

УДК 621.391.037.3

А.А. Гладких, С.М. Наместников, Н.А. Пчелин, А.А. Шагарова

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЯГКИХ РЕШЕНИЙ НЕДВОИЧНЫХ СИМВОЛОВ ИЗБЫТОЧНЫХ КОДОВ

Гладких Анатолий Афанасьевич, доктор технических наук, окончил Военную академию связи им. С.М. Буденного, адъюнктуру ВАС, профессор кафедры «Телекоммуникации» Ульяновского государственного технического университета. Имеет монографию, учебные пособия, статьи и патенты РФ в области помехоустойчивого кодирования и защиты информации. [e-mail: a.gladkikh@ulstu.ru].

Наместников Сергей Михайлович, кандидат технических наук, окончил УлГТУ, аспирантуру там же, доцент кафедры «Телекоммуникации» УлГТУ. Имеет, статьи в области статистической обработки сигналов. [e-mail: sernam@ulstu.ru].

Пчелин Никита Александрович, окончил Ульяновское высшее военное командное училище связи. Главный конструктор ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет публикации в области помехоустойчивого кодирования. [e-mail: pna3@yandex.ru].

Шагарова Анна Александровна, старший преподаватель кафедры «Общепрофессиональные дисциплины» Ульяновского института гражданской авиации им. главного маршала авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск. Имеет публикации в области разносигнального приема сигналов в сетях беспроводной передачи информации. [e-mail: Nutka82@list.ru].

Аннотация

В статье рассматриваются способы формирования мягких решений символов (МРС), используемые в системах с двоичной модуляцией. На основе испытаний оригинальных статистических моделей раскрываются свойства таких решений, показываются возможности их использования для решения задач адаптивной обработки сигналов. Учитывая особенности построения каскадных схем кодеков, впервые рассматривается задача формирования оценок надежности недвоичных символов на основе комплексной оценки результатов декодирования комбинаций внутреннего кода и статистических показателей МРС, полученных для символов этих комбинаций из непрерывного канала связи.

Ключевые слова: мягкое решение символа, мягкое решение недвоичного символа, каскадное кодирование.

THE STATISTICAL PROPERTIES AND FEATURES OF FORMATION OF SOFT DECISIONS FOR REDUNDANT CODES NONBINARY CHARACTERS

Anatolii Afanasevich Gladkikh, Doctor of Engineering, graduated from S.M. Budyonny Military Communication Academy, finished his postgraduate studies at the same Academy; Professor at the Department of Telecommunications at Ulyanovsk State Technical University; an author of a monograph, textbooks, research papers, and patents in the field of noiseless coding and information security. e-mail: a.gladkikh@ulstu.ru.

Sergei Mikhailovich Namestnikov, Candidate of Engineering, Associate Professor of the Department of Telecommunications at Ulyanovsk State Technical University; graduated from ULSTU, finished his postgraduate studies at the same University; an author of papers in the field of static methods of signals processing. e-mail: sernam@ulstu.ru.

Nikita Aleksandrovich Pchelin, graduated from Ulyanovsk High Education Military Communications Academy; Chief Designer at Federal Research-and-Production Center Joint Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars'; an author of papers in the field of noiseless coding. e-mail: pna3@yandex.ru.

Anna Aleksandrovna Shagarova, Senior Lecturer at the Department of All-professional Disciplines at Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation B.P. Bugaev; an author of papers in the field of diversity signal reception in wireless data networks. e-mail: Nutka82@list.ru.

Abstract

The article considers the ways of formation of soft decision symbols (SDS) used in the systems with binary modulation. Through the tests of the original statistical models, the properties of these solutions are described, the possibility of their application to problems of adaptive signal processing is shown. Taking into account the cascade scheme of codec construction, the

paper considers the novel problem of estimating the reliability of non-binary symbols based on a comprehensive assessment of decoding results of internal code combinations and statistical parameters of SDS obtained for these combinations from continuous channel.

Key words: soft symbol solution, soft non-binary symbol solution, cascade coding.

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемым элементом любой адаптивной системы является подсистема оценки параметров внешней среды [1, 2]. При передаче данных по каналам с нестационарными характеристиками оценка уровня мешающих факторов в непрерывном канале связи (КС), как правило, осуществляется только на канальном уровне путем фиксации ошибок в ходе декодирования комбинаций используемого помехоустойчивого кода. Совершенно очевидно, что такой подход вносит заметную временную задержку в процедуру адекватной реакции адаптивной системы на актуальные изменения параметров внешней среды, выражающихся в изменении характеристик КС. В целях повышения энергетической эффективности современных систем обмена данными (СОД) в них достаточно активно внедряются мягкие методы обработки комбинаций избыточных кодов [4]. При этом, как правило, в подавляющем большинстве источников обсуждается вопрос использования мягких решений символов (МРС) для повышения корректирующих возможностей избыточных кодов [3–6]. Вопрос применения МРС для целей совершенствования алгоритмов функционирования адаптивных СОД не рассматривался или, за редким исключением, анализировался поверхностно только в качестве постановки задачи и возможных путей ее решения [7].

В данной работе на основе статистического моделирования показывается уникальная возможность использования закономерностей изменений оценок МРС в качестве исполнительного инструмента в процедуре смены адаптивных режимов СОД. Кроме того, впервые решается задача использования МРС двоичных символов для оценки символов недвоичных кодов. Вскрываются особенности таких характеристик и указываются пути совершен-

ствования каскадных схем мягкой обработки данных на базе недвоичных кодов Рида-Соломона (РС).

Цель работы – оценка статистических характеристик мягких решений двоичных символов и их влияния на индексы надежности символов недвоичных кодов в составе схем каскадного кодирования.

ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕЛОЧИСЛЕННЫХ МРС

В работе [2] показано, что применение МРС в системе мягкого декодирования помехоустойчивых кодов обеспечивает энергетический выигрыш до 3-х дБ. МРС могут иметь целочисленные значения или формироваться с бесконечным числом действительных чисел. Целочисленные МРС значительно быстрее обрабатываются декодером и проигрывают непрерывным значениям оценок всего 0,2 дБ, тем более что формирование подобных оценок рассчитано на знание параметров используемых КС, например, в виде оценки дисперсии условных вероятностей приема символов, что является отрицательным фактором при использовании нестационарных КС [4]. При формировании МРС в каналах с неизвестными параметрами целесообразно использовать свойства стирающего КС с широким интервалом стирания в соответствии с аналитическим выражением:

$$\lambda_i(z) = \left\| \frac{\lambda_{\max}}{\rho M_{mn}} \times z \right\|, \tag{1}$$

где λ_{\max} – максимальное значение МРС, принятое в системе,

M_{mn} – математическое ожидание модулируемого параметра,

ρ – интервал стирания (обычно $0 \leq \rho < 1$),

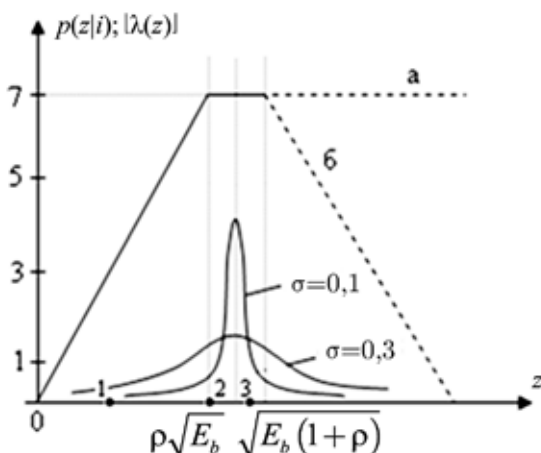


Рис. 1. Модель формирования МРС для двоичных видов модуляции:
а) амплитудная модуляция; б) фазовая модуляция

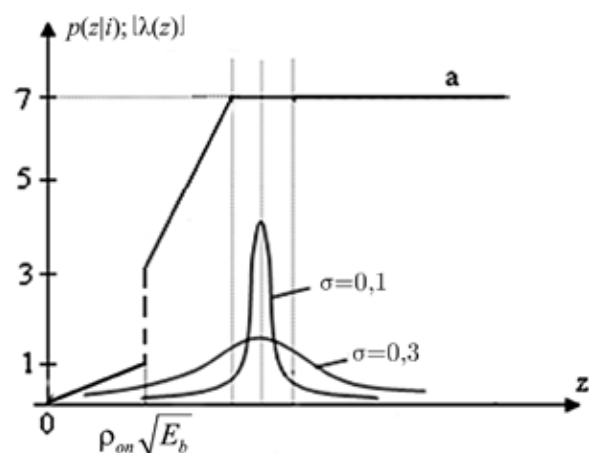


Рис. 2. Вариант модификации метода формирования МРС в условиях использования двоичных видов модуляции

z – значение принятого сигнала с учетом влияния мешающих факторов.

Применение этого метода развито в основном на двоичные виды модуляции [6]. Характеристики приемника для амплитудной (а) и фазовой (б) модуляции показаны на рисунке 1.

Принципиально значение параметра ρ допустимо принять равным единице, но в таком случае и в условиях применения двоичной фазовой модуляции теряется смысл максимальной оценки МРС, поскольку $\lambda_{\max} \equiv \sqrt{E_b}$, где $\sqrt{E_b} = M_{\min}$ – энергия сигнала, приходящаяся на один бит [2]. С целью ускорения процедуры сортировки оценок МРС допустимо иметь разрыв в линейной характеристике (1) формирования мягких решений по принципу, показанному на рисунке 2.

В таком случае все МРС вида $0 \leq \lambda_i \leq \rho_{on} \sqrt{E_b}$ на выходе демодулятора представляются в виде единой наиболее низкой оценки, например, $\lambda_i = 1$. Это ускоряет ранжирование оценок МРС в условиях применения перестановочного декодирования в процедуре выделения наиболее надежных символов принятой кодовой комбинации [5]. Аналитическая модель формирования таких МРС представлена выражением (2).

$$\lambda_i(z) = \begin{cases} \lambda_{\min} = \left\| \frac{\lambda_{on}}{\rho_{on} \sqrt{E_b}} \times z \right\|, & \text{если } z \leq \rho_{on} \sqrt{E_b}; \\ \lambda_i = \left\| \frac{\lambda_{\max}}{(\rho - \rho_{on}) \sqrt{E_b}} \times z \right\|, & \text{если } z > \rho_{on} \sqrt{E_b}, \end{cases} \quad (2)$$

где $i = \lambda_{on} + 1; \dots; \lambda_{\max}$.

Применение подобных оценок позволяет более гибко осуществлять процедуру адаптации по сравнению с системой жесткого декодирования или использования классического стирающего КС. Следует отметить, что статистические характеристики указанных систем формирования МРС с целью их использования в адаптивных СОД в полной мере не исследованы.

Действительно, в любой адаптивной системе необходим анализатор состояния параметров внешней среды, которые объективно обеспечивают решение заданных технических задач. В системах связи таким элементом является непрерывный КС с многообразием деструктивных факторов, меняющихся в соответствии с закономерностями физической природы такого канала. В любой структурной схеме СОД ближайшим элементом к непрерывному КС является демодулятор, в котором формируются жесткие решения о принятых символах и соответствующие им МРС [2, 8]. Поэтому статистическая оценка кортежей МРС объективно отражает состояние внешней среды и должна быть эффективно использована в адаптивной системе

связи. Хотя в большинстве известных адаптивных СОД в качестве критерия изменений внешней среды является поток ошибок, выявляемых декодером помехоустойчивого кода в процедуре приема и обработки данных [2]. Становится очевидным, что подобный традиционный подход обладает длительным временем анализа состояния среды, чем анализ последовательностей МРС. Указанное время зависит от длины кодовых комбинаций, времени их обработки декодером и собственно времени обработки группы комбинаций для выработки решения о смене порождающего полинома (по сути, изменение режима работы СОД).

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МРС НА БАЗЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

В гауссовском КС целочисленные МРС, выработанные по принципу (1) или (2), представляют случайный процесс с математическим ожиданием $M(h)$ и дисперсией $\sigma^2(h)$, где параметр $h = E_b / N_0$ представляет отношение сигнал-шум, а N_0 – спектральную плотность белого шума. В ходе испытаний статистических моделей (1) и (2) оценивались свойства и возможности использования указанных характеристик $M(h)$ и $\sigma^2(h)$ в роли сенсоров переключающих функций адаптивной СОД. Результаты исследования модели (1) для $M(h)$ представлены на рисунке 3, при этом анализу подвергались различные длины тестируемых последовательностей (кортежей) и объем выборки составлял не менее 10^6 двоичных символов.

Из приведенных характеристик становится ясно, что разброс параметров математического ожидания уменьшается с увеличением длин кортежей тестируемых последовательностей. Подобный результат не противоречит принципам статистических испытаний имитационных моделей, но в реальных СОД целесообразно выявлять изменения параметров непрерывного канала с использованием коротких зачетных отрезков. Сравнение значений математического ожидания показывает, что среднее значение параметра $M(h)$ практически не зависит от длины кортежа зачетной последовательности как для кортежа $N = 2^4$ символов, так и для последовательности, равной $N = 2^{10}$ символов, что подтверждается сведением всех характеристик в единую систему координат, как представлено на рисунке 4.

Таким образом, параметр $M(h)$ представляет практический интерес для реализации принципа оценки среды на физическом уровне адаптивных СОД.

В ходе испытания имитационной модели одновременно с параметром $M(h)$ анализу подвергался другой статистический параметр $\sigma^2(h)$ – дисперсия. Итоги испытаний показали большой разброс значений дисперсии, которые не представляют возможности их рационального использования в целях переключения режимов адаптации. Результаты исследований показаны на рисунке 5.

Заметно, что средние значения дисперсии для кортежей МРС имеют явную зависимость от длины зачетных

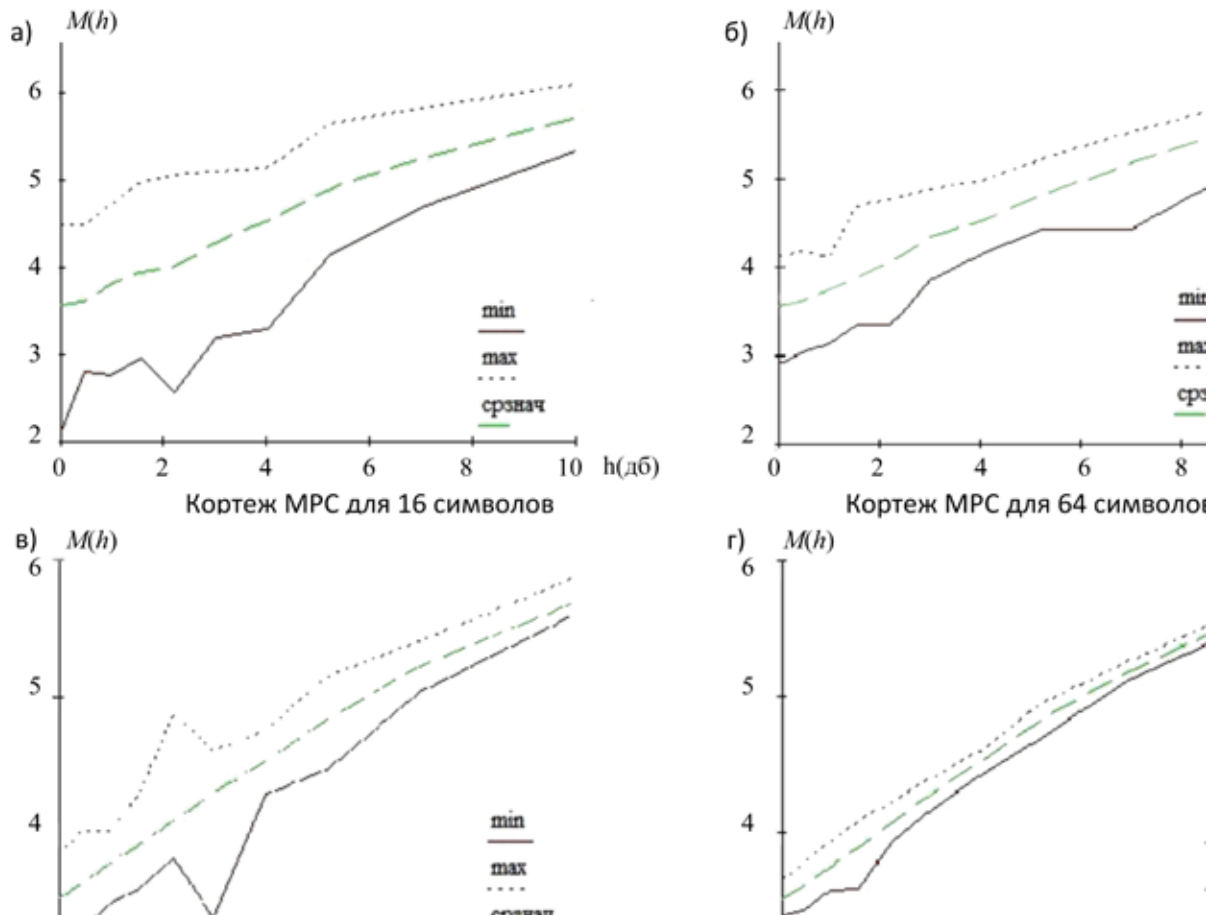


Рис. 3. Характеристики параметра $M(h)$ для различных кортежей данных

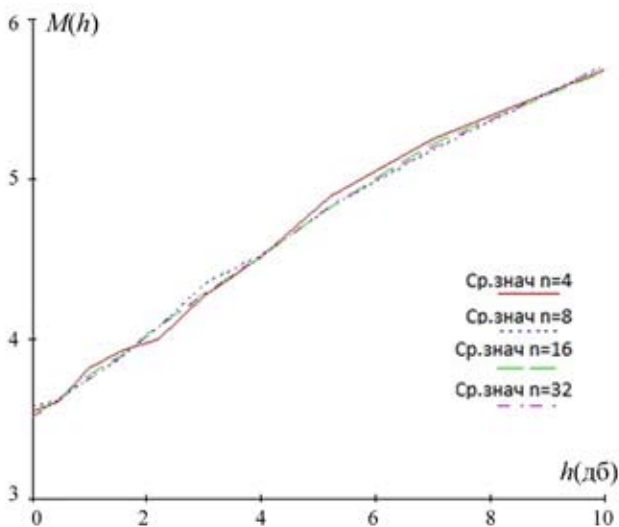


Рис. 4. Средние значения математических ожиданий различных кортежей данных

отрезков испытательных последовательностей. При этом в условиях коротких длин таких последовательностей (см. рисунок 5а) по параметру $\sigma^2(h)$ совершенно невозможно определить целесообразность применения того или иного режима работы кодеков. И только при передаче последовательности $N = 2^{10}$ разброс значений исследуе-

мого параметра принимает приемлемый для практических целей диапазон, но функция $\sigma^2(h)$, как это следует из графиков, не является монотонно убывающей. Поэтому использование ее для целей адаптации контрпродуктивно.

Следовательно, основным показателем для включения того или иного режима адаптации следует считать среднее значение параметра $M(h)$.

Результаты исследований, проведенные по модели (2) при $\rho_{on} \sqrt{E_b} = 3$, представлены на рисунке 6. Они убедительно показывают, что свойства модели (1) идентичны новым условиям, но дальнейшее увеличение указанного произведения приводит к нарушению монотонности функции $M(h)$, поэтому не может быть использовано для практических целей формирования адаптивной системы.

Анализ рисунков 3, 4 и 6 убедительно показывает, что средние значения МРС на зачетных отрезках даже небольшой длины достаточно точно характеризуют состояние непрерывного КС по параметру h – отношение сигнал-шум. Устойчивое значение этого параметра в определенных пределах может служить сигналом к адаптивному изменению параметров кодеков или переключению на резервные режимы работы СОД. Условия переключения режимов показаны на рисунке 7. При низких отношениях сигнал-шум используется первый режим работы кодеков, обеспечивающих требуемый уровень достоверности

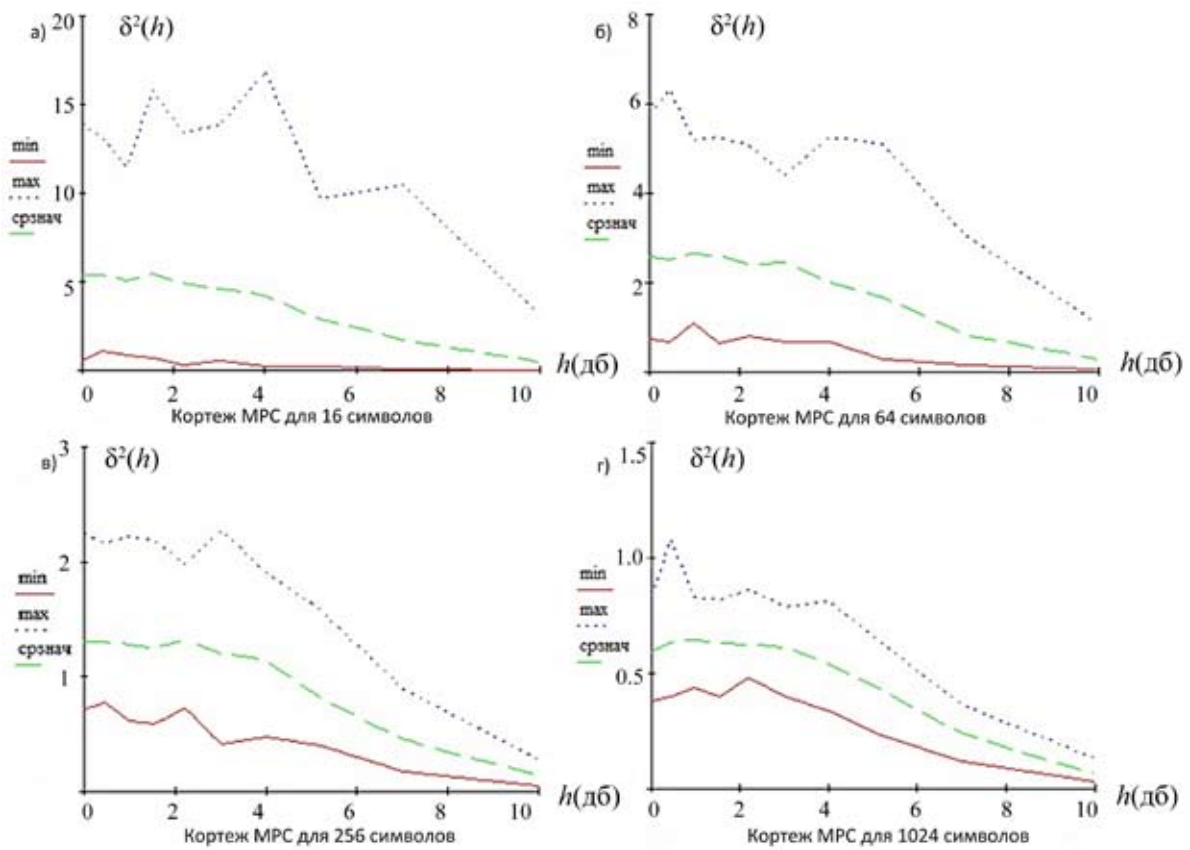


Рис. 5. Средние значения дисперсий различных кортежей данных

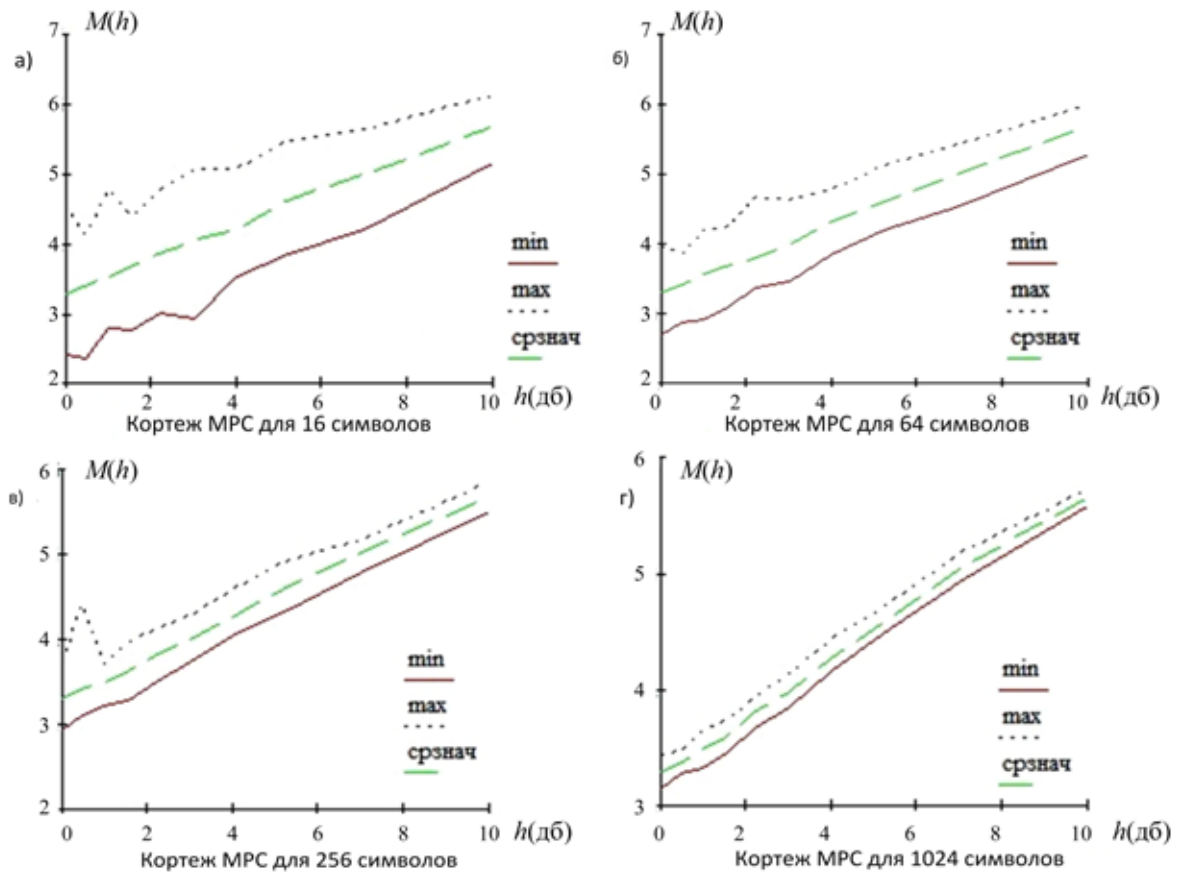


Рис. 6. Характеристики параметра $M(h)$ для различных кортежей данных при $\rho_{on} \sqrt{E_b} = 3$

при пониженной скорости кода $R = k/n$, где k – информационные разряды в кодовой комбинации, а n – общее число разрядов.

По мере повышения значений параметра $M(h)$ включаются второй или третий режимы работы кодеков, обеспечивающих более высокое значение относительной скорости кода. Применение указанных режимов допустимо в случае сохранения уровня деструктивных факторов на отрезке времени, превышающем время обмена данными, синхронизацию кодеков по порождающим полиномам и обработку преамбул. Если указанные условия не соблюдаются, кодеки целесообразно перевести в дискретно-адаптивный режим, удовлетворяющий требованиям по достоверности на всем протяжении обмена данными.

Подобный подход должен быть заложен в адаптивную систему, что позволит в той или иной степени противостоять деструктивным факторам преднамеренного характера. Подобная организация процедуры обмена данными очень важна в мультимедийных сетях с использованием радиointерфейса [2, 8]. Очевидно, что использование двоичных кодов, например, кодов Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ) в описанной системе будет непродуктивным. Это связано с тем, что при сохранении параметра n для двоичных кодов необходимо менять регистры кодирования и декодирования данных, что повышает сложность реализации процессоров кодеков. Поэтому предлагается использовать недвоичные коды РС, которые являются максимально декодируемыми и не требуют сложных преобразований при переходе от кода с одной избыточностью к коду с иной избыточностью. При смене режимов для кодеков необходимо только указать, какое число стираний разрешается исправлять выбранному коду (выбранному режиму).

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МРС НЕДВОИЧНЫХ КОДОВ

В классической системе каскадного кодирования в качестве внешнего кода обычно используется недвоичный блоковый код РС с комбинациями длины n_2 . Каждый символ таких комбинаций рассматривается над полем $GF(2^{n_1})$. Судить о степени надежности символов из n_2 возможно только на основании МРС, полученных для двоичных символов внутреннего кода или проверок четности для комбинаций n_1 . Пусть $\{\lambda_\xi\}$ – конечный алфавит множества целочисленных индексов, используемых в системе недвоичного кода, для которых $\{\lambda_\xi\} = \overline{\lambda_{\min}, \lambda_{\max}}$, и для любого кодового вектора допустимо среди зафиксированных МРС выделение $s \leq d_{\min} - 1$ ненадежных элементов с наименьшими значениями λ_ξ , где d_{\min} – метрика Хэмминга. При приеме символов на фиксированной длине кодовых комбинаций в общем случае может быть сформировано различное значение ненадежных символов с номерами позиций ξ , которые идентифицируются и восстанавливаются кодовыми методами как стирания [9, 10].

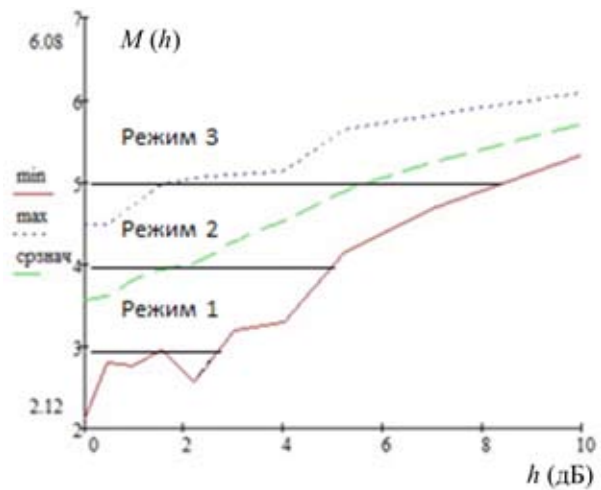


Рис. 7. Пример выбора режимов переключения адаптивной СОД

Предлагается на длине кодовой комбинации кода n_1 формировать данные о двоичных символах в виде обобщенных алгебраических и статистических характеристик, таких, как: проверка выполнения проверочных соотношений, определяемых проверочной матрицей H внутреннего кода; математическое ожидание и дисперсия МРС группы двоичных символов на длине n_1 символа. На первый взгляд комплексное применение подобных данных позволяет объективно идентифицировать ошибочные недвоичные символы и тем самым повысить эффективность процедуры декодирования внешнего кода. Процедура идентификации символа может быть выполнена за два шага по схеме:

$$Q(\lambda_\xi, n_1) = \begin{cases} \text{sign}(p); & \text{max}; \\ p \oplus pc' = 0 & pc' \\ \text{max}; & \text{min} \\ M(\lambda_\xi) & \sigma^2(\lambda_\xi) \end{cases} \quad (3)$$

При этом первая строка указывает на результаты проверки алгебраических отношений, а вторая строка оценивает статистические характеристики МРС. Аналитическое моделирование процедуры (3) показало, что по отдельности представленные параметры не являются информативными и не позволяют оценить приоритеты в очередности обработки символов кода РС. В соответствии с $Q(\bullet)$ декодер на первом шаге декодирования выполняет проверку четности (традиционный шаг в классической системе каскадного кодирования). Если этот шаг выполнен неудовлетворительно, декодер переводит оцениваемый недвоичный символ кода РС в разряд ненадежных и присваивает такому символу оценку λ_{\min} . На втором шаге обработки данных декодер оценивает среднее значение принятых МРС и в последнюю очередь определяет степень разброса зафиксированных приемником индексов МРС. Теоретически среднее значение определяется соотношением $\lambda_{\text{cp}} = (\lambda_{\min} + \lambda_{\max})/2$. Возникает противоречие, заключающееся в том, что в случае неудачной проверки

четности $\lambda_{cp} \neq \lambda_{min}$. Тогда декодер кода РС будет идентифицировать такой символ в качестве надежного, что однозначно приведет к ошибочному декодированию всей комбинации кода РС. По сути, высокое значение $|M(\lambda)|$ не будет соответствовать должной достоверности принятых символов. При этом может быть получено несколько одинаковых значений $|M(\lambda)|$ при различной совокупности оценок двоичных символов, поэтому необходимо дополнительно вычислять параметр $\sigma^2(\lambda)$. Если возникает ситуация неопределенности, когда $|M_i(\lambda)| = |M_j(\lambda)|$ при $i \neq j$, то приоритетной для последующей обработки данных является комбинация, у которой $\sigma_i^2(\lambda) < \sigma_j^2(\lambda)$. Это полностью отвечает принципу распространения доверия в ходе обработки кодовых символов кода РС [8].

Для проверки гипотезы несоответствия средних значений $|M(\lambda)|$ требуемой достоверности символов в случае ошибочного решения о проверке четности была разработана имитационная модель СОД с каскадным кодом

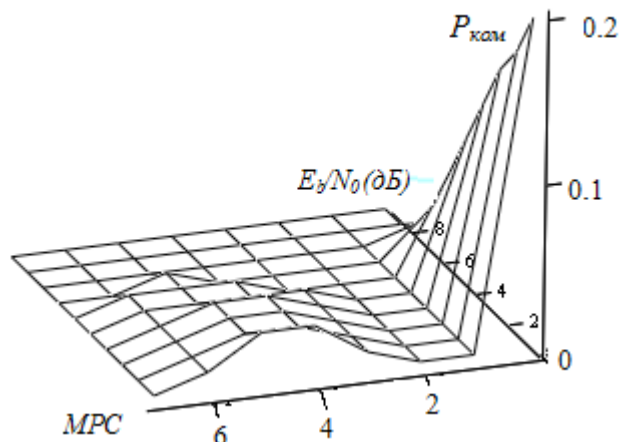


Рис. 8. Результаты статистического моделирования индексов достоверности символов недвоичного кода

на основе кода РС над полем $GF(2^2)$. В качестве алгебраической проверки в модели использовалась единственная проверка четности для символов кода РС. Испытания проводились для отношений сигнал-шум, определяемых как E_b/N_0 , для диапазона значений от 0 дБ до 10 дБ. Выборка в 10^6 недвоичных символов при испытании модели обеспечивала требуемую погрешность полученных результатов. Итоги статистических испытаний модели приведены на рисунке 8.

Они подтвердили опасение о несоответствии высоких значений $|M(\lambda)|$, близких к среднему значению при $\lambda_{min} = 0$ и $\lambda_{max} = 7$, надежным оценкам достоверности недвоичных символов. Высокие показатели вероятности ошибки на комбинацию внутреннего кода $P_{ком}$ для минимальной оценки объясняются достаточно уверенной работой системы проверки четности при наличии одной ошибки. Однако наличие двойных ошибок в комбинации

внутреннего кода не вскрываются такой системой алгебраических проверок, поэтому появляются ошибочные решения с достаточно высокими показателями параметра $|M(\lambda)|$.

Заметно, что ряд значений МРС при низких отношениях сигнал-шум хорошо коррелируют с ошибочными решениями. Это особенно проявляется при λ_4 и λ_5 . Подобные оценки без дополнительных преобразований данных следует применять с осторожностью. Решением возникшего противоречия может явиться использование в качестве внутреннего кода системы с большей исправляющей способностью или итеративных преобразований символов кодовых комбинаций внутреннего кода. Наиболее удачным решением следует считать применение коммутационной матрицы, которая позволяет установить связь полученных высоких значений параметра $|M(\lambda)|$ с новыми низкими значениями. Подобная операция легко реализуется в системе современных процессоров, разрабатываемых на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение адаптивных СОД в современных информационно-управляющих системах обусловлено высокой динамикой изменения параметров телекоммуникационной составляющей, которая особенно выражена в системах с радиоинтерфейсом. В целях своевременного переключения режимов работы СОД целесообразно в процедуру оценки параметров КС включать не только результаты декодирования комбинаций помехоустойчивых кодов, но и значения МРС, которые используются в алгоритмах мягкой обработки данных. При этом в качестве значимых следует принять оценки математического ожидания МРС, выполненные для достаточно коротких кортежей данных, что способствует оперативности настройки соответствующих режимов.

Наличие нескольких режимов работы СОД позволяет гибко использовать эти режимы в условиях быстроизменяющихся параметров системы на физическом уровне. В этом случае адаптивная СОД оперативно подбирает соответствующий фиксированный режим, исходя из принципа «расчет на наихудший случай».

На основе испытаний имитационной модели СОД с каскадным кодированием показана опасность прямого использования обобщенных оценок для символов недвоичного кода, которая приводит к ложным результатам ранжирования по возрастанию символов такого кода. Предлагается техническое решение для реализации алгоритмов исправления стираний такими кодами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варагузин В.А., Цикин И.А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи. – СПб. : БХВ-Петербург, 2013. – 352 с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : изд. 2-е, испр.; пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

3. Пчелин Н.А. Многоконтурная адаптация систем обмена данными в условиях действия деструктивных факторов // Сб. докл. конф. «RNLS-2016». – 2016. – Т. 2. – С. 508–518.

4. Чилихин Н.Ю. Оценка канала связи с неизвестными параметрами на основе формирования мягких решений в широкополосных системах связи // Сб. докл. конф. «DSPA-2014». – М., 2014. – Т. 1. – С. 241–245.

5. Гладких А.А., Чилихин Н.Ю., Наместников С.М., Ганин Д.В. Унификация алгоритмов декодирования избыточных кодов в системе интегрированных информационно-управляющих комплексов // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № 1(39). – С. 13–20.

6. Гладких А.А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 379 с.

7. Гладких А.А., Климов Р.В. Численное моделирование обобщенной процедуры формирования индексов мягких решений // Инфокоммуникационные технологии. – 2013. – Т. 12, № 2. – С. 22–28.

8. Carrasco R.A., Johnston M. Non-binary error control coding for wireless communication and data storage. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. – P. 302.

9. Гладких А.А. Обобщенный метод декодирования по списку на базе кластеризации пространства кодовых векторов // Радиотехника. – 2015. – № 6. – С. 37–41.

10. Гладких А.А. Оценка сложности аппаратных затрат в процедуре мягкого алгебраического декодирования двоичных кодов // Автоматизация процессов управления. – 2014. – № 3 (37). – С. 40–47.

REFERENCES

1. Varaguzin V.A., Tcikin I.A. *Metody povysheniia energeticheskoi i spektralnoi effektivnosti tsifrovoi radiosviasi* [Methods to Improve Power and Spectral Efficiency of Digital Radio Communication]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2013. 352 p.

2. Sklar B. *Tsifrovaia sviaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* Izd. 2-e, ispr. per. s angl. [Digital Communication. Fundamentals and Applications. Second Edition]. Moscow, Williams Publ., 2003. 1104 p.

3. Pchelin N.A. *Mnogokonturnaia adaptatsiia sistem obmena dannymi v usloviakh deistviia destruktivnykh*

faktorov [The Multiloop Accomodation of Data Exchange Systems under Destructive Factors]. *Sb. dokl. konf. 'RNLS-2016'* [Proc. of the Conf. 'RNLS-2016']. 2016, vol. 2, pp. 508–518.

4. Chilikhin N.Iu. *Otsenka kanala sviasi s neizvestnymi parametrami na osnove formirovaniia miagkikh reshenii v shirokopolosnykh sistemakh sviasi* [The Evaluation of a Channel with Unknown Parameters Based on Soft Decision Making in Broadband Communication Systems]. *Sbornik dokladov konferentsii 'DSPA-2014'* [Proc. of the Conf. 'DSPA-2014']. Moscow, 2014, vol. 1, pp. 241–245.

5. Gladkikh A.A., Chilikhin N.Iu., Namestnikov S.M., Ganin D.V. *Unifikatsiia algoritmov dekodirovaniia izbytochnykh kodov v sisteme integrirovannykh informatsionno-upravliaiushchikh kompleksov* [Unification of Redundant Code Decoding Algorithms in Integrated Information-Management Systems]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2015, no. 1 (39), pp. 13–20.

6. Gladkikh A.A. *Osnovy teorii miagkogo dekodirovaniia izbytochnykh kodov v stiraishchem kanale sviasi* [Foundations of the Theory of Soft-Decision Decoding of Redundant Codes in Erasure Communication Channels]. Ulyanovsk, ULSTU Publ., 2010. 379 p.

7. Gladkikh A.A., Klimov R.V. *Chislennoe modelirovanie obobshchenoi protsedury formirovaniia indeksov miagkikh reshenii* [Numerical Simulation of the Generalized Procedure of Formation of Indices of Soft Decisions]. *Infokommunikatsionnye tekhnologii* [Information and Communication Technologies], 2013, vol. 12, no. 2, pp. 22–28.

8. Carrasco R.A., Johnston M. *Non-binary Error Control Coding for Wireless Communication and Data Storage*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 302 p.

9. Gladkikh A.A. *Obobshchennyi metod dekodirovaniia po spisku na baze klasterizatsii prostranstva kodovykh vektorov* [Generalized Method of List Decoding on the Basis of Code Vectors Space Clustering]. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2015, no. 6, pp. 37–41.

10. Gladkikh A.A. *Otsenka slozhnosti apparaturnykh zatrat v protsedure miagkogo algebricheskogo dekodirovaniia nedvoichnykh kodov* [Estimation of Hardware Processing Costs in a Method of Soft Algebraic Decoding of Non-binary Codes]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2014, no. 3 (37), pp. 40–47.