УДК 621.391.15

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОПОРОГОВЫХ МЕТОДОВ ДЕКОДИРОВАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КОДОВ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В. В. Золотарёв, ведущий научный сотрудник ИКИ РАН, д.т.н.; zolotasd@yandex.ru
Г. В. Овечкин, профессор РГРТУ, д.т.н.; g_ovechkin@mail.ru

Рассмотрены многопороговые декодеры самоортогональных кодов. Выполнено сравнение их характеристик и характеристик других наиболее эффективных методов коррекции ошибок в гауссовском канале передачи данных при использовании модуляции типа QPSK. Показано, что с помощью многопороговых декодеров можно получить лучшие характеристики, чем с помощью реализуемых на практике декодеров турбо и низкоплотностных кодов. Рассмотрены вопросы использования многопороговых декодеров для коррекции ошибок в оптических линиях связи. Показано, что их применение не только весьма перспективно, но и позволяет получить требуемую эффективность декодирования. Обсуждаются вопросы применения многопороговых декодеров совместно с ортогональным мультиплексированием с разделением несущих и технологии передачи с помощью нескольких передающих и приемных антенн для повышения достоверности передачи данных от беспилотных летательных аппаратов, представлены обеспечиваемые с помощью многопороговых декодеров характеристики помехоустойчивости.

Ключевые слова: *помехоустойчивое кодирование, самоортогональные коды, многопороговые декодеры, достоверность передачи данных, компьютерное моделирование, спутниковые системы связи, оптические сети связи, беспилотные летательные аппараты.*

Введение. В настоящее время происходит интенсивный переход от аналоговых систем передачи информации к цифровым. Разрабатываются и внедряются новые стандарты передачи информации, в том числе беспроводные сети, цифровое широковещательное видео и др. Подобные системы используют для передачи беспроводные каналы, в которых на сигнал действуют помехи различной физической природы. Это приводит к тому, что принятые данные с большой вероятностью содержат ошибки, что для многих приложений недопустимо. Поэтому при разработке подобных систем возникает проблема обеспечения высоконадежной передачи цифровой информации по каналам с шумами.

Для ее решения обычно используются методы защиты данных от ошибок, основанные на применении теории и конкретных алгоритмов декодирования на базе помехоустойчивых кодов. Помехоустойчивые коды позволяют получить энергетический выигрыш кодирования (ЭВК), который характеризует степень возможного снижения энергетики передачи при кодировании по сравнению с его отсутствием, если требования к достоверности передачи в обоих случаях одинаковы. Конкретное выражение огромного экономического эффекта от получаемого с помощью кодирования ЭВК состоит в значительном уменьшении мощности передатчика, экономии полосы частот, увеличении дальности связи и способности работать при очень высоких шумах канала.

Кроме того, при прочих равных условиях кодирование может обеспечить значительное повышение скорости передачи данных и ее достоверности, а также множество других полезных технологических преимуществ. Поэтому тысячи исследователей в десятках передовых технологических странах мира заняты решением проблемы построения новых кодов и, главное, способов их более простого и эффективного декодирования, позволяющих приблизить уровень ЭВК к теоретическим пределам.

Сегодня одними из лучших кодов являются активно развивающиеся за рубежом турбо и низкоплотностные коды. В ряде случаев они способны обеспечить эффективность, близкую к теоретическим границам [1]. Однако декодеры таких кодовых конструкций являются относительно сложными устройствами или программами, что существенно усложняет или вообще не допускает их применение в высокоскоростных системах связи.

Альтернативой данным методам являются развиваемые в нашей стране методы декодирования, названные многопороговыми декодерами (МПД) [2, 3]. Они положили начало совершенно новому направлению в теории и технологии реализации декодеров. Из результатов как теоретических, так и экспериментальных исследований следует, что при сопоставимом ЭВК методы МПД выполняют примерно на два и более десятичных порядка меньшее число операций при декодировании каждого информационного символа, чем декодеры турбо, низкоплотностных и многих других кодов. По этим же причинам идеи МПД начали развиваться и за рубежом [4, 5].

Высокую эффективность коррекции ошибок в символьных данных показывают недвоичные многопороговые декодеры (*q*МПД), также имеющие линейную сложность реализации, свойственную их двоичным прототипам [6, 7]. Поэтому именно МПД могут рассматриваться в качестве основного метода коррекции ошибок для применения в современных и будущих высокоскоростных системах связи. Рассмотрим их более подробно.

Многопороговое декодирование помехоустойчивых кодов. Многопороговый декодер самоортогональных кодов (СОК) является развитием простейшего порогового декодера Месси и позволяет декодировать очень длинные коды со всего лишь линейной от длины кода сложностью реализации. Алгоритм работы МПД подробно описан в [2], где также показано, что основное свойство МПД — строгое приближение его решения к решению оптимального декодера при каждом изменении декодируемого символа. Однако процесс перехода от одного кодового слова к другому (более правдоподобному) может прекратиться до того, как МПД достигнет решения оптимального декодера. Основная причина этого — значительная подверженность пороговых декодеров, являющихся составной частью МПД, эффекту размножения ошибок. В [2] показано, что

для уменьшения размножения ошибок необходим тщательный выбор кодов, характеризующихся малой степенью пересечения множеств ошибок, входящих в проверки относительно разных информационных символов, а также настройка параметров декодера.

Для реализации операций кодирования и многопорогового декодирования СОК можно использовать простейшие схемы, построенные на основе регистров сдвига. Пример схем кодера и многопорогового декодера блокового и сверточного СОК с их описанием представлен в [2]. Отметим, что эти схемы легко реализуются как в программном, так и аппаратном виде. В частности, к настоящему времени на серийных ПЛИС уже создано несколько макетов многопороговых декодеров. Один из них, разработанный ФГУП «НИИР» [8] на базе ПЛИС Xilinx типа Spartan-II, позволил выполнить декодирование сверточного кода с кодовой скоростью 1/2 при скорости декодирования до 480 Мбит/с. Другой макет МПД, доказывающий возможность его сверхскоростной реализации на скорости более 1 Гбит/с для космической связи, был выполнен на ПЛИС Altera Stratix EP1S20 в ИКИ РАН [9].

Эффективность многопороговых декодеров. Рассмотрим эффективность МПД и некоторых других методов коррекции ошибок при использовании кодов с кодовой скоростью $R = 1/2$ в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) при модуляции типа QPSK. Такой канал достаточно хорошо соответствует многим высокоскоростным высокочастотным каналам спутниковой и космической связи, что придает особенную ценность результатам, полученным в этой, хорошо изученной теоретически, области. Отметим, что при таких параметрах канала и кода теоретически можно работать при отношении сигнал/шум, равном 0,2 дБ.

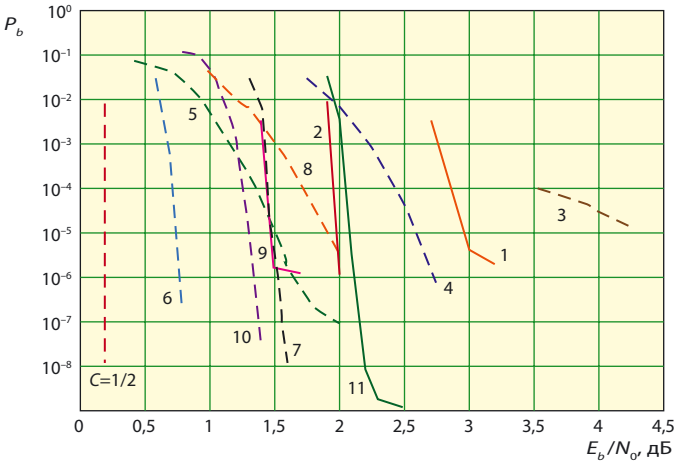

Рис. 1. **Эффективность методов коррекции ошибок в канале с АБГШ**

Ни рис. 1 кривыми *1* и *2* представлены зависимости вероятности ошибки декодирования на бит от отношения сигнал/шум для МПД, уже реализованных на ПЛИС Xilinx [8] и Altera [9] соответственно. Отметим, что эффективность данных версий МПД существенно лучше эффективности декодера Витерби для широко используемого вместе с ним сверточного кода с конструктивной длиной $K = 7$ (кривая *3*), а МПД на ПЛИС Atera более чем на 0,5 дБ превосходит классическую каскадную схему коррекции ошибок, основанную на применении совместно со сверточным кодом кода Рида-Соломона (кривая *4*).

В последнее время зарубежными специалистами активно развиваются турбо [10] и низкоплотностные коды [11], эффективность которых очень высока. Например, методы декодирования турбокодов длиной около 3000 бит, рекомендованных стандартом CDMA2000, обеспечивают характеристики, представленные кривой *5*. С помощью низкоплотностных кодов стандарта DVB-S2 длиной 64800 бит теоретически можно обеспечить очень малую вероятность ошибки декодирования при работе всего в 0,5 дБ от пропускной способности гауссовского канала (кривая *6*).

Отметим, что при практической реализации декодера LDPC кода приходится уменьшать его сложность, что приводит к незначительному ухудшению эффективности. В частности, на рис. 1 (кривая *7*) показаны характеристики декодера DVB-S2 LDPC кода длиной 64800 битов, реализованного в ФГУП НИИР в 2009 г. Эффективность декодеров низкоплотностных кодов меньшей длины (LDPC код стандарта IEEE802.16e длиной 2304 бит) показывает кривая *8*. Из представленных кривых видно, что практически реализуемые декодеры турбо и низкоплотностных кодов оказываются лучше ранее рассмотренного МПД (кривая *2*) не более, чем на 0,5 дБ при в десятки раз большей вычислительной сложности. Это делает МПД очень привлекательными для применения в существующих и вновь создаваемых высокоскоростных цифровых системах передачи данных.

При этом заметим, что в настояшее время эффективность МПД удалось несколько улучшить. В частности, характеристики одного из последних разработанных МПД для сверточного кода с длиной кодового ограничения порядка 65 000 битов представлены на рис. 1 кривой *9*. Дополнительное улучшение эффективности данного кода возможно при использовании совместно с ним во внешнем каскаде простейшего кода с контролем четности (подобная схема описана в [2]), что позволит уменьшить вероятность ошибки декодирования примерно на три порядка, так как ошибки после МПД оказываются в основном одиночными. Еще лучшую эффективность СОК позволяют получить при незначительно более сложном алгоритме их декодирования. В частности, кривая *10* соответствует случаю использования min-sum алгоритма для декодирования самоортогонального блокового кода длиной 32 000 битов [12].

В результате оказывается, что СОК при их декодировании с помошью МПД даже несколько превосходят по эффективности реализуемые на практике декодеры турбо и низкоплотностных кодов. Дополнительно отметим, что кривой *11* показаны лучшие результаты, полученные японскими специалистами с помощью их версий МПД для каскадных кодов, основанных на СОК и кодах с контролем четности [4]. Эти результаты уступают нашим более 0,5 дБ.

Применение многопороговых декодеров в оптических системах связи. Важную роль в организации цифрового обмена выполняют оптические линии связи (ОЛС). Главное требование к схемам кодирования и последующего декодирования в подобных системах наряду с очень высокой достоверностью (необходимо обеспечить вероятность ошибки декодирования порядка 10^{-15}—10^{-17}) состоит в обеспечении предельно быстрой обработки данных, т.е. декодирования на приемном конце линии ОЛС, поскольку скорости передачи таких линий обычно существенно выше, чем у электронных систем.

Рекомендации ITU по применению кодирования [13] свидетельствуют о необходимости выбора только самых быстродействующих декодеров для каналов связи такого

типа. Очевидно, что самыми быстрыми будут декодеры, состоящие только из самых быстрых элементов микроэлектроники — больших блоков памяти или длинных регистров сдвига. Более того, в них не должно быть длинных цепей обратных связей, сильно снижающих скорость продвижения данных по таким регистрам. К ним относятся всякие цепи деления полиномов и узлы, выполняющие другие сложные вычисления. Наиболее подходящими к применению в ОЛС по перечисленным критериям являются МПД [5].

Известные технические решения теоретически превращают МПД в самое быстродействующее устройство обработки, так как при этом регистры сдвига декодера перемещают данные с максимально возможной для них скоростью, поскольку оценки порогового элемента декодера всегда появляются прямо в момент сдвига данных по регистру. В результате данные в таком декодере всегда пролетают по декодеру с максимально возможной скоростью для выбранной элементной базы. Кроме того, так как МПД алгоритмы особенно эффективны при кратных скоростях, то применяя, например, коды не с $R = 4/5$, а с $R = 12/15$ (при использовании 12 информационных и трех проверочных регистров), или даже коды с $R = 24/30$, можно существенно повысить быстродействие МПД-декодера.

Рассмотрим возможности МПД при их применении в ОЛС. На рис. 2 представлены характеристики различных МПД сверточных кодов для кодовой скорости $R = 4/5$ в гауссовском канале. Кривая *1* показывает возможности довольно сложного варианта использования МПД декодера японскими специалистами [5]. В схемах присутствуют цепи обратной пересылки данных, заметно снижающие быстродействие схемы, которая без таких цепей была бы более высокоскоростной. Кривая *2* приведена для нашего МПД-декодера, использующего код, нижняя оценка оптимального декодирования которого соответствует кривой *3*.

При программном моделировании МПД даже для такого быстрого алгоритма проведение требуемого объема эксперимента для оценки вероятности ошибки декодирования порядка P_b (е) $= 10^{-17}$ невозможно. На кривой *2* указана точка K_0, соответствующая моделированию работы МПД и полному отсутствию ошибок на его выходе. Поэтому вероятность ошибки декодирования в данной точке оценена как $1/N$, где N — объем эксперимента, т.е. число декодированных битов данных в гауссовском канале. К этому можно добавить, что аналогичные эксперименты были проведены с другими кодами с несколько меньшими значениями минимального кодового расстояния d. Они показали, что во всех этих случаях по мере роста отношения сигнал/шум E_b/N_0 вероятности ошибки P_b (e) для МПД с такими кодами действительно быстро падали и характеристики МПД достигали уровня оптимального декодера при $E_b/N_0 = 3{,}7$ дБ или меньше.

Результаты этих экспериментов позволяют считать, что и данный код при использовании МПД позволит достичь уровня оптимального декодера, определяемого нижней границей (кривая *3* на рис. 2), при таком же уровне шума 3,7 дБ. Если этого не произойдет, то достижение уровня оптимального декодирования, по меньшей мере при $E_b/N_0 = 3{,}8$ дБ, можно считать гарантированным.

Последняя кривая *4* на рис. 2 соответствует варианту применения МПД в случае, когда не требуется достижения некаскадными методами кодирования очень малых вероятностей ошибки на выходе устройства декодирования. Отметим, что кривые *2* и *4* соответствуют работе МПД при

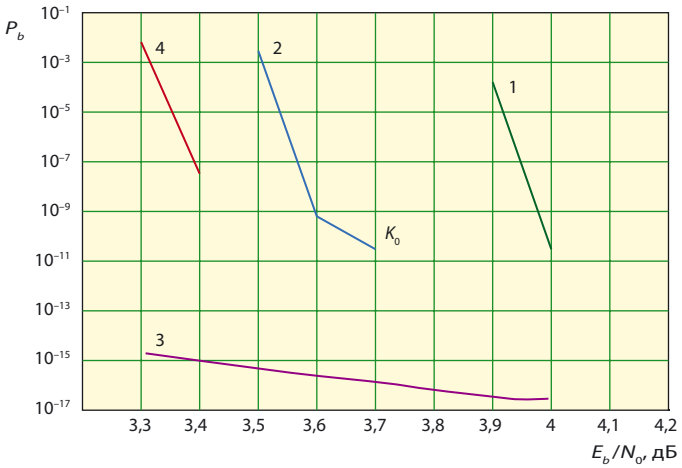

Рис. 2. **Эффективность МПД для кодов с кодовой скоростью $R = 4/5$**

существенно большем уровне шума, чем у декодера, характеристики которого отражены кривой *1*.

Понятно, что способность работать при большом уровне шума позволяет применять все представленные алгоритмы с различными модификациями МПД и в каскадных схемах разного типа [2]. Все результаты для МПД, показанные на рис. 2, в случае применения простейших схем каскадирования, будут, конечно, улучшены. Но при каскадировании всех типов всегда надо принимать дополнительные меры для того, чтобы не очень сильно снижать скорости обработки, так как при этом нарушается принцип мгновенного исправления ошибок в МПД при их движении по регистрам сдвига декодера.

Таким образом, применение МПД в ОЛС весьма перспективно и позволяет получить высокую эффективность декодирования, рекомендуемую в документах ITU [13].

Применение многопороговых декодеров для связи с беспилотными летательными аппаратами (БЛА). Широкое применение БЛА, а также наземных роботов в целях сбора, обработки и передачи потребителю большого объема информации предъявляет новые повышенные требования к системе передачи информации: высокая скорость передачи, высокие динамические характеристики траекторий движения БЛА, сильно развитая многолучевость и затухание при распространении сигнала, а также требование передачи информации и данных в реальном времени. В этих условиях решение задачи известными методами, предназначенными для решения каждой из указанных проблем в отдельности, не дает необходимого эффекта.

В условиях многолучевости наиболее эффективным методом является пространственное разнесение на прием и передачу (MIMO), позволяющее повысить пропускную способность канала связи, а также мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM). Но даже при использовании подобных технологий для обеспечения требуемой достоверности передачи данных необходимо применение эффективных методов помехоустойчивого кодирования. Причем алгоритмы кодирования и декодирования должны быть предельно простыми для обеспечения требуемой высокой скорости обработки, составляющей сотни Мбит/с. Данным требованиям в полной мере удовлетворяют обсуждаемые многопороговые декодеры самоортогональных кодов.

В рамках НИР, выполненной при поддержке Российского научного фонда (проект № 14—19—01263), были по-

лучены результаты исследования эффективности применения МПД совместно с технологиями MIMO и OFDM. Представленные ниже результаты моделирования получены с помощью модели канала Spatial Channel Model типа Urban micro [14]. Для борьбы с многолучевостью применялось OFDM мультиплексирование с 1024 несущими с основными параметрами из стандарта IEEE802.16e. Защитный интервал составлял 1/16 длины OFDM-символа. В качестве помехоустойчивых кодов применялись самоортогональный код с кодовой скоростью 1/2 и длиной 32 768 битов, декодируемый с помощью МПД, и низкоплотностный код стандарта DVB-S2 с кодовой скоростью 0,44 и длиной 16 200 битов. По умолчанию использовалась модуляция типа QPSK.

На рис. 3 кривыми *1* и *2* представлена зависимость вероятности ошибки декодирования самоортогонального кода и низкоплотностного кода от отношения сигнал/шум на бит. При этом применялся демодулятор, формирующий только жесткие решения относительно декодированных битов. Отметим, что данные коды позволяют обеспечить примерно одинаковую достоверность передачи данных. При переходе к двум передающим и двум приемным антеннам энергетическая эффективность системы несколько уменьшается (кривая *3* для СОК и *4* для LDPC), но битовая скорость передачи увеличивается в два раза без расширения используемой полосы частот. Заметим, что для СОК такое же увеличение скорости обеспечивается при переходе к модуляции QAM16 вместо QPSK, но эффективность системы (кривая *5*) оказывается почти на 2 дБ хуже MIMO варианта.

Отметим, что эффект от применения технологии MIMO для самоортогональных кодов больше, чем для низкоплотностных кодов. В том случае, когда битовая скорость передачи данных не увеличивается (используется одна передающая антенна и модуляция типа QPSK), за счет применения нескольких приемных антенн можно существенно улучшить достоверность передачи данных. Пример характеристик подобных систем для двух и трех приемных антенн при использовании СОК показан на рис. 3 кривыми *6* и *7* соответственно. Выигрыш по сравнению с одной приемной антенной при целевой вероятности ошибки декодирования на бит 10^{-5} составил 4 и 7 дБ соответственно. Такое же улучшение получается и с помощью низкоплотностных кодов с одной передающей и двумя приемными антеннами (кривая *8*). При использовании вместо QPSK модуляции типа QAM16 и одной передающей и двух приемных антенн СОК можно обеспечить характеристики, представленные кривой *9*.

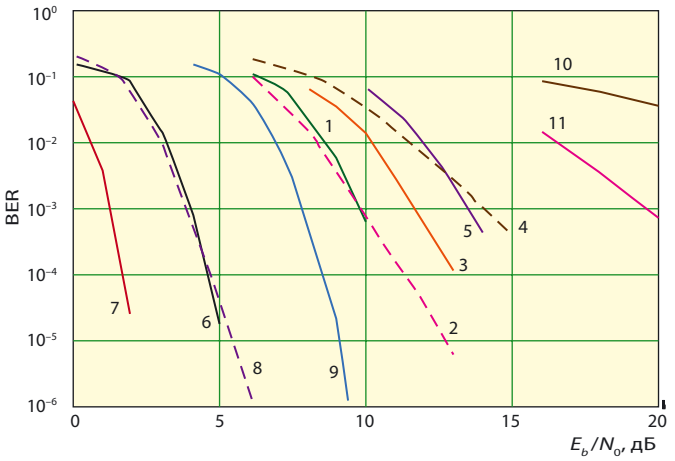

Рис. 3. **Результаты моделирования при использовании технологии MIMO**

Отметим, что проигрыш в энергетике по сравнению с QPSK составил около 4 дБ при двухкратном уменьшении занимаемой полосы частот. Из рис. 3 так же следует, что при попытках дальнейшего увеличения скорости передачи данных за счет MIMO характеристики МПД сильно ухудшаются (кривые *10* и *11*). Поэтому подобные варианты увеличения скорости передачи применять на практике нецелесообразно. Нужно использовать дополнительные способы улучшения характеристик, например предварительное кодирование (precoding) для оптимизации размещения передаваемых символов по передающим антеннам, учитывающее информацию о состоянии канала связи.

Отметим, что это только начальные результаты исследования эффективности МПД в таких условиях. Необходимо решить еще ряд вопросов, связанных с наилучшей организацией совместного использования МПД и OFDM-модуляции, а также технологии MIMO. В частности, следует определить оптимальное распределение символов кодового блока МПД по несущим, по передающим антеннам, рассмотреть эффективность использования МПД при применении пространственно-временного кодирования, оценить, насколько сильно влияет на эффективность МПД качество мягких решений демодулятора, канала передачи данных и других оцениваемых параметров и т.п. Все это позволит еще больше повысить эффективность исправления ошибок в канале.

Заключение. Из представленных результатов следует, что с помощью МПД можно достичь уровня помехоустойчивости и скорости обработки данных, позволяющих полностью решить проблемы обеспечения высокой надежности передачи больших объемов цифровых данных по высокоскоростным каналам без какой-либо доработки этих алгоритмов или всего лишь при незначительной их адаптации к возможным дополнительным требованиям, возникающим в крупномасштабных цифровых системах связи. Их использование будет одинаково просто и эффективно как при аппаратной, так и программной реализации. Применение разработанных методов позволит улучшить многие важные характеристики высокоскоростных систем передачи данных, в том числе увеличить дальность связи, уменьшить мощность передатчика, экономить полосу частот, уменьшить размеры антенн, повысить скорость и достоверность передачи данных и др.

Работа выполнена в ИКИ РАН и РГРТУ при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-07-00859), гранта Президента РФ (грант МД-639.2014.9) и Российского научного фонда (проект № 14-19-01263). Большой объем дополнительной информации о МПД можно найти на веб-сайтах [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В.** Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных // Электросвязь.— 2008.— № 12.— С. 58—61.
2. **Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В., Овечкин Г.В.** Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых алгоритмов // Цифровая обработка сигналов.— 2008.— № 1.— С. 2—11.
3. Веб-сайты www.mtdbest.ru и www.mtdbest.iki.rssi.ru.
4. **Ullah M.A., Ogiwara H.** Performance improvement of multi-stage threshold decoding with difference register // IEICE Trans. Fundamentals.— Jun. 2011.— Vol. E94–A, № 6.— P.1449—1457.
5. **Ullah M.A., Omura R., Sato T., Ogivara H.** Multi-Stage Threshold Decoding for High Rate Convolutional Codes for Optical Communications / AICT 2011: 7-th Advanced international Conference on Telecommunications.— 2011.— P. 87—93.

6. **Золотарев В.В., Кузнецов Н.А., Овечкин Г.В., Овечкин П.В**. Недвоичные многопороговые декодеры и другие методы коррекции ошибок в символьной информации // Радиотехника.— 2010.—№ 6, Вып.141.— С. 4—9.
7. **Золотарёв В.В., Овечкин Г.В**. Эффективное многопороговое декодирование недвоичных кодов // Радиотехника и электроника.— 2010.— Т. 55, № 3.— С. 324—329.
8. **Жуков С.Е., Золотарев В.В., Зубарев Ю.Б. и др.** Многопороговые декодеры для высокоскоростных спутниковых каналов связи: новые перспективы // Электросвязь.—2005.— № 2.— С. 10—12.
9. **Золотарёв В.В., Назиров Р.Р., Никифоров А.В., Чулков И.В**. Новые возможности многопорогового декодирования по высокодостоверной передаче данных ДЗЗ / Сб. научных статей. Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса.— М.: ООО «Азбука-2000».— 2009.— Вып. 6, Том I.— С.167—173.
10. **Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P.** Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo Codes // Proc. of the Intern. Conf. on Commun (Geneva, Switzerland).— May 1993.— P. 1064—1070.
11. **MacKay D., Neal R.** Near Shannon limit performance of low density parity check codes // IEEE Electronics Letters. Aug.—1996.— Vol. 32, № . 18.— P. 1645—1646.
12. **Овечкин Г.В**. Применение min-sum алгоритма для декодирования блоковых самоортогональных кодов // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр.— М.: Горячая линия — Телеком, 2010.— С. 99—105.
13. ITU-T G. 975.1. Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine system. Telecommunication Standardization Section, International Telecom Union. Feb. 2004.
14. 3GPP TR 25.996. Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations.

Получено 06.11.14

УДК 621.39:621.391.82

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-МОДУЛИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ

А.В. Черноусов, инженер ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева»; avchernousov@iss-reshetnev.ru
А.В. Кузовников, начальник управления ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева», к.т.н.; ujub@list.ru
В.Г. Сомов, проф. каф. «Электронная техника и телекоммуникации» Сиб. гос. аэрокосмического университета, д.т.н.; ujub@list.ru

Рассмотрена схема организации адаптивной системы связи, основанная на использовании в качестве формирующих сигналов негармонических несущих в виде вейвлет-функций. Проведен анализ воздействия различных видов помех на вейвлет-модулированные широкополосные сигналы в канале связи. Предложен алгоритм приема и обработки сигнала в адаптивной широкополосной системе связи на основе корреляционного приемника. Описан критерий оценки достоверности принятой информации. Приведен алгоритм выбора оптимального значения параметров формирующей функции. Проведена оценка эффективности адаптивной системы связи.

Ключевые слова: *Адаптивные системы связи, вейвлет-модулированный широкополосный сигнал, воздействие помех, белый шум.*

Введение. Согласно прогнозу компании Euroconsult [1], число абонентов мобильной связи в мире вырастет с 4923 млн в 2012 г. до примерно 6381 млн в 2018 г. В региональном аспекте ожидаемый рост обеспечат, прежде всего, абоненты Юго-Восточной Азии, Китая и Латинской Америки. Вместе с ростом числа абонентов вырастут и требования к качеству предоставления услуг связи. Но, так как диапазоны используемых частот являются ограниченным ресурсом, то из-за активного роста количества систем связи возникают проблемы обеспечения надежной передачи информации в условиях воздействия как организованных, так и случайных помех.

Для решения этой проблемы активное развитие получили широкополосные системы связи, которые в качестве носителя информации используют сверхширокополосные сигналы, обладающие повышенной помехозащищенностью и защищенностью от несанкционированного доступа.

Организация адаптивной системы связи. Под адаптивной системой связи понимают совокупность приемных и передающих устройств, которые в зависимости от внешней помеховой обстановки изменяют параметры составных частей системы таким образом, чтобы обеспечить надежную связь.

Принцип работы адаптивной системы схематично представлен на рис.1. Отправитель передает информационное сообщение по каналу связи, в котором переданный сигнал претерпевает изменения из-за воздействия случайных или преднамеренных помех, а затем поступает на вход приемника. После обработки в приемнике информационное сообщение доставляется получателю.

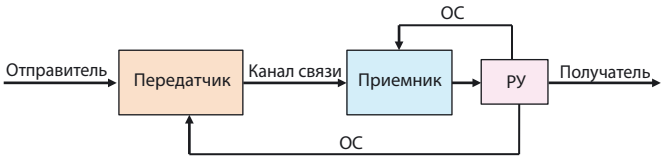

Рис. 1. **Общая структурная схема адаптивной системы связи**

Отличительной особенностью адаптивной системы связи является наличие обратной связи (ОС). ОС необходима для изменения параметров передающего и приемного оборудования с целью адаптации к помехам. Данные, полученные в результате обработки принятого сигнала в приемнике, поступают в решающее устройство (РУ), в котором принимается решение о целесообразности внесения изменений