

Оптимальное декодирование в цифровых спутниковых каналах при дистанционном зондировании Земли

Р.Р. Назиров, В.В. Золотарёв, И.В. Чулков

*Институт космических исследований РАН
117997 Москва, Профсоюзная, 84/32*

Изложены результаты новых разработок многопороговых декодеров в ИКИ РАН для высокоскоростных каналов передачи цифровых данных в системах ДЗЗ. Подчеркивается необходимость применения методов помехоустойчивого кодирования. Обсуждается производительность программных версий таких декодеров.

Введение

Применение многопороговых алгоритмов декодирования в высокоскоростных гауссовских космических и спутниковых каналах с большим уровнем шума неоднократно рассматривалось на трёх последних конференциях в ИКИ РАН по ДЗЗ.

В настоящем докладе рассмотрены новые существенно улучшенные алгоритмы коррекции ошибок класса многопорогового декодирования (МПД) в каналах с предельно высоким уровнем шума, аппаратно реализованные в ИКИ РАН. При этом данные алгоритмы остаются чрезвычайно простыми, по-прежнему обладая характеристиками, мало отличающимися от оптимальных, достижение которых обычно связывается с экспоненциально растущей от длины кода сложностью реализации декодера.

Важнейшей особенностью цифровых каналов передачи данных в системах ДЗЗ является высокая скорость передачи потоков, составляющая многие сотни мегабитов в секунду. Именно поэтому при необходимости обеспечения высокой энергетической эффективности для систем ДЗЗ довольно трудно подобрать алгоритм декодирования, который бы обеспечивал высокую помехоустойчивость в столь высокоскоростных каналах. Но именно разрабатываемые в ИКИ многопороговые декодеры [1-3] характеризуются предельно высоким быстродействием при вполне высокой энергетической эффективности. Это ставит алгоритмы МПД в особо выгодное положение при сравнении методов, претендующих на применение в системах ДЗЗ. Кроме того, быстро увеличивающиеся объёмы передачи этой важнейшей информации для служб метеорологического прогнозирования и других наук о Земле предъявляют всё возрастающие требования к качеству передаваемой информации и её достоверности. А поскольку с ростом требований по достоверности передаваемых данных необходимо применять всё более длинные коды, важность работ по МПД, которые особенно легко адаптируются к кодам всё большей длины, становится ещё более очевидной.

Особенно важно обеспечить высокие уровни достоверности в тех случаях, когда перед передачей с орбиты информация в силу её огромного объёма существенно сжимается. В этом случае при последующей обработке цифровых данных искажения в принятом цифровом потоке становятся очень опасными, потому что они влияют на правильность выполнения операций восстановления сжатого потока информации для весьма больших массивов информации, в которых оказывается эта ошибка. Этот эффект опасного искажения больших объёмов сжатых данных можно назвать «хрупкостью». Но применение сжатия уже вполне осознано как неизбежность. В связи с этим специалисты по радиосистемам, входящим в комплексы ДЗЗ, прилагают всё большие усилия для обеспечения высокого уровня достоверности передачи цифровых данных. Главную роль здесь уже давно играют методы помехоустойчивого кодирования.

Ниже будут рассмотрены те методы помехоустойчивого кодирования, которые могут достичь характеристик, мало отличающиеся от предельно возможных. В ближайшие годы эти новые методы могут в значительной степени снять остроту проблемы эффективного кодирования в высокоскоростных каналах с большим уровнем шума. Особое внимание мы уделим особенностям применения помехоустойчивого кодирования в задачах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Такая постановка проблемы является хорошим тестом для проверки применимости технических решений, предлагаемых теорией кодирования, в реальных современных системах связи.

Характеристики МПД декодеров в двоичных каналах

Рассмотрим двухканальную схему передачи цифровых данных по космическим или иным каналам связи с достаточно большим уровнем гауссовского шума. Выберем для некоторого отношения сигнал/шум, первоначально одинакового для каждого из двух рассматриваемых каналов связи, такое распределение общей суммарной энергии, чтобы обеспечить максимально возможное независимое последующее декодирование принятых информационных символов на основе многопорогового декодирования двоичных блоковых или свёрточных кодов [1-3, 5]. Иначе говоря, критерием наилучшего перераспределения энергии между каналами следует выбрать минимальный уровень проявления эффекта размножения ошибок (РО) при мажоритарном декодировании. В теории алгоритмов МПД эти вопросы достаточно полно проработаны [1]. Снижение эффекта размножения ошибок позволяет значительно улучшить сходимость решений МПД к оптимальным, что, в свою очередь, создаёт условия для более эффективной работы алгоритмов МПД при больших уровнях шума.

Характеристики МПД, АВ и турбо кодов в гауссовских каналах при $R=1/2$

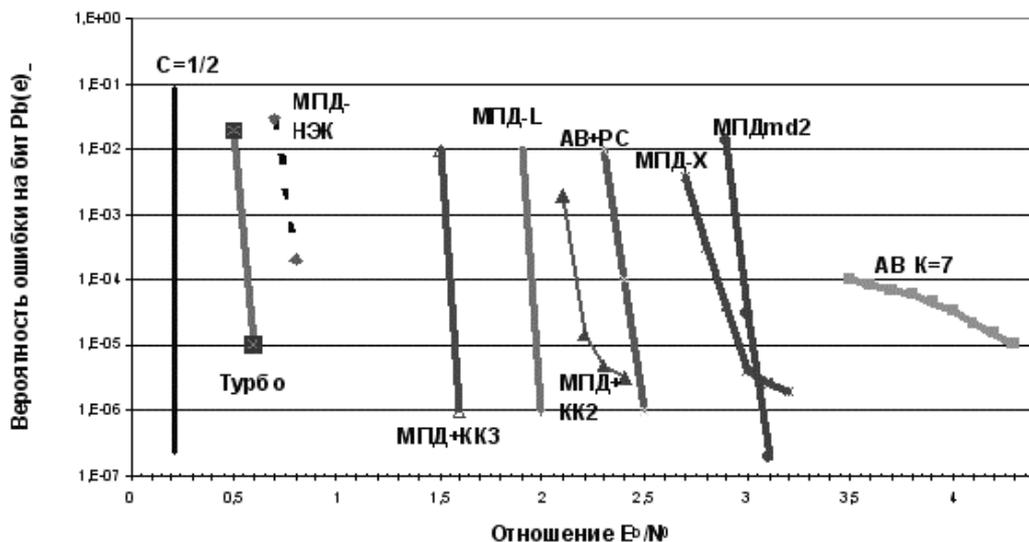


Рис. 1.

При формировании такой достаточно простой сигнально-кодовой конструкции рассматриваются различные способы балансировки энергетики. Например, каналы могут быть организованы таким образом, что по одному из них передаются информационные символы кода, а по другому – проверочные. В этом случае анализ РО упрощается, что позволяет достаточно быстро и полно рассматривать применимость максимального числа кодов и соответствующих им МПД алгоритмов в подобных схемах кодирования. Такие модели каналов получили название

каналов с неравномерной энергетикой (НЭК) [1, 5]. Они могут быть просто реализованы в обычных трактах передачи цифровых данных.

Как показал детальный анализ ряда кодов и некоторых модификаций МПД алгоритмов для каналов с различными параметрами и неравномерной энергетикой, перемещение границы области эффективной работы МПД в сторону более высокого уровня шума канала в диапазоне кодовых скоростей $R=1/4 \div 3/4$ может составлять до 1 дБ, что очень важно, поскольку исходная эффективность МПД в каналах обычного типа оказывается уже весьма высокой [1-4, 6]. При этом отношение энергетик каналов должно находиться в пределах $1,3 \div 3,2$.

Необходимость работы аппаратуры связи при более высоких уровнях шума требует увеличения числа итераций декодирования в МПД, но, как показывает практика и моделирование алгоритмов, такое увеличение обычно оказывается не более чем двукратное, что приводит к небольшой итоговой сложности реализации МПД как в программном, так и в аппаратном вариантах.

Новые полученные результаты в этой области иллюстрируются графиками на рис. 1, где представлены возможности предложенных алгоритмов и уже известных методов. График МПД-Х соответствует эффективности МПД декодера на ПЛИС Xilinx, кривые МПДmd2, МПД+КК2 и МПД+КК3 даны для применения МПД в простейших каскадных схемах. Все эти алгоритмы детально обсуждались в [3, 8]. На рис. 1 также представлены кривые эффективности для алгоритма Витерби (АВ) со стандартным кодом длины $K=7$ и для каскадной схемы АВ с кодом Рида-Соломона (РС), а также для турбо кода [9]. Вертикаль $C=1/2$ определяет пропускную способность гауссовского канала, равную $C=0,5$, к которой стремятся разработчики при улучшении характеристик декодирования при $R=1/2$. МПД-L – длинный код и МПД декодер с $I=40$ итерациями. Новый результат для МПД и канала НЭК – пунктир МПД-НЭК - соответствует возможности очень простого и значительного повышения эффективности декодирования кода при задержке принятия решения не более 400'000 битов, при котором сохраняется хорошо известная достаточно большая скорость МПД декодирования как в программном, так и особенно в аппаратном варианте. Указанное существенное улучшение эффективности многопороговых алгоритмов примерно на 1 дБ по сравнению с другими МПД декодерами, представленными на рис.1, достигнуто за прошедший период с момента проведения последней конференции ДЗЗ.

С учётом уже достигнутой близости области эффективной работы МПД к пропускной способности канала связи, можно считать, что МПД имеет хорошие перспективы по дальнейшему приближению его характеристик к границе Шеннона. При этом значительное преимущество МПД перед другими алгоритмами по числу операций, составляющее один – два десятичных порядка для различных сочетаний параметров кодирования [1, 4, 6-8], даёт основание полагать, что МПД можно активно использовать при разработках современной аппаратуры передачи цифровых данных для космических и спутниковых каналов связи.

Характеристики недвоичных кодов

Известно, что к особенно эффективным системам кодирования относятся каскадные схемы. При их использовании оказывается, что при правильном проектировании системы передачи цифровых данных происходит повышение эффективности кодирования и одновременно некоторое снижение итоговой сложности декодирования, хотя в этом случае нужно использовать два декодера вместо одного. При этом весьма высокие характеристики достигаются при использовании во внешних каскадах кодирования достаточно эффективных недвоичных кодов. Однако в течение примерно 40 лет развития теории кодирования в технике кодирования фактически используются только коды Рида-Соломона (РС). Но до сих пор реализация декодеров для кодов РС длины более 256 символов считается весьма трудной проблемой. Поэтому их возможности так и остались весьма и ограниченными.

За этот же длинный сорокалетний срок развития мажоритарных алгоритмов коррекции ошибок в двоичных каналах в теории кодирования не было сколько-нибудь успешных попыток обобщения этих алгоритмов на недвоичные символьные коды и соответствующие им пороговые декодеры. В ИКИ РАН закончен долгосрочный проект по созданию новых методов декодирования на основе многопороговых декодеров (МПД), которые можно применять и в каскадных схемах, и в системах поддержки целостности и достоверности сверхбольших баз данных [1, 4, 6]. Эти алгоритмы весьма просты в реализации. Они обеспечивают стремление решений недвоичных МПД к решениям оптимального декодера (ОД), как это имеет место и в случае двоичных кодов и их декодеров. Все достигнутые результаты в области недвоичных мажоритарных алгоритмов являются уникальными и не имеют аналогов в мировой литературе по корректирующим кодам.

Теоретические результаты, оценки характеристик и большой объём моделирования недвоичных МПД алгоритмов в каналах с большим уровнем шума показывают, что возможности этих алгоритмов существенно, на много десятичных порядков превосходят значения достижимых уровней достоверности на основе кодов Рида-Соломона (РС) любой длины. В условиях, когда для кодов с большим основанием построение алгоритма Витерби с хорошими характеристиками оказывается невозможным, а характеристики кодов РС весьма невысоки, возможности недвоичных МПД оказываются практически неограниченными. При этом сложность декодирования символьных данных оказывается весьма небольшой. Это особенно наглядно следует из того, что объём статистики декодирования порядка $1E9$ (миллиарда) может быть получен примерно за час работы ПК общего назначения на обычных неоптимизированных программных средствах.

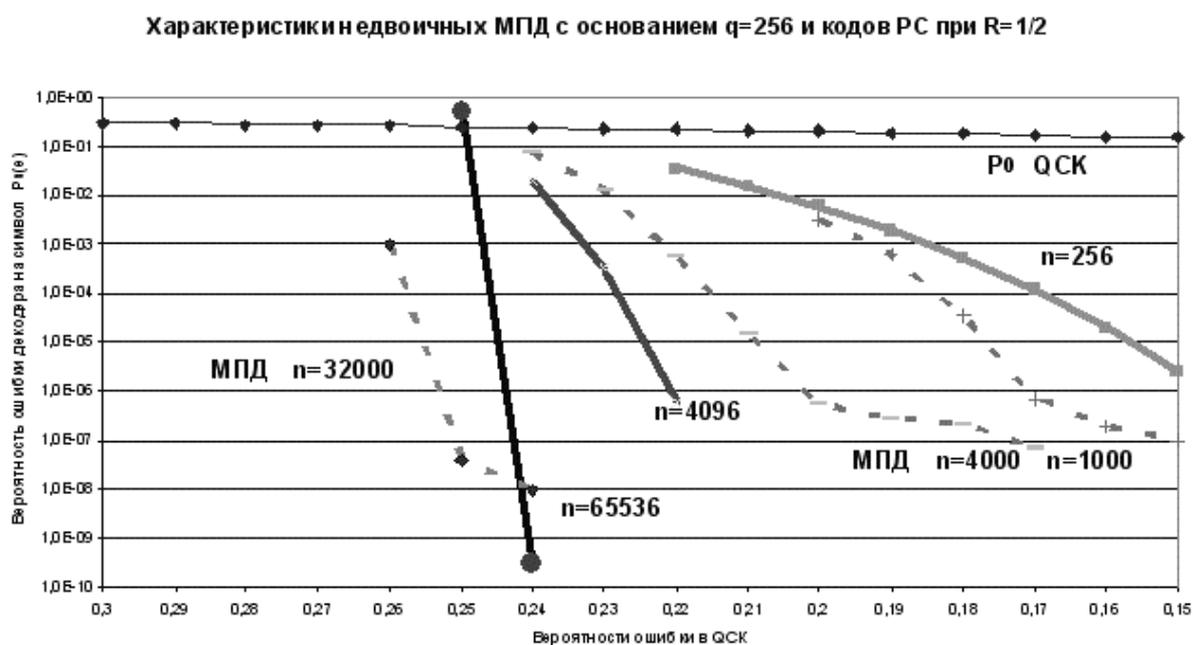


Рис. 2.

На рис. 2 представлены результаты моделирования недвоичного МПД алгоритма и оценок характеристик декодирования кодов РС в недвоичных каналах с независимыми ошибками для кодовой скорости $R=1/2$. Сплошные линии относятся к кодам РС соответствующей длины n , а пунктирные – недвоичному МПД с основанием (размером алфавита) $q=256$. Выбор такого q , соответствующего байтовой структуре символьных потоков информации, очень удобен для реализации алгоритмов обработки данных на стандартных вычислительных средствах. Из представленных графиков следует, что характеристики декодирования МПД для достаточно

коротких по современным меркам кодов длины $n=32000$ байтов недостижимы для кодов РС сколько угодно большой длины. Отметим при этом, что реальное применение до сих пор находили только коды РС длины не более $n=256$. Можно также утверждать, что коды РС длины порядка 4000 и более вообще не будут реализованы в обозримом будущем. В то же время байтовые МПД декодеры для мажоритарно декодируемых недвоичных кодов имеют весьма высокие характеристики, которые для кода с $n\sim 32000$ являются недостижимыми для кодов РС любой длины с $R=1/2$. Отметим, что переход к алфавиту q большего объёма ещё более увеличит эффективность МПД без сколько-нибудь заметного увеличения сложности декодирования, тогда как для длинных кодов РС увеличение размера основания кода происходит автоматически, но характеристики кодирования при этом не улучшаются в той же степени, как у МПД, который в случае необходимости просто использует более длинные коды при фиксированном алфавите.

Таким образом, согласно рис. 2, МПД реализует хорошие характеристики как при весьма простой программной реализации (что уже отмечалось выше), так и (как показало предварительное проектирование) в аппаратном виде.

Разумеется, если не требуется работа МПД в столь тяжёлой шумовой обстановке, как представлено на вышеприведённых рисунках, избыточность кодов для недвоичного МПД можно уменьшать в любой степени вплоть до нескольких процентов. В частности, большой объём моделирования недвоичного МПД алгоритма при $R=7/8$ показал, что при небольшой избыточности многопороговое декодирование остаётся очень простым, а характеристики результирующей достоверности мало отличаются от соответствующих характеристик такого же по избыточности кода РС длины порядка 4000 символов. Но при $R=7/8$ создать быстрый декодер для кода РС такой длины более чем проблематично, тогда как МПД остаётся и для малоизбыточных кодов весьма быстрым и очень простым.

На основании сопоставления эффективности длинных недвоичных кодов с МПД декодированием и сколь угодно длинных кодов РС можно сделать вывод о появлении возможности простой реализации на основе мажоритарно декодируемых недвоичных кодов сверхнадёжных высокодостоверных суперархивов видео-, аудио- и других специальных типов данных большого объёма с очень длинными сроками хранения. Это определяется ничтожной сложностью кодирования, простотой декодирования и очень легким контролем текущей достоверности в период хранения.

Столь же удобно и просто можно применять недвоичные МПД для кодирования CD-дисков и другой цифровой продукции широкого применения.

Совокупность полученных результатов для декодирования двоичных и символьных данных позволяет считать, что выполненные исследования подтверждают возможность успешного декодирования на базе МПД при всё более высоких уровнях шума канала. Сложность самого трудного этапа кодирования – процедуры МПД декодирования на приёмной стороне всегда оказывается много меньшей, чем у других сопоставимых по эффективности алгоритмов.

В ряде случаев, в том числе для многих недвоичных кодов, характеристики МПД не могут быть достигнуты никакими другими алгоритмами коррекции ошибок.

Экономическая ценность применения кодирования

Зарубежные специалисты оценивали каждый дополнительный 1 дБ энергетического выигрыша от применения кодирования (ЭВК) в миллион долларов более 20 лет назад [4]. Сейчас важность обеспечения всё более высоких уровней ЭВК и роста достоверности передаваемых данных многократно возросла, поскольку при этом можно значительно уменьшать размеры очень дорогих антенн или повышать дальность связи, увеличивать скорость передачи или снижать необходимую мощность передатчика, а также улучшать другие очень существенные параметры систем связи. Именно поэтому проблеме увеличения ЭВК во всём мире уделяется огромное внимание, а достоинства простых и эффективных алгоритмов декодирования невозможно переоценить.

Сложность реализации МПД

Главным достоинством МПД является очень низкая сложность декодирования [11, 13].

Подчеркнём, что при оценке затрат МПД на декодирование одного бита формально определяемая **сложность** как число операций у МПД примерно **на 2 порядка (!!!) меньше**, чем у турбо подобных кодов с сопоставимой энергетической эффективностью [4, 6, 8]. Например, результаты сравнения МПД и алгоритмов для турбо кодов [7] действительно показали разницу в скорости программных реализаций этих декодеров при одинаковых по уровню шума условиях до 70 раз даже без оптимизации параметров МПД.

Разработанные к настоящему моменту аппаратные версии МПД могут уже сейчас обеспечить высокие уровни ЭВК и скорости обработки до 480 Мбит/с. Высокие скорости декодирования в МПД оказываются достижимыми благодаря возможности полного распараллеливания работы многопорогового декодера, обычно недостижимого для других алгоритмов с большой энергетической эффективностью.

Особенности применения кодирования в системах ДЗЗ

Основные особенности применения тех или иных методов помехоустойчивого кодирования в системах ДЗЗ состоят в том, что на летательный аппарат (ЛА) помещается самая простая часть системы кодирования - кодер. Он всегда представляет собой весьма небольшой блок памяти или несколько относительно коротких регистров сдвига.

Наиболее сложная часть системы кодирования - декодер - находится на приёмной стороне системы связи. Это позволяет считать, что технические и технологические ограничения, которым должен удовлетворять такой декодер, находящийся обычно на Земле, оказываются достаточно мягкими и не идут ни в какое сравнение с теми ограничениями, которые имеют место на ЛА.

Основным требованием, которое следует учитывать при реализации ДЗЗ, является небольшой размер кодера на ЛА, что позволяет обеспечить минимизацию возможных искажений цифровых данных, находящихся в кодере и предназначенных для последующей передачи на Землю.

Выводы

Появление хорошо зарекомендовавших себя многопороговых алгоритмов декодирования с очень простой реализацией, обеспечивающих характеристики декодирования, мало отличающиеся от оптимальных, создаёт принципиально новые возможности для реализации систем обмена данными в разнообразных проектах в аэрокосмической области.

В случае реализации высокоскоростных систем ДЗЗ алгоритмы типа МПД имеют столь большие преимущества перед всеми остальными методами коррекции ошибок, что можно считать, что у него здесь нет вообще никаких конкурентов по стоимости и эффективности на скоростях выше 250 Мбит/с.

При постоянно наблюдаемом росте требований к достоверности передачи цифровых данных можно считать, что МПД может уже сейчас обеспечивать ЭВК порядка 7 - 9 дБ и более в таких высокоскоростных каналах связи, какими являются каналы в системах ДЗЗ, что уже сейчас составляет выигрыш $M=5-8$ раз, и, возможно, в ближайшем будущем до $M=10-15$ раз по величине возможного роста скорости передачи данных по сравнению с отсутствием кодирования и с достоверностью передачи, соответствующей вероятности ошибки на бит $P_b(e) \sim 10^{-7}-10^{-9}$ или менее. Особенно высокие характеристики кодирования возможны при использовании каскадных схем кодирования.

Применение МПД декодеров особенно важно для очень популярных сейчас малых аппаратов и принципиально меняет облик систем этого класса, позволяя значительно повысить качество, объём и достоверность получаемой информации.

К этому можно добавить, что современные всё более мощные методы предварительной обработки исходной информации непосредственно на передающей стороне позволяют без заметных потерь сжимать некоторые типы данных в $K=1,5-3$ раза, а после ограниченных дополнительных исследований, видимо, некоторые виды передаваемой первичной информации можно будет сжимать до 4-6 раз. Но это означает, что уже в настоящее время совместное применение тех мощных методов кодирования источника данных и канала, какими обладает сейчас теория информации, может обеспечить высококачественную передачу ценных научных данных на скоростях, в $M=15-40$ раз превышающих те уровни, которые достижимы без использования современных эффективных методов обработки информации.

Дополнительная целевая проработка ряда аспектов кодирования источника и канала может позволить уже в самом ближайшем будущем довести этот коэффициент ускорения скорости передачи до величин порядка $M\sim 30-80$ при одновременном значительном росте на 2-4 десятичных порядка уровня достоверности передаваемых цифровых данных.

Достижение этих целей не потребует выделения больших ресурсов и значительных затрат, поскольку основные теоретические и экспериментальные результаты и необходимые для этого технологии, позволяющие добиться таких, конечно, очень высоких результатов уже разработаны или могут быть ускоренно доработаны и затем реализованы в соответствии с потребностями развития современных систем ДЗЗ.

Дополнительные широкие возможности для применения кодирования высоконадёжных сверхбольших баз данных, которые могут быть частью систем обработки данных, включающих и комплексы ДЗЗ, открываются благодаря появлению простых высокоэффективных не двоичных алгоритмов МПД, рассмотренные выше.

Дополнительная информация об алгоритмах МПД представлена на специализированном двуязычном веб-сайте ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru.

Поддержку проведённых исследований и разработок осуществлял РФФИ по гранту №05-07 90024.

Литература

1. Золотарёв В.В. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования. Под научной редакцией чл.-кор. РАН Ю.Б. Зубарева. М., «Радио и связь», «Горячая линия – Телеком», 2006. 276 с.
2. Самойленко С.И., Давыдов А.А., Золотарёв В.В., Третьякова Е.И. Вычислительные сети. – М.: Наука, 1981.
3. Зубарев Ю.Б., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Строчков В.В. Многопороговые декодеры для высокоскоростных спутниковых каналов связи: новые перспективы // Электросвязь, 2005. №2. С. 10-12.
4. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник под ред. чл.-кор. РАН Ю.Б. Зубарева. М., «Горячая линия-Телеком», 2004. 128 с.
5. Зубарев Ю.Б., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Дмитриева Т.А. Многопороговые алгоритмы для спутниковых сетей с оптимальными характеристиками // Электросвязь, 2006. №10. С. 9-11.
6. Веб-сайт ИКИ РАН: www.mtdbest.iki.rssi.ru
7. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Сложность реализации эффективных методов помехоустойчивого кодирования. - Труды НТОРЭС им. А.С. Попова. Выпуск VI-1, 6-я Международная конференция и выставка "Цифровая обработка сигналов и её применение". Доклады-1, Москва-2004, С. 222-224.
8. Zolotarev V.V. The Multithreshold Decoder Performance in Gaussian Channels. - In Proc.: 7-th International Symposium on Communication Theory and applications, held on 13-18 July 2003, St. Martin's College, Ambleside, UK, pp.18-22.
9. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes - Proceeding of ICC'93, Geneva, Switzerland, pp. 1064-1070, May 1993.