уравнений:

$$\begin{cases} \|P_{c_{j+1}}\| = \|P_{c_\infty}\| \cdot P; \\ \sum_{c_\infty=0}^{K-1} P_{c_\infty} = 1, \end{cases}$$

где K — размерность матрицы переходных вероятностей [21].

При моделировании выходные параметры модели Маркова будут меняться таким образом, чтобы обеспечить изменение конечных вероятностей в заданных пределах согласно методике многопараметрических статистических исследований стабильности и погрешности определения параметров битовых ошибок, которая будет описана ниже.

Поскольку распределение длин интервалов серий одинаковых состояний для модели Гильберта–Эллиота является геометрическим, т.е. длина интервала $N=1$ появляется с вероятностью p ; $N=1$ — с вероятностью $(1-p) \cdot p$, ..., $N=n$ — с вероятностью $(1-p)^{n-1} \cdot p$ (p — вероятность перехода в любое другое состояние), метод генерации случайной величины с таким распределением будет случайной величиной [20]. В имитационной модели этот метод используется для генерации параметров следующего элемента потока состояний.

Имитационные модели устройства оценки ПБО, построенного на базе усовершенствованного корреляционного и позиционного методов, реализованы в строгом соответствии с методами и алгоритмами, которые были рассмотрены в [5, 7–10]. Опишем кратко работу основных модулей имитационной модели (рис. 2).

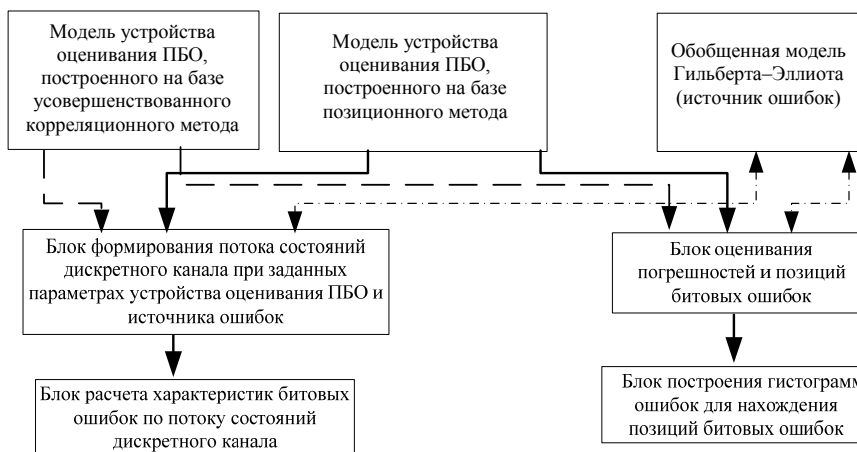


Рис. 2

Модуль получения потока состояний, при заданных параметрах устройства и источника ошибок, осуществляет генерацию эталонной тестовой последовательности. Он на основе потока состояний исследуемой системы вносит в последовательность ошибки, генерируемые источником ошибок, и осуществляет обработку полученной последовательности с помощью устройства оценки ПБО на основе усовершенствованного корреляционного или позиционного метода [7, 8]. Модуль обеспечивает запись входящего потока состояний, который поступает от источника ошибок и выходящего потока состояний из выхода устройства оценки ПБО.

Модуль получения оценок погрешностей позиций битовых ошибок аналогичен модулю получения потока состояний, он также обеспечивает проведение серии испытаний и инициализирует устройство оценки ПБО после каждой серии. При этом запись начального и полученного с выхода устройства оценки ПБО потока состояний в файл не производится. Каждое испытание продолжается до первой битовой ошибки в исследуемом битовом потоке. Если тип (вставка-выпадение) и длина битовой ошибки определены устройством верно, то определяется абсолютная погрешность расчета позиции битовой ошибки в битах, в противном случае фиксируется фатальная ошибка (fatal error) [22, 23].

Последовательность операций при выявлении и оценке параметров и характеристик битовых ошибок

Для выявления и оценки параметров и характеристик битовых ошибок на программной имитационной модели использовалась такая последовательность операций (методика многопараметрических статистических исследований стабильности и погрешности определения параметров битовых ошибок):

1. Изменяя значение параметра m (определяет период тестовой последовательности $T = 2^m - 1$) в диапазоне от 5 до 12 при фиксированных значениях других параметров, найти такое его значение, при котором погрешность вычисления параметров битовых ошибок будет минимальной.

2. Изменяя длину окна WinSize (далее просто WinSize) устройства при фиксированном оптимальном значении параметра m , найти значение WinSize, которое минимизирует ошибку вычисления параметров битовых ошибок.

3. При фиксированных значениях параметра m и WinSize найти зависимость погрешности вычисления параметров битовых ошибок и ее среднее отклонение от уровня битовых ошибок в пределах от $225 \cdot 10^{-8}$ до $225 \cdot 10^{-4}$ на бит, при нескольких различных значениях единичных аддитивных ошибок — 10^{-6} , 10^{-3} , 10^{-2} на бит.

4. При фиксированных значениях параметра m и WinSize найти зависимость погрешности вычисления параметров битовых ошибок и ее среднее отклонение от уровня единичных аддитивных ошибок в пределах от 10^{-6} до 10^{-1} на бит, при фиксированном уровне битовых ошибок — $225 \cdot 10^{-6}$ на бит.

5. Получить гистограммы распределения погрешностей позиций битовых ошибок для некоторых значений уровня ошибок.

6. Рассчитать характеристики единичных аддитивных ошибок и битовых ошибок, изменяя их уровни.

7. Получить для некоторых значений уровня ошибок различные гистограммы распределения (длин пакетов единичных аддитивных ошибок, вставок и выпадений бит, безошибочных интервалов, интервалов между битовыми ошибками) для начальной выборки и выборок потока состояний, полученных с помощью усовершенствованного корреляционного и позиционного методов [7, 8].

Выбор нижней границы диапазона параметра m (п. 1 методики) обусловлен тем, что при уменьшении параметра m и соответствующих длин отрезков рассматриваемой последовательности (окон) увеличивается вероятность неверного определения фазы, даже без учета битовых ошибок. При $m < 5$ размер отрезка рассматриваемой последовательности меньше или равен 15 бит, что недостаточно для принятия правильного решения о фазе сигнала в случае вставок или выпадений битов. Выбор верхней границы диапазона параметра m (п. 1) объясняется тем, что вероятность возникновения длинных участков вставок/выпадений битов в реальных системах небольшая. Поэтому ограничение размеров окон по верхней границе вызвано ограничением параметра m , а это не приводит к существенному увеличению вероятности фатальной ошибки p_f при росте вероятности появления битовых ошибок.

Согласно этой последовательности операций, ни о каком гарантированном определении всех битовых ошибок не может быть и речи. Битовые ошибки можно локализовать только с определенной погрешностью, которая определяется как местом возникновения битовой ошибки в тестовой последовательности, так и параметрами самой ошибки [4, 6, 10–12]. Общая погрешность и максимальные размеры выявленных битовых ошибок зависят от типа применяемой тестовой последовательности, а также от уровня битовых ошибок. Поэтому для выявления битовых ошибок необходимо, чтобы участки тестовой последовательности содержали информацию о положении каждой информационной единицы в этом потоке. Близкими к оптимальным последовательностям для использования их в качестве тестовых для выявления битовых ошибок являются псевдослучайные последовательности, поскольку их автокорреляционная функция близка к дельта-функции [1, 20, 24, 25]. Именно последнее свойство делает возможным выявление сдвигов последовательности на фоне наложенных единичных аддитивных ошибок.

Анализ эффективных подходов к решению задач выявления и оценки битовых ошибок

Кроме систем общего пользования, существуют компьютерные системы промышленного назначения, например производственные сети промышленного предприятия. Такие сети предназначены для нужд промышленного предприятия, управления производственными процессами, безопасности производства и обеспечения непрерывности производства. Анализ особенностей работы таких сетей — важная задача при разработке новой специальной техники выявления и оценивания битовых ошибок, при ее линейных испытаниях и опытной эксплуатации [24]. Оценку битовых ошибок в таких системах можно получить с помощью рекомендаций G.821 и G.826 [26, 27].

Оценка ошибок согласно стандарту G.821 [26] включает параметры ES (Errored Second — число секунд с ошибками) и SES (Severely Errored Second — число секунд с многочисленными ошибками), которые зависят от времени измерения T (для практической оценки качества цифрового соединения). Однако при оценивании битовых ошибок применяются их относительные значения: Errored Second Ratio $ESR = ES / T$ и Severely Errored Second Ratio $SESR = SES / T$.

Заметим, что наличие двух параметров оценки ошибок позволяет не только более точно определить качество цифрового соединения, но и во многих случаях полезно при локализации возможных повреждений каналов связи [26].

По мере распространения широкополосных услуг связи рамки использования стандарта G. 821 становились все более узкими. Попытки же приспособить его для измерения широкополосных цифровых трактов оказались неудачными. Кроме того, определение параметров качества в G.821 основывается на оценке битовых ошибок, а те, в свою очередь, могут быть точно определены лишь тогда, когда

достоверно известна измеряемая цифровая последовательность. Поэтому тестирование в соответствии со стандартом G.821 возможно только при выводе цифрового соединения из эксплуатации, что в большинстве случаев недопустимо, особенно на промышленных предприятиях.

Стандарт G.826 [27], в котором учитываются реалии цифровых сетей связи, включая потребность тестирования канала связи в рабочем режиме, в том числе и в цифровых соединениях с применением оборудования синхронной цифровой иерархии SDH (Synchronous Digital Hierarchy) и асинхронной передачи АТМ (Asynchronous Transfer Mode), обеспечивает решение трех главных задач по организации тестирования ошибок цифровых соединений: во время нормальной эксплуатации; на скоростях 1544 Кбит/с, 2048 Кбит/с и выше; в сетях с использованием технологий SDH и АТМ.

Первая задача была решена путем перехода от тестирования ошибок по битам к тестированию ошибок по блокам. Напомним, блок представляет собой группу последовательных битов, которые относятся к исследуемому цифровому тракту. Каждый бит принадлежит определенному блоку. Контроль блоков выполняется с помощью встроенных в системы передачи специальных устройств, применение которых гарантирует обнаружение ошибки с надежностью не ниже 90 % [27].

Ошибки дискретного сигнала могут быть обнаружены множеством способов без перерыва связи. Их ограничения состоят, прежде всего, в частном характере и недостаточной точности (~10 %). Между тем важнейшими требованиями к методам выявления битовых ошибок дискретного сигнала являются универсальность, экономичность и точность. Универсальность означает применимость метода к любому сигналу, экономичность — эффективное использование дополнительной пропускной способности, ключевое же требование — несомненно, высокая точность (погрешность не больше 1–3 %).

Рассмотрим причины возникновения битовых ошибок [11, 12, 25]:

— если в результате помех сигнал «подтверждение» трансформировался в сигнал «переспрос», то уже принятая кодовая комбинация выдается получателю, а в канал повторно отправляется эта же комбинация. Таким образом, будут получены две последовательно идущие одинаковые комбинации — «вставка»;

— если сигнал «переспрос» трансформировался в сигнал «подтверждение», то ошибочно принятая комбинация будет стерта, но в канал пойдет следующая. Это значит, что произойдет «выпадение».

При этом в стандарте G.826 такие явления, как вставка-выпадение, получили общее название «сдвиг» [27]. Среди множества известных способов блочного контроля ошибок всем указанным требованиям наиболее полно удовлетворяет метод циклического контроля по избыточности (Cyclic Redundancy Code, CRC) [27].

Метод CRC основан на делении и умножении многочленов. При этом делимый многочлен представляет собой последовательную запись блока данных в двоичной форме. Например, в системе Е-1 блок данных, для которого рассчитывается CRC, состоит из 256 байт [24]. Поэтому делимое записывается как двоичное число длиной 2048 бит, которое по особому правилу делится на выбираемый так называемый порождающий многочлен. Полученный остаток используется в качестве контрольной информации и передается по каналу связи вместе с информационным сигналом.

Аналогичная обработка полученного блока данных выполняется на принимающей стороне, и остаток деления многочленов сравнивается с переданным остатком. Различие указанных остаточных многочленов является признаком ошибки в цифровом сигнале.

В большинстве случаев выявление и оценка битовых ошибок в промышленных компьютерных системах реализуются на базе ноутбука, что является современным решением, сочетающим высокие технические характеристики и требования мобильности. Такие микроконтроллерные системы на базе ноутбука строятся с определенными функциональными вычислительными задачами, широкой периферией и буфером памяти [12, 13].

Недостатки такого способа связаны с ограниченностью возможностей выявления вставок-выпадения битов при наличии единичных аддитивных ошибок и невозможности идентификации позиций битовых ошибок. При этом преимущество таких систем — обеспечение настройки программы проведения испытаний, измерительных режимов, визуализации результатов измерительных процедур; накопление статистики; анализ собранных данных; программирование алгоритмов поведения в режимах контроля.

Основные причины появления вставок-выпадения битов в промышленных компьютерных системах — импульсные помехи, которые могут появляться в ходе разных производственных процессов. Поэтому возникает задача выявления мест, где в промышленных компьютерных системах могут быть вставки-выпадения битов. Это позволит получить оценку системы, которая должна однозначно отвечать на вопросы, какие помехоустойчивые коды или другие системы защиты нужно использовать при передаче информации в промышленных системах коммуникаций с высоким уровнем помех, чтобы обеспечить заданный уровень помехоустойчивости, надежности и достоверности.

Существенная проблема выявления и оценки битовых ошибок в промышленных компьютерных системах — объединение ошибок при их выявлении и, как следствие, регистрация на выходе устройства одной ошибки с другими параметрами (рис. 3).

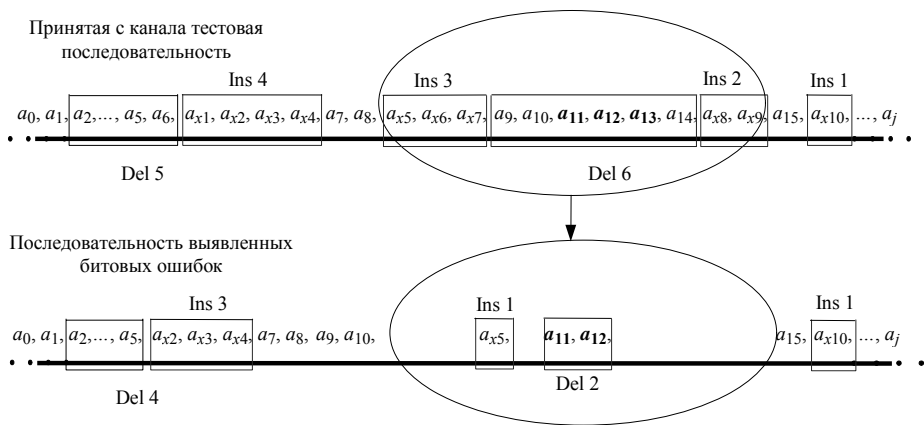


Рис. 3

Объединение ошибок, которые находятся рядом, в первую очередь, объясняется ограниченными возможностями тестовой последовательности. Это, очевидно, будет усиливаться при наличии единичных аддитивных ошибок. Необходимость принятия решения о наличии битовых ошибок в пределах участка конечной длины, принятой с канала тестовой последовательности, является еще одной причиной объединения битовых ошибок. Уменьшение длины последовательностей приводит к увеличению вероятности неверного определения фазы в случае высокого уровня битовых ошибок [25].

Выявление битовых ошибок приводит к возникновению погрешности вычисления позиций битовых ошибок Δ_{abs} и появлению ошибочных (остаточных) пакетов единичных аддитивных ошибок при их регистрации. На рис. 4 показано воз-

никновение ложного пакета единичных аддитивных ошибок (1) вследствие неточной локализации битовой ошибки. В случае точной локализации (2) битовой ошибки дополнительные единичные аддитивные ошибки не регистрируются.

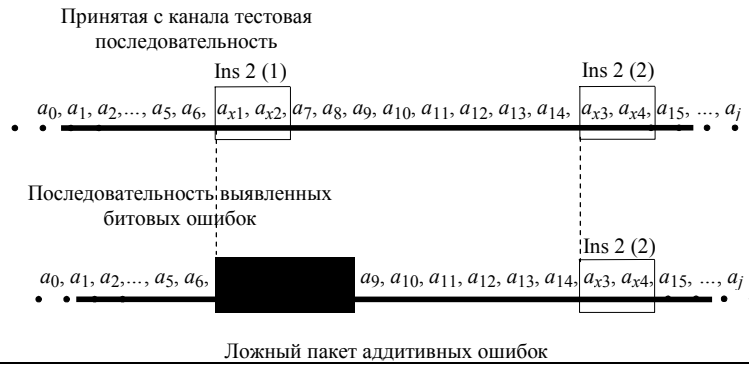


Рис. 4

Для моделирования процессов оценки вставки-выпадения битов целесообразно ввести понятие фатальной ошибки при выявлении и определении параметров битовых ошибок. Вероятность фатальной ошибки p_f равна отношению количества неверно выявленных ошибок и их неверно найденных параметров к числу всех битовых ошибок.

К причинам возникновения недопустимой погрешности относятся [24]:

- невыявление битовой ошибки (вставки-выпадения битов), если ее длина кратна периоду тестовой последовательности;
- объединение битовых ошибок, которые находятся рядом;
- неправильное определение параметров вставки-выпадения, если их длина превышает половину периода тестовой последовательности;
- невозможность правильного определения параметров вставки-выпадений при недопустимом снижении величины веса оценок фазы в последовательностях обработки через большую интенсивность единичных аддитивных ошибок.

Теоретическое определение вероятности фатальной ошибки p_f представляет собой достаточно сложную задачу. В связи с этим ее величина в результате вычислительных экспериментов находится на программной модели алгоритмов и определения параметров битовых ошибок [25].

Нужно отметить, что если наиболее вероятные фазы сигналов в двух последовательностях определены верно, то вставка-выпадение битов будут всегда определены однозначно при наличии одной битовой ошибки (длиной менее $T/2$), а во всех других случаях — при отсутствии объединения. Наличие единичных аддитивных ошибок в центре между скользящими последовательностями может быть определено путем сравнения восстановленного на основе оценки наиболее вероятной фазы бит и бита эталонной тестовой последовательности. Например, для позиционного метода [7] восстановление бита эталонной тестовой последовательности выполняется следующим образом:

$$a_i = A((R + i) \bmod T),$$

где R — существенная относительная позиция одной из двух последовательностей скользящей обработки (левой или правой) с наибольшим весом; A — оператор нахождения младшего бита синхросимвола по его позиции, т.е. значение бита эталонной последовательности по его номеру; T — период эталонной тестовой последовательности; i — значение счетчика по модулю T .

Решение этих проблем — разработка новых методов и алгоритмов выявления и оценки битовых ошибок на фоне единичных аддитивных ошибок с применением рекурсивных тестовых последовательностей, которые позволяют определить фазу синхросимволов.

Результаты моделирования устройств оценки ПБО

Во время имитационного моделирования для проверки погрешности оценки вероятностных характеристик битовых ошибок было проведено три серии испытаний. Анализ полученных данных показывает, что при увеличении параметра m происходит увеличение фатальной ошибки и среднего значения абсолютной погрешности оценки позиций вставок-выпадения битов. Таким образом, оптимальным является значение параметра $m = 5$ и длины битового окна $\text{WinSize} = 31$. Объем тестовой выборки равен 10^7 бит, за исключением первого испытания во второй серии, где объем выборки из-за низкой вероятности ошибок был взят 10^8 бит. В первой серии постепенно с каждым шагом на порядок увеличивались вероятности единичных аддитивных ошибок P_S и битовых ошибок $P_D = P_I$ (от 10^{-6} до 10^{-2} и от $225 \cdot 10^{-8}$ до $225 \cdot 10^{-4}$ соответственно) (табл. 2, 3).

Таблица 2

Конечные вероятности			Характеристики ошибок		
P_G	P_S	$P_D = P_I$	BER	Del	Ins
Серия 1					
0,9999945	$0,1 \cdot 10^{-6}$	$225 \cdot 10^{-9}$	$80 \cdot 10^{-9}$	$180 \cdot 10^{-9}$	$170 \cdot 10^{-9}$
0,9999945	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$225 \cdot 10^{-8}$	$70 \cdot 10^{-8}$	$190 \cdot 10^{-8}$	$180 \cdot 10^{-8}$
0,999945	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$225 \cdot 10^{-7}$	$90 \cdot 10^{-7}$	$221 \cdot 10^{-7}$	$241 \cdot 10^{-7}$
0,999451	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$225 \cdot 10^{-6}$	$104 \cdot 10^{-6}$	$226 \cdot 10^{-6}$	$228 \cdot 10^{-6}$
0,994501	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$225 \cdot 10^{-5}$	$100 \cdot 10^{-5}$	$225 \cdot 10^{-5}$	$222 \cdot 10^{-5}$
0,945011	$0,1 \cdot 10^{-1}$	$225 \cdot 10^{-4}$	$96 \cdot 10^{-4}$	$223 \cdot 10^{-4}$	$218 \cdot 10^{-4}$
Серия 2					
0,9999945	$0,1 \cdot 10^{-6}$	$225 \cdot 10^{-9}$	$98 \cdot 10^{-9}$	$235 \cdot 10^{-9}$	$263 \cdot 10^{-9}$
0,9999945	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$225 \cdot 10^{-8}$	$90 \cdot 10^{-8}$	$221 \cdot 10^{-8}$	$241 \cdot 10^{-8}$
0,9999855	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$225 \cdot 10^{-8}$	$98 \cdot 10^{-7}$	$175 \cdot 10^{-8}$	$200 \cdot 10^{-8}$
0,9998955	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$225 \cdot 10^{-8}$	$102 \cdot 10^{-6}$	$250 \cdot 10^{-8}$	$190 \cdot 10^{-8}$
0,9989955	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$225 \cdot 10^{-8}$	$101 \cdot 10^{-5}$	$230 \cdot 10^{-8}$	$320 \cdot 10^{-8}$
0,9899955	$0,1 \cdot 10^{-1}$	$225 \cdot 10^{-8}$	$100 \cdot 10^{-4}$	$210 \cdot 10^{-8}$	$270 \cdot 10^{-8}$
Серия 3					
0,999954	$0,1 \cdot 10^{-6}$	$225 \cdot 10^{-8}$	$107 \cdot 10^{-9}$	$220 \cdot 10^{-8}$	$235 \cdot 10^{-8}$
0,999954	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$225 \cdot 10^{-7}$	$115 \cdot 10^{-8}$	$216 \cdot 10^{-7}$	$235 \cdot 10^{-7}$
0,999945	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$225 \cdot 10^{-7}$	$90 \cdot 10^{-7}$	$221 \cdot 10^{-7}$	$241 \cdot 10^{-7}$
0,999855	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$225 \cdot 10^{-7}$	$97 \cdot 10^{-6}$	$249 \cdot 10^{-7}$	$231 \cdot 10^{-7}$
0,998955	$0,1 \cdot 10^{-2}$	$225 \cdot 10^{-7}$	$101 \cdot 10^{-5}$	$224 \cdot 10^{-7}$	$241 \cdot 10^{-7}$
0,989955	$0,1 \cdot 10^{-1}$	$225 \cdot 10^{-7}$	$100 \cdot 10^{-4}$	$223 \cdot 10^{-7}$	$240 \cdot 10^{-7}$

Из табл. 2 видно, что при уровне единичных аддитивных ошибок от 10^{-6} до 10^{-2} на бит и битовых ошибок — от $225 \cdot 10^{-8}$ до $225 \cdot 10^{-5}$ на бит предложенные

методы [7, 8] обеспечивают достаточно малую относительную погрешность вычисления параметров битовых ошибок (не больше 1–3 %). Из табл. 3 видно, что позиционный метод [7] имеет меньшую точность измерения параметра BER при высоком уровне ошибок (третья и четвертая строки таблицы в первой серии испытаний), что обусловлено менее точной локализацией битовых ошибок по сравнению с усовершенствованным корреляционным методом [8].

Таблица 3

Усовершенствованный корреляционный метод			Позиционный метод		
<i>BER</i>	<i>DR</i>	<i>IR</i>	BER	DR	IR
Серия 1					
$90 \cdot 10^{-9}$	$200 \cdot 10^{-9}$	$190 \cdot 10^{-9}$	$90 \cdot 10^{-9}$	$120 \cdot 10^{-9}$	$1190 \cdot 10^{-9}$
$70 \cdot 10^{-8}$	$190 \cdot 10^{-8}$	$180 \cdot 10^{-8}$	$70 \cdot 10^{-8}$	$190 \cdot 10^{-8}$	$180 \cdot 10^{-8}$
$100 \cdot 10^{-7}$	$221 \cdot 10^{-7}$	$241 \cdot 10^{-7}$	$100 \cdot 10^{-7}$	$221 \cdot 10^{-7}$	$241 \cdot 10^{-7}$
$153 \cdot 10^{-6}$	$224 \cdot 10^{-6}$	$226 \cdot 10^{-6}$	$163 \cdot 10^{-6}$	$224 \cdot 10^{-6}$	$225 \cdot 10^{-6}$
$44 \cdot 10^{-5}$	$202 \cdot 10^{-5}$	$202 \cdot 10^{-5}$	$560 \cdot 10^{-5}$	$203 \cdot 10^{-5}$	$200 \cdot 10^{-5}$
$32 \cdot 10^{-4}$	$198 \cdot 10^{-4}$	$196 \cdot 10^{-4}$	$796 \cdot 10^{-4}$	$196 \cdot 10^{-4}$	$189 \cdot 10^{-4}$
Серия 2					
$100 \cdot 10^{-9}$	$212 \cdot 10^{-9}$	$230 \cdot 10^{-9}$	$95 \cdot 10^{-9}$	$215 \cdot 10^{-9}$	$230 \cdot 10^{-9}$
$90 \cdot 10^{-8}$	$221 \cdot 10^{-8}$	$241 \cdot 10^{-8}$	$90 \cdot 10^{-8}$	$221 \cdot 10^{-8}$	$241 \cdot 10^{-8}$
$98 \cdot 10^{-7}$	$150 \cdot 10^{-7}$	$200 \cdot 10^{-7}$	$98 \cdot 10^{-7}$	$150 \cdot 10^{-7}$	$200 \cdot 10^{-7}$
$102 \cdot 10^{-6}$	$250 \cdot 10^{-6}$	$190 \cdot 10^{-6}$	$102 \cdot 10^{-6}$	$250 \cdot 10^{-6}$	$190 \cdot 10^{-6}$
$101 \cdot 10^{-5}$	$230 \cdot 10^{-5}$	$320 \cdot 10^{-5}$	$101 \cdot 10^{-5}$	$230 \cdot 10^{-5}$	$320 \cdot 10^{-5}$
$100 \cdot 10^{-4}$	$210 \cdot 10^{-4}$	$270 \cdot 10^{-4}$	$100 \cdot 10^{-4}$	$210 \cdot 10^{-4}$	$270 \cdot 10^{-4}$
Серия 3					
$280 \cdot 10^{-9}$	$220 \cdot 10^{-9}$	$240 \cdot 10^{-9}$	$250 \cdot 10^{-9}$	$220 \cdot 10^{-9}$	$230 \cdot 10^{-9}$
$290 \cdot 10^{-8}$	$216 \cdot 10^{-8}$	$235 \cdot 10^{-8}$	$290 \cdot 10^{-8}$	$216 \cdot 10^{-8}$	$235 \cdot 10^{-8}$
$100 \cdot 10^{-7}$	$221 \cdot 10^{-7}$	$241 \cdot 10^{-7}$	$100 \cdot 10^{-7}$	$221 \cdot 10^{-7}$	$241 \cdot 10^{-7}$
$98 \cdot 10^{-6}$	$249 \cdot 10^{-6}$	$231 \cdot 10^{-6}$	$100 \cdot 10^{-6}$	$248 \cdot 10^{-6}$	$230 \cdot 10^{-6}$
$102 \cdot 10^{-5}$	$223 \cdot 10^{-5}$	$239 \cdot 10^{-5}$	$101 \cdot 10^{-5}$	$223 \cdot 10^{-5}$	$238 \cdot 10^{-5}$
$101 \cdot 10^{-4}$	$222 \cdot 10^{-4}$	$240 \cdot 10^{-4}$	$102 \cdot 10^{-4}$	$222 \cdot 10^{-4}$	$239 \cdot 10^{-4}$

Результирующие графики зависимости относительной погрешности появления битовых ошибок в канале P_p (комплексного показателя (BER), коэффициента вставок (INS), коэффициента выпадений (DEL)) от вероятности фоновых аддитивных ошибок P_S (рис. 5) и битовых ошибок P_{SE} (рис. 6) построены по данным, полученным с помощью имитационной модели. Во второй (рис. 7) и третьей (рис. 8) сериях испытаний с каждым шагом увеличивалась вероятность только единичных аддитивных ошибок (от 10^{-6} до 10^{-2}), но при различных вероятностях битовых ошибок (от $225 \cdot 10^{-8}$ до $225 \cdot 10^{-7}$).

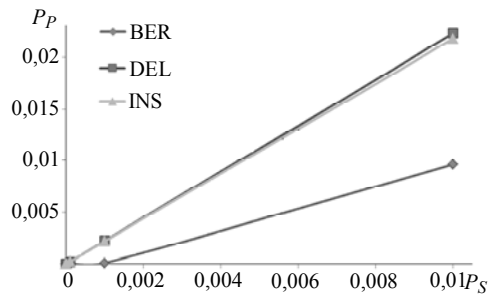


Рис. 5

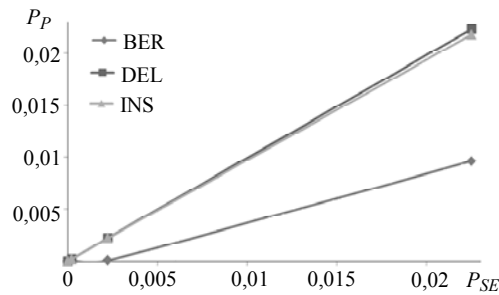


Рис. 6

Из графиков на рис. 5, 6 видно, что при уровне единичных аддитивных ошибок от 10^{-6} до 10^{-2} на бит и битовых ошибок — от $225 \cdot 10^{-8}$ до $225 \cdot 10^{-4}$ на бит предложенные методы обеспечивают достаточно малую относительную погрешность вычисления параметров битовых ошибок, которая не превышает 1–3%. Из графиков на рис. 7, 8 видно, что с ростом единичных аддитивных ошибок увеличивается относительная вероятность битовых ошибок. При этом уровень вставок/выпадения битов будет уменьшаться при уменьшении общей вероятности появления битовых ошибок.

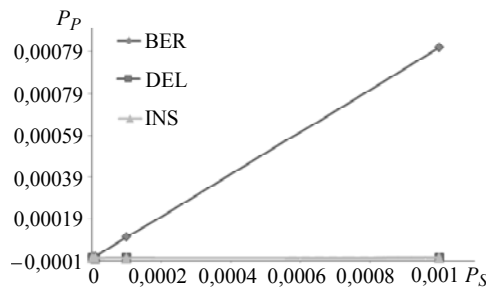


Рис. 7

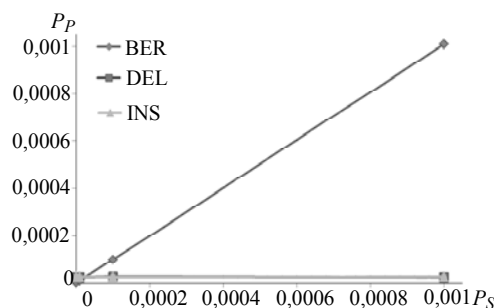


Рис. 8

Заключення

Предложен алгоритм моделювання та функціонування схем пристроїв оцінки ПБО, побудованого на базі удосконаленого кореляційного або позиційного методу, що дозволило розробити методику оцінки параметрів та характеристик бітових помилок на імітаційній моделі.

Розроблена методика багатопараметричних статистических досліджень стабільності та погрешності визначення параметрів бітових помилок дозволила шляхом імітаційного моделювання побудованих алгоритмів встановити робочі діапазони їх застосування.

Аналіз ефективних підходів до розв'язання завдань виявлення та оцінки бітових помилок показав, що існуючі підходи до виявлення та оцінки бітових помилок потребують збільшення точності з погрешністю обчислення параметрів бітових помилок не більше 1–3 %.

Аналіз результатів, які були отримані після трьох серій випробувань на імітаційній моделі, показує, що оцінка бітових помилок за допомогою запропонованої моделі не перевищує 1–3 %, що дозволяє з високою точністю визначати позиції вставок/випадень бітів.

V.M. Kychak, V.D. Tromsyuk

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК БІТОВИХ ПОМИЛОК

Встановлено порядок моделювання та функціонування пристроїв оцінювання параметрів бітових помилок. Розроблено методику оцінювання параметрів бітових помилок на імітаційній моделі за допомогою пристроїв оцінювання ПБП, побудованих на базі удосконаленого кореляційного та позиційного методів для встановлення робочих діапазонів їх застосування.

V.M. Kychak, V.D. Tromsyuk

ASSESSMENT METHOD OF PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF BIT ERRORS

The order of modeling and operation of bit errors parameter estimation devices is established. The method of parameter estimation for bit error simulation model using devices of PBE assessment based on advanced correlation and positional methods for establishing the working ranges of their application is developed.

1. *Бакланов И.Г.* Методы измерений в системах связи. — М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1999. — 196 с.
2. *Шлома А.М., Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П.* Новые алгоритмы формирования и обработки сигналов в системах подвижной связи. — М.: Горячая линия – Телеком, 2008. — 344 с.
3. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. — М.: Вильямс, 2003. — 1098 с.
4. *Mitić D., Lebl A., Markov Z.* Calculating the required number of bits in the function of confidence level and error probability estimation // Serbian Journal of Electrical Engineering. — 2012. — 9, N 3. — P. 361–375.
5. *Кичак В.М., Тромсюк В.Д.* Оцінювання бітових помилок при різних видах демодуляції дискретних сигналів // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». — 2015. — 63. — С. 55–63.
6. *Доможаков Д.А., Дубинский А.В., Раннев Н.Ю.* Методика расчета вероятности возникновения ошибок в высокоскоростных каналах связи // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС-2016): Всероссийская научно-техническая конференция, Москва, Россия, 3-7 октября, 2016. — М.: ИПИМ РАН, 2016. — Ч. II. — С. 164–169.

7. *Кичак В.М., Тромсюк В.Д.* Позиційний метод оцінювання характеристик бітових помилок // Вісник Вінницького політехнічного інституту. Технічні науки. — 2016. — № 3. — С. 116–124.
8. *Кичак В.М., Тромсюк В.Д.* Кореляційний метод оцінювання параметрів бітових помилок // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2015. — № 5. — С. 180–185.
9. *Kychak V.M., Tromsyuk V.D.* Sorting Method of Relative Positions of Synchroimpulses by Frequency of their Occurrence // Journal of Automation and Information Sciences. — 2016. — N 10. — P. 49–56.
10. *Kychak V.M., Tromsyuk V.D.* Initial data processing algorithms of bit error rate testers // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2016): proceedings of the Int. Conf., Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23-26, 2016. — Lviv : Publishing House of Lviv Polytechnic, 2016. — P. 566–568.
11. *Huang J., Yang S., Lall A., Romberg J.* Error estimating codes for insertion and deletion channels // ACM international conference on Measurement and modeling of computer systems «SIGMETRICS '14»: materials of Proceedings of the International Conference. — Austin, Texas, USA. — June 16-20, 2014. — P. 381–393.
12. *Chy D.K., Khaliluzzaman Md.* Comparative performance of BER in the simulation of digital communication systems using raised cosine filter // Proc. of the Third Intl. Conf. on Advances in Computing, Electronics and Electrical Technology. — CEET 2015. — Malaysia. — 2015. — P. 29–33.
13. *Бакланов И.Г.* Тестирование и диагностика систем связи. — М. : Эко-Трендз, 2001. — 271 с.
14. *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». — Нижний Новгород, 2006. — 91 с.
15. *Gilley J.E.* Bit-error-rate simulation using Matlab. — Transkrypt international, INC. — 2003. — P. 1–8.
16. *Chy D.K., Khaliluzzaman Md.* Evaluation of SNR for AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channels Under DPSK Modulation Scheme with Constant BER // International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing (2330-1007). — 2015. — 6, N 6. — P. 7–12.
17. *Sudhir Babu A., Sambasiva Rao Dr.K.V.* Evaluation of BER for AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channels under Various Modulation Schemes // International Journal of Computer Applications (0975 – 8887). — 2011. — 26, N 9. — P. 23–28.
18. *Wolaver D.H.* Measure Error Rates Quickly and Accurately // Electronic Design. — 1995. — P. 89–98.
19. *Hu Zhengbing, Yatskiv V., Sachenko A.* Increasing the Data Transmission Robustness in WSN Using the Modified Error Correction Codes on Residue Number System // Elektronika ir Elektrotechnika. — 2015. — 21, N 1. — P. 76–81.
20. *Bortnik G., Vasylykivskij M.* Phase jitter estimation in radio channels of telecommunication systems // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science – Proceedings of the 11th International Conference, TCSET'2012. — 2012. — P. 307.
21. *Феллер В.* Введение в теорию вероятностей и ее приложения: Пер. с англ. — М. : Мир, 1984. — Т. 1. — 337 с.
22. *Бибило П.Н.* Синтез логических схем с использованием языка VHDL. — М. : СОЛОН-Р, 2002. — 384 с.
23. *Суворова Е.А., Шейнин Ю.Е.* Проектирование цифровых систем на VHDL. — СПб. : БХВ-Петербург, 2003. — 576 с.
24. *Колготин П.В.* Оценка параметров каналов и развитие измерительных технологий в сетях связи специального назначения // Молодой ученый. — 2011. — 1, № 10. — С. 34–39.
25. *Кичак В.М., Тромсюк В.Д.* Оцінювання роздільної здатності кореляційного та позиційного методів // Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2016. — № 2. — С. 204–209.
26. *ITU Recommendation G.821.* End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections. SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND Networks Digital networks – Quality and availability targets. ITU-T. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.821/en>.
27. *ITU Recommendation G.826.* Error performance of an international digital connection operating at a bit rate below the primary rate and forming part of an Integrated Services Digital Network. SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND Networks Digital networks – Quality and availability targets. ITU-T. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.826/en>.

*Получено 06.09.2016
После доработки 30.01.2017*