

РАСШИРЕННЫЙ ОТЧЕТ ЗА 2007 ГОД ПО ПРОЕКТУ РФФИ 05-07-90024-в

Статус отчета: подписан

Дата последнего изменения: 11.01.2008

Изменения внес: Золотарев Валерий Владимирович

Отчет распечатан: 11.01.2008

Форма 501. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

1.1. Номер проекта

05-07-90024

1.2. Руководитель проекта

Золотарев Валерий Владимирович

1.3. Название проекта

Разработка методов повышения достоверности передачи данных в телекоммуникационных системах

1.4. Вид конкурса

в - Проекты создания и развития информационных, вычислительных и телекоммуникационных ресурсов

1.5. Год представления отчета

2008

1.6. Вид отчета

итоговый (2005-2007)

1.7. Аннотация

За время выполнения проекта проведено исследование эффективности применения многопороговых декодеров (МПД) самоортогональных кодов (СОК) в канале с АБГШ, которое показало, что с помощью МПД можно получить значения энергетического выигрыша (ЭВК) до 8÷10 дБ и выше со сложностью реализации, в десятки раз меньшей сложности сопоставимых по эффективности методов коррекции ошибок.

Также проанализирован эффект размножения ошибок в линейных кодах. Показано, что для уменьшения размножения ошибок необходим выбор кодов, характеризующихся малой степенью пересечения множеств ошибок, входящих в проверки относительно разных информационных символов. Предложена и реализована в программных средствах методика построения кодов, в наименьшей степени подверженных размножению ошибок. Результаты выполненного анализа позволяют дополнительно повысить эффективность кодирования в каналах с большим уровнем шума.

Разработана методика применения МПД в каналах с неравномерной энергетикой, с помощью которой можно приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала примерно на 0,5 дБ и даже больше. Выполнено исследование эффективности применения МПД в каналах со стираниями и канале со стираниями и искажениями. Показано, что и в данных условиях МПД демонстрирует высокую корректирующую способность.

Разработана методика применения МПД совместно с многопозиционными системами сигналов (многопозиционная фазовая и квадратурная амплитудная модуляции). Также предложена методика улучшения эффективности МПД (в таких условиях) и для этих классических систем сигналов за счет оптимизации расположения информационных и проверочных битов в символах сигнального множества, позволяющая приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности

канала более чем на 0,5 дБ.

Выполнены работы по развитию класса недвоичных МПД. Данные методы способны обеспечить (гораздо лучшую) на несколько десятичных порядков более высокую достоверность результатов декодирования (корректирующую способность), чем известные декодеры кодов Рида-Соломона, при ориентировочно в ~10000 и более раз более простой реализации для ранее недоступных для простого декодирования длинных недвоичных кодов. Недвоичные МПД можно применять для формирования, поддержания и восстановления файлов сверхбольших спец-, аудио- и видео- баз данных.

Разработана методика использования МПД в каскадных схемах кодирования. Предложены каскадные схемы кодирования, в которых совместно с МПД используются кодек Витерби и кодек Хэмминга. Показано, что данные схемы кодирования позволяют существенно (на 2 и более порядков) снизить вероятность ошибки в области эффективной работы МПД.

Предложен способ декодирования СОК, в основе работы которого лежит декодирование принятого блока несколькими МПД. Применение данного способа позволило заметно приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала, что для простых кодов составило примерно на 0,2 дБ.

Разработан имитатор цифрового канала передачи данных, позволяющий проводить всестороннее исследование эффективности применения различных лучших методов коррекции ошибок в различных условиях. Разработан демонстрационно-испытательный стенд с имитатором цифровых спутниковых, космических и других типов каналов для исследования характеристик аппаратных декодеров многопорогового типа.

В ИКИ РАН участниками проекта при содействии руководства Института разработан и реализован на ПЛИС Altera МПД сверточного СОК. Благодаря высокому уровню параллельности всех операций он способен декодировать поток данных со скоростью до 1,6 Гбит/с при работе всего лишь в 1,5 дБ от пропускной способности канала. Такие декодеры, в частности, можно применять для решения задач дистанционного зондирования Земли. Зарубежные аналоги столь эффективных быстродействующих аппаратных средств неизвестны.

В течение всего периода выполнения проекта развивался специализированный веб-сайт ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru, на котором представлялись основные результаты разработок МПД алгоритмов. Он читается в 53 странах. С него переписывается за год до 4 Гбайт данных.

1.8. Полное название организации, где выполняется проект

Институт космических исследований Российской академии наук

"Исполнители проекта согласны с опубликованием (в печатной и электронной формах) научных отчетов и перечня публикаций по проекту"

Подпись руководителя проекта

Форма 502. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

2.1. Номер проекта

05-07-90024

2.2. Руководитель проекта

Zolotarev Valery Vladimirovich

2.3. Название проекта

The developing of methods for increasing reliability of data transmission in telecommunication systems

2.4. Год представления отчета

2008

2.5. Вид отчета

ИТОГОВЫЙ (2005-2007)

2.6. Аннотация

The project implementation covered the research into the effectiveness of the multi-threshold decoder (MTD) application for channels with an additive white Gaussian noise (AWGN). The research has shown that with the help of the MTD it is possible to get a coding gain of up to $8 \div 10$ dB and more with the implementation complexity tens times lower than in other error correction methods comparable in their efficiency. Also, the error propagation effect in linear codes has been analyzed. It has been shown that to reduce error propagation it is necessary to choose codes having a small number of the same errors included in checks concerning different information symbols. A new technique for the construction of such codes has been suggested and realized in the software form. The results of the analysis allow to further raise the coding efficiency in channels with higher rates of noise.

A technique of MTD application in non-equal energy channels has been developed. It has been shown that with the help of the redistribution of energy between information and check bits it is possible to approach the area of MTD efficiency to the channel capacity by approximately 0,5 dB and more. Research has been conducted into MTD application efficiency in channels with erasures and in channels with errors and erasures. It has been shown that in these conditions MTD demonstrates a high erasure correction performance.

A technique of MTD application together with multi-positional modulation (M-ary PSK and QAM) has been developed. Also a technique of MTD efficiency improvement in such conditions is considered. It has been shown that the application of the given technique allows to approach the area of MTD effective work to the channel capacity by more than 0,7 dB.

The development of the non-binary MTD has been implemented showing that the non-binary MTD can provide a better symbol error rate than the Reed-Solomon code decoder with ~ 10000 and much less complexity. The non-binary MTD can be used in organizing storages of very large special-, audio- and video data bases.

The technique of using MTD for concatenated codes has been developed. Concatenated codes consisting of MTD and Hamming or Viterbi codec were suggested. It has been shown that these concatenated codes improve the bit error rate performance by hundreds of times.

A new way of self-orthogonal code decoding is suggested. This method is based on the decoding of the block received from the channel with several MTDs. The application of this method has allowed to approach the area of effective work of the MTD for simple codes to the channel capacity by approximately 0,2 dB.

The simulator of digital communication system has been developed that allows to perform comprehensive investigation of the best error-correction methods. A demo test bench has been developed completed with the digital satellite channel

simulator to study the characteristics of the transmission-receiving equipment.

In the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences the MTD for convolutional code is implemented at PLIS Altera. The decoder supports decoding with the rate of up to 1,6 Gbit/s at E_b/N_0 near 1,7 dB. This decoder can be used for Earth Remote Observation. Foreign analogues of similar speed and efficiency are not known.

A specialized website of the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences has been developed: www.mtdbest.iki.rssi.ru showing the main results of the research into the MTD development. The website is accessible in 53 countries; up to 4 Gbytes of data is annually downloaded from the website.

2.7. *Полное название организации, где выполняется проект*
Space Research Institute of the RAS

Подпись руководителя проекта

Форма 503. РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

3.1. *Номер проекта*

05-07-90024

3.2. *Название проекта*

Разработка методов повышения достоверности передачи данных в телекоммуникационных системах

3.3. *Коды классификатора, соответствующие содержанию фактически проделанной работы*

07-820 07-660

3.4. *Объявленные ранее (в исходной заявке) цели проекта на 2007 год*

Аппаратная реализация многопорогового метода коррекции ошибок на ПЛИС. Разработка методов кодирования на основе многопороговых декодеров, характеризующихся большей энергетической эффективностью. Разработка методики применения и исследование эффективности многопороговых декодеров в системах передачи данных по радиоканалам с несколькими передающими и несколькими приемными антеннами. Развитие имитатора цифрового канала передачи данных за счет добавления новых методов коррекции ошибок и новых моделей каналов связи. Достижение энергетического выигрыша кодирования, максимально близкого к абсолютной теоретической границе Шеннона – пропускной способности канала на основе совместной оптимизации параметров МПД и систем сигналов. Достижение характеристик эффективности двоичных МПД для хранения сверхнадежных архивов цифровых данных, недостижимых для кодов Рида-Соломона произвольно большой длины.

3.5. *Степень выполнения поставленных в проекте задач*

Среди поставленных на третий год работы над проектом задач в полном объеме решены следующие:

- многопороговый алгоритм декодирования для высоких скоростей передачи аппаратно реализован на ПЛИС Altera;
- разработаны методы кодирования на основе многопороговых декодеров, характеризующиеся большей энергетической эффективностью;
- создан демонстрационно-испытательный стенд с имитатором цифровых спутниковых, космических и других типов каналов для исследования аппаратных декодеров многопорогового типа;
- разработаны многопороговые декодеры для каналов с неравномерной энергетикой;
- получены характеристики эффективности двоичных МПД, недостижимые для кодов Рида-Соломона произвольно большой длины.

Задача разработки методики применения многопороговых декодеров в системах передачи данных по радиоканалам с несколькими передающими и несколькими приемными антеннами в полном объеме в этом году не решена. Это связано с тем, что основные усилия исполнителей проекта были направлены на реализацию МПД на ПЛИС, поиск методов получения энергетического выигрыша, максимально близкого к пропускной способности, и развитие двоичных многопороговых декодеров.

3.6. *Полученные за отчетный год важнейшие результаты*

1. Разработан и реализован на ПЛИС Altera многопороговый декодер сверточного самоортогонального кода

В июне 2007 г. в ИКИ создана и успешно испытана принципиально новая базовая аппаратная версия алгоритма МПД на новых типах ПЛИС Altera. Благодаря высокому уровню параллельности всех операций в декодере он превращен в этой разработке в одноканальный автомат, способный декодировать данные со скоростью до

1,6 Гбит/с при использовании простых базовых кристаллов. Возможность наращивания однородных стандартных чипов такого типа позволяет обеспечивать столь высокие энергетические характеристики кодирования, которые еще в течение, видимо, 7 – 10 лет не будут доступны для других методов при столь высоких скоростях декодирования. Тем самым не только реализован декодер на новых типах ПЛИС, что не удалось сделать до конца в 2006 г., но и обеспечить столь высокие его характеристики, которые будут ориентиром для будущих разработок в течение ряда лет. Именно обеспеченные компьютерным моделированием и полученные затем при аппаратных испытаниях такого декодера высокие характеристики МПД создали условия, при которых руководство ИКИ РАН сумело выделить в поддержку выполнения гранта РФФИ значительные материальные и кадровые ресурсы, что и помогло создать МПД декодер на новой элементной базе. Эти декодеры делают российскую науку бесспорным лидером в очень сложном и дорогом соревновании методов и идей между различными направлениями в теории и технологиях помехоустойчивого кодирования в сфере самых быстрых алгоритмов, предназначенных, в частности, для систем дистанционного зондирования Земли.

Для отладки и исследования разрабатываемых аппаратных декодеров многопорогового типа создан демонстрационно-испытательный стенд с имитатором цифровых спутниковых, космических и других типов каналов.

2. Рассмотрены вопросы применения МПД для задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)

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 в рамках гранта РФФИ многопороговые декодеры 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 объемы передачи этой важнейшей информации для служб метеорологического прогнозирования и других наук о Земле предъявляют все возрастающие требования к качеству передаваемой информации и ее достоверности. А поскольку с ростом требований по достоверности передаваемых данных необходимо применять все более длинные коды, важность работ по МПД, которые особенно легко адаптируются к кодам все большей длины, становится еще более очевидной.

Особенно важно обеспечить высокие уровни достоверности в тех случаях, когда перед передачей с орбиты информация в силу ее огромного объема 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 объемов 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 все большие усилия для обеспечения высокого уровня достоверности передачи цифровых данных. Главную роль здесь уже давно играют методы помехоустойчивого кодирования

Появление хорошо зарекомендовавших себя многопороговых алгоритмов декодирования с очень простой реализацией, обеспечивающих характеристики декодирования, мало отличающиеся от оптимальных, создает 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 обеспечивать ЭВК порядка 7 – 9 дБ и более в таких высокоскоростных каналах связи, какими являются каналы в системах ДЗЗ, что уже сейчас составляет выигрыш в 5 – 8 раз, и, возможно, в ближайшем будущем в 10 – 15 раз по величине возможного роста скорости передачи данных по сравнению с отсутствием кодирования и с достоверностью передачи, соответствующей вероятности ошибки на бит 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, объем и достоверность получаемой информации.

Наконец, укажем и на то, что при постоянном росте требований к достоверности декодирования, главный критерий эффективности кодирования – ЭВК – также растет, что еще более подчеркивает настоятельную необходимость более широкого применения кодирования во всех цифровых системах связи. Кодирование ведет к существенному росту к.п.д. используемых очень дорогих цифровых каналов при ничтожных затратах на разработку новых декодеров относительно простого увеличения числа каналов, что определяет огромную доходность применения кодирования, которая может превышать даже десятки тысяч процентов. Реально в нашей стране этой тематикой занимаются только участники данного проекта, оформившие также и заявку № 08-07-00078 на дальнейшее развитие разработок и исследований этого важнейшего теоретического и прикладного направления в очень наукоемкой области информатики.

3. Детально проработаны идеи использования МПД в каналах с неравномерной энергетикой

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 сверточных кодов. Иначе говоря, критерием наилучшего перераспределения энергии между каналами следует выбрать минимальный уровень проявления эффекта размножения ошибок (РО) при мажоритарном декодировании. Снижение эффекта размножения ошибок позволяет значительно улучшить сходимость решений МПД к оптимальным, что, в свою очередь, создает условия для много более эффективной работы алгоритмов МПД при больших уровнях шума.

При формировании такой достаточно простой сигнально-кодовой конструкции рассматриваются различные способы балансировки энергетикой. 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). 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 от 1/4 до 3/4 может составлять до 1 дБ, что очень важно, поскольку исходная эффективность МПД в каналах обычного типа оказывается уже весьма высокой. При этом отношение энергетик каналов должно находиться в пределах от 1,3 до 3,2 раза.

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 за последний год результаты в этой области иллюстрируются графиками на рис. 1. Из данных графиков следует, что использование каналов с неравномерной энергетикой позволяет улучшить эффективность многопороговых алгоритмов примерно на 1 дБ по сравнению с другими МПД декодерами.

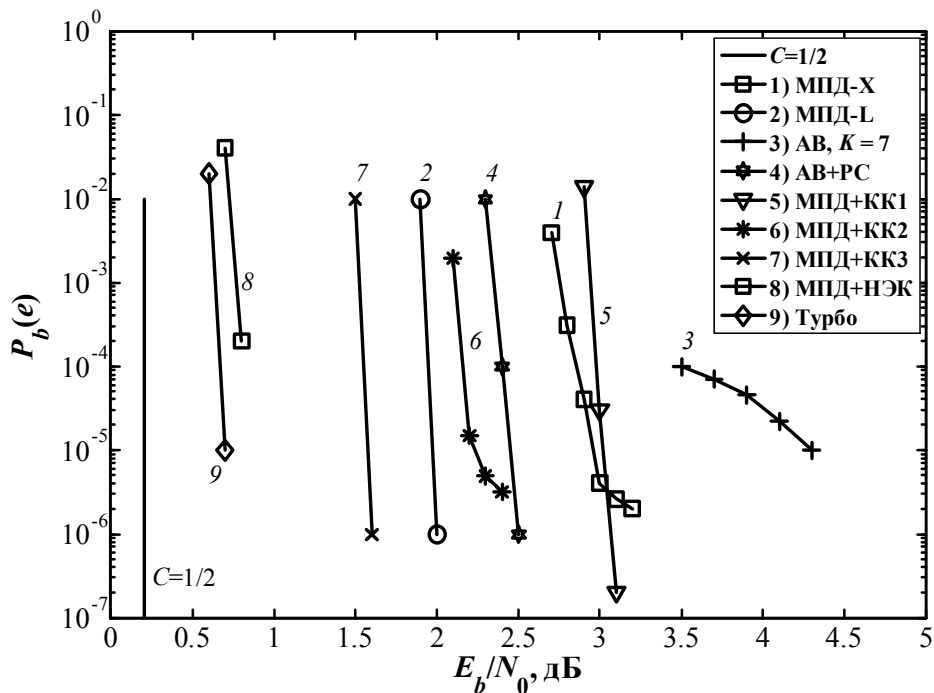


Рис. 1

На данном рисунке представлены возможности предложенных алгоритмов и уже известных методов. График «1) МПД-X» соответствует эффективности МПД декодера на ПЛИС Xilinx, кривые «5) МПД+КК1», «6) МПД+КК2» и «7) МПД+КК3» даны для применения МПД в простейших каскадных схемах. На рис. 1 также представлены кривые эффективности для алгоритма Витерби со стандартным кодом длины $K=7$ (кривая «3) АВ, $K=7$ ») и для каскадной схемы АВ с кодом Рида-Соломона (кривая «4) АВ+РС»), а также для турбо кода (кривая «9) Турбо»). Вертикаль $C=1/2$ определяет пропускную способность гауссовского канала, к которой стремятся разработчики при улучшении характеристик декодирования при кодовой скорости $R=1/2$. «МПД-L» – длинный код и МПД декодер с $L=40$ итерациями. Новый результат для МПД и канала НЭК – пункт «8) МПД+НЭК» – соответствует возможности

очень простого и значительного повышения эффективности декодирования кода при задержке принятия решения не более 400000 битов, при котором сохраняется хорошо известная достаточно большая скорость работы МПД 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 последний год выполнения проекта РФФИ.

С учетом 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, дает основание полагать, что МПД можно активно использовать при разработках современной аппаратуры передачи цифровых данных для космических и спутниковых каналов связи.

4. Получены новые существенно более высокие характеристики для недвоичных многопороговых декодеров

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 сколь-нибудь успешных попыток обобщения этих алгоритмов на недвоичные символьные коды и соответствующие им пороговые декодеры. В ИКИ РАН в рамках гранта РФФИ созданы новые методы декодирования на основе многопороговых декодеров (МПД), которые можно применять и в каскадных схемах, и в системах поддержки целостности и достоверности сверхбольших баз данных. 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 вообще не имеют аналогов в мировой литературе по корректирующим кодам.

Теоретические результаты, оценки характеристик и большой объем 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 принципиально 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 объем статистики декодирования порядка миллиарда символов может быть получен

примерно за час работы ПК общего назначения на обычных неоптимизированных программных средствах.

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.

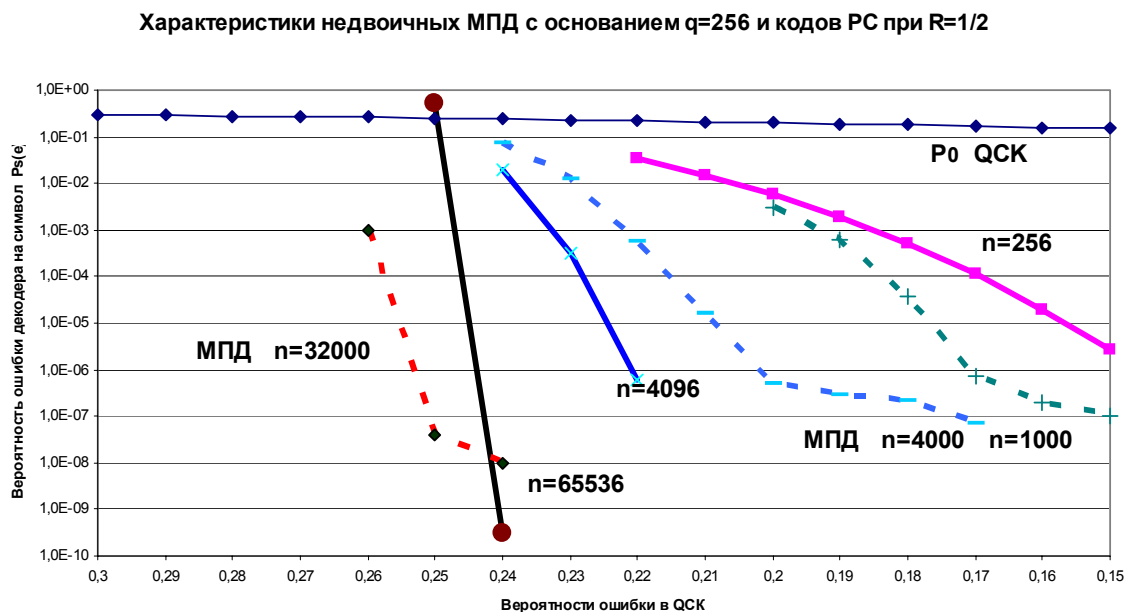


Рис. 2

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 $n \approx 32000$ являются недостижимыми для кодов РС любой длины с $R=1/2$. Отметим, что переход к алфавиту q большего объема еще 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.

Разумеется, если не требуется работа МПД в столь тяжелой шумовой обстановке, как представлено на рис. 2, избыточность кодов для недвоичного МПД можно уменьшать в любой степени вплоть до нескольких процентов. В частности, большой объем моделирования недвоичного МПД алгоритма при $R=7/8$ показал, что при небольшой избыточности многопороговое декодирование остается 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 остается и для малоизбыточных кодов весьма быстрым и очень простым.

Специалисты в области теории и прикладных проблем связи отмечали в своих рецензиях на монографию 2006 года «Теория и алгоритмы многопорогового декодирования» В.В.Золотарёва, руководителя данного гранта: «Для некоторых кодовых параметров очень простые недвоичные символьные МПД эффективно работают при таких уровнях шума в канале, которые недоступны для кодов РС сколь угодно большой длины...» (Профессор РГТУ д.т.н. В.В.Витязев). Аналогичные высокие оценки новым кодам и символьным МПД декодерам дали в своих рецензиях д.т.н. С.В.Аверин (ООО ОРТ), профессор д.т.н. С.Н.Кириллов (РГТУ), а также профессор д.т.н. Ю.С.Шинаков (МГУСИ). А научный редактор монографии член-корреспондент РАН Ю.Б.Зубарев написал в своем предисловии к этой книге: «Преимущество недвоичных МПД перед кодами Рида–Соломона оказывается сразу настолько значительным, что фактически можно говорить о том, что открытые более 20 лет назад эти новые коды и алгоритмы знаменуют собой совершенно новую эпоху в обработке символьной информации...». Для этого типа МПД при некоторых типичных значениях параметров кода и декодера просто вообще нет никаких других методов любой сложности, которые могли бы сравниться с ним по эффективности.

Таким образом, полученные в 2007 году новые результаты по методам декодирования недвоичных кодов позволяют дополнительно уменьшить вероятности ошибки на блок на 3 или даже 5 десятичных порядков по сравнению с уже очень эффективными методами МПД декодирования. Эти методы можно применить для формирования, поддержания и восстановления файлов сверхбольших спец-, аудио- и видео- баз данных. Важно, что улучшение характеристик новых кодов на несколько десятичных порядков от уже весьма высокого уровня достоверности исходных МПД недвоичного типа достигнуто всего лишь при 20% увеличении объема вычислений в декодере, который использует простейшие каскадные коды на базе кодов с контролем по модулю q .

5. Завершена разработка каскадных схем кодирования, состоящих из МПД и кодека Хэмминга или кодека Витерби

В отчетном периоде завершилась разработка трех каскадных схем кодирования/декодирования, в которых в качестве составляющего элемента используются многопороговые декодеры. Для всех предложенных схем получены выражения для аналитической оценки их эффективности, а также путем компьютерного моделирования получены экспериментальные результаты.

Первая предлагаемая каскадная схема заключается в каскадировании самортогонального кода, декодируемого с помощью МПД, с расширенным кодом Хэмминга, декодируемым с помощью декодера Чейза. Данный выбор обоснован тем, что ошибки МПД в области его эффективной работы в основном одиночные. Данные ошибки должны легко исправляться с помощью простейшего внешнего кодека, что позволит существенно уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы МПД.

Для предварительной оценки эффективности предложенной каскадной схемы кодирования получена нижняя оценка вероятности ошибки декодирования. Такие оценки вероятности ошибки для каскадного кода, состоящего из самоортогонального кода (СОК) с $R=1/2$ и расширенного кода Хэмминга длиной 256 и 512, представлены на рис. 3. При этом использовался СОК с $d=7$ и 9. Из оценок следует, что применение данной схемы позволит уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы МПД на два и больше порядков. Результаты компьютерного моделирования каскадного кода, представленные на рис. 3, показали, что с его помощью можно как уменьшать вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы МПД на два и

более порядков, так и приближать область эффективной работы к пропускной способности канала на 0,2 – 0,3 дБ. При этом сложность декодера каскадного кода остается невысокой.

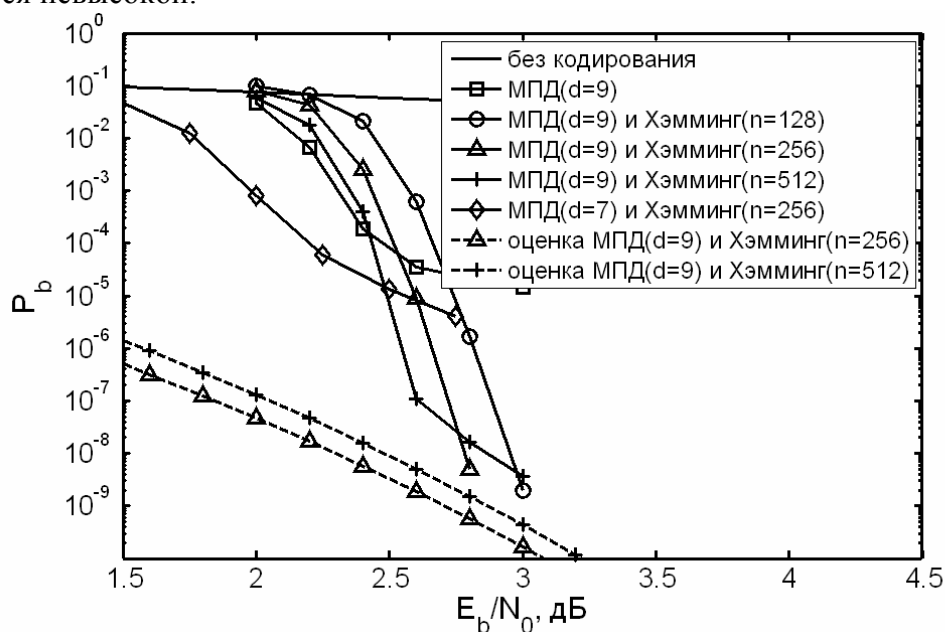


Рис. 3 – Нижние оценки вероятности ошибки каскадной схемы, состоящей из СОК с $R=1/2$ и кода Хэмминга, и экспериментальные характеристики в канале с АБГШ

В основе второй предложенной каскадной схемы коррекции ошибок лежит каскадирование самоортогонального кода, декодируемого с помощью МПД, со сверточным кодом, декодируемым с помощью декодера Витерби. В отличие от предыдущей каскадной схемы, здесь МПД находится во внешнем каскаде. Данный выбор обоснован тем, что декодер Витерби является оптимальным и позволяет несколько уменьшать вероятность ошибки даже при очень высоком уровне шума в канале передачи данных. После этого МПД сможет еще существенно уменьшить вероятность ошибки декодирования.

Для предварительной оценки эффективности предложенной каскадной схемы кодирования получена нижняя оценка вероятности ошибки декодирования. Такие оценки вероятности ошибки для каскадного кода, состоящего из короткого сверточного кода с $R=1/2$, $K=7$ и СОК с $R=4/5$ и $9/10$ при различных значениях кодового расстояния d , приведены на рис. 4. При этом использовался СОК с $d=7$ и 9 . Как и следовало ожидать, наклон кривых, отражающих вероятности ошибки декодирования предложенных каскадных схем, существенно больше наклона кривых, соответствующих характеристикам оптимального декодера обычных СОК. Из этого следует, что применение предложенной схемы может позволить уменьшить вероятность ошибки декодирования, начиная с отношения сигнал/шум 2,5 – 3 дБ, на несколько порядков.

Экспериментальные характеристики каскадных схем, полученные с помощью компьютерного моделирования и представленные на рис. 4, подтверждают данные выводы. Отметим, что предложенные каскадные схемы, состоящие из короткого сверточного кода и СОК, позволяют на четыре и более порядков уменьшить вероятность ошибки декодирования по сравнению с обычным МПД. При этом область, в которой достигается уменьшение вероятности ошибки незначительно (примерно на 0,3 дБ) сдвигается в сторону меньших шумов.

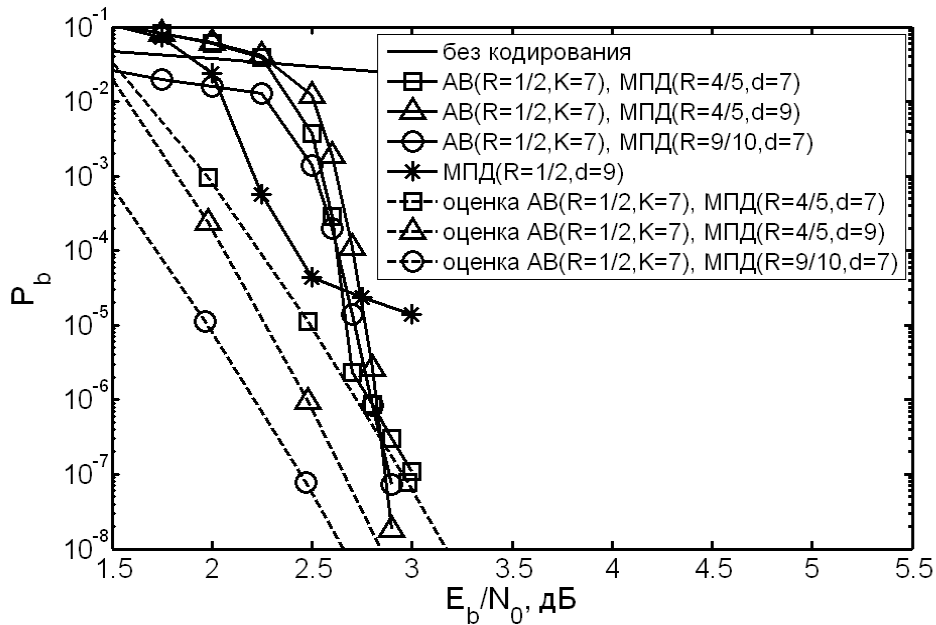


Рис. 4 – Нижние оценки вероятности ошибки каскадной схемы, состоящей из короткого сверточного кода и СОК, и экспериментальные характеристики в канале с АБГШ

Для дополнительного улучшения эффективности данной каскадной схемы вместо двоичного МПД в ней можно применять недвоичные многопороговые декодеры. Переход к недвоичным кодам объясняется тем, что ошибки декодера Витерби в основном группируются в пакеты, которые при переходе к недвоичным кодам будут искажать лишь небольшое число недвоичных символов.

Для предварительной оценки эффективности предложенной каскадной схемы кодирования получена нижняя оценка вероятности ошибки декодирования. Такие оценки вероятности ошибки для каскадного кода, состоящего из короткого сверточного кода с $R=1/2$, $K=7$ и недвоичного СОК с $R=4/5$, $8/10$ и $9/10$ при различных значениях кодового расстояния d , представлены на рис. 5. При этом использовался недвоичный СОК с $d=7$ и 9 при значении $q=256$. Из сравнения данных графиков с ранее представленными видно, что использование недвоичного МПД вместо двоичного может позволить получить дополнительный ЭВК порядка 0,5 дБ и даже больше. Из анализа экспериментальных характеристик данной каскадной схемы, также представленных на рис. 5, следует, что за счет применения вместо двоичных СОК недвоичных удалось получить дополнительный ЭВК около 0,5 дБ при вероятности ошибки декодирования $P_b=10^{-6}$. Также заметим, что теперь уменьшение вероятности ошибки по сравнению с обычным МПД достигается во всей области эффективной работы последнего и даже несколько раньше.

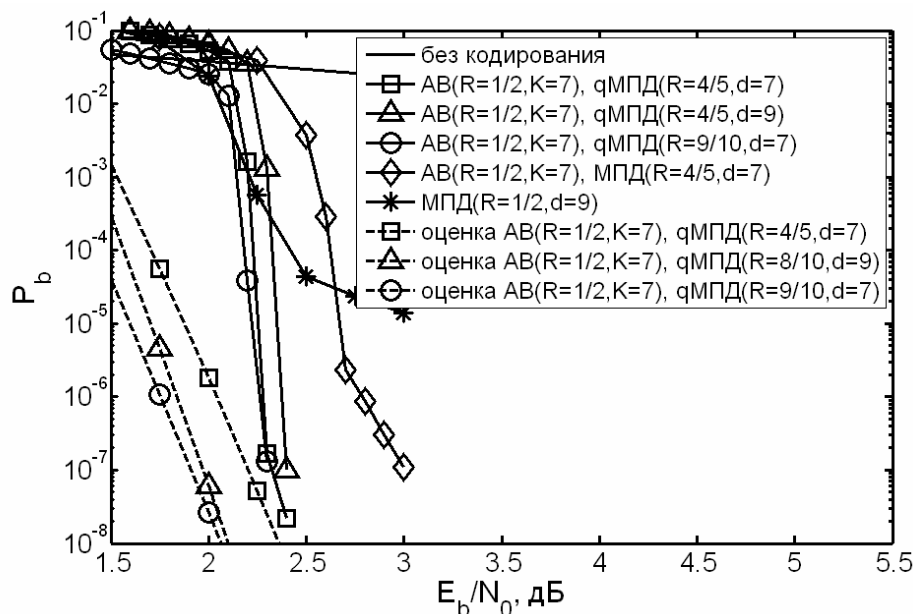


Рис. 5 – Нижние оценки вероятности ошибки каскадной схемы, состоящей из сверточного кода и недвоичного СОК, и экспериментальные характеристики в канале с АБГШ

Дополнительно следует отметить, что характеристики каскадного кода, состоящего из сверточного кода и недвоичного СОК, оказываются примерно на 0,2 дБ лучше характеристик широко используемого каскадного кода, состоящего из кода Рида-Соломона и сверточного кода, декодируемого с помощью декодера Витерби. Заметим, что увеличение ЭВК на 0,1 дБ уже считается серьезным достижением. Еще одним очень важным преимуществом данной каскадной схемы является простота ее реализации. Схема гораздо проще, чем схема кодирования/декодирования каскадного кода Рида-Соломона и Витерби.

Особенностью предложенных каскадных схем на базе сверточных кодов и МПД является то, что они могут найти применение в уже существующих системах передачи данных, в которых в настоящее время используется кодек Витерби, путем простого добавления в нее кодера МПД в качестве внешнего кодера. Это позволит улучшить энергетическую эффективность систем передачи данных примерно на 1,5 – 2 дБ без их существенного изменения.

Данные схемы, а также методика применения многопороговых декодеров совместно с многопозиционными системами сигналов легли в основу защищенной в 2007 г. диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Диссертация защищена в рязанском государственном радиотехническом университете. Автор работы Гринченко Н.Н., название работы «Организация помехоустойчивого кодирования в высокоскоростных телекоммуникационных системах», руководитель Костров Б.В., консультант Овечкин Г.В.

6. Развивается специализированный двуязычный веб-сайт ИКИ РАН о многопороговом декодировании www.mtdbest.iki.rssi.ru.

На веб-сайте регулярно помещаются новые статьи, демонстрационные материалы и презентации последних результатов по МПД. Здесь же можно найти ответы на вопросы по кодированию и объявления о предстоящих или уже состоявшихся событиях в сфере разработок МПД алгоритмов.

Веб-сайт ориентирован на научно-методическую и учебно-информационную деятельность. Он содержит более 240 позиций структурированных материалов: статьи, комментарии, демонстрационные материалы, презентации, переписку с читателями сайта, компьютерные фильмы по методам МПД и другую полезную

информацию. Его объем существенно превышает размеры порталов многих крупнейших научных и коммуникационных организаций, занимающихся аналогичными научно-технологическими проблемами.

7. Выводы

Таким образом, для всех разработанных за 3 года выполнения проекта алгоритмов типа МПД удалось обеспечить их важнейшее и очень трудно достижимое преимущество перед другими методами декодирования с сопоставимой сложностью: примерно на 2 десятичных порядка меньшее число операций декодирования на бит. Это редчайшая ситуация в истории развития систем обработки сигналов и достигнутое алгоритмами МПД преимущество, конечно, нужно соответствующим образом использовать.

На результаты выполнения проекта дали положительные отзывы академик РАН, д.т.н., профессор, Лауреат Ленинской и Государственной премий СССР В.К. Левин и член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Лауреат государственной премии РФ и Премии правительства РФ Ю.Б. Зубарев. Копии отзывов приложены к бумажному варианту отчета.

Считаем также очень важным подчеркнуть, что именно поддержка работ по кодированию грантом РФФИ позволила небольшому коллективу исследователей значительно ускорить свои исследования по МПД и за истекшие 3 года выйти на самые передовые позиции как в теории кодирования, так и в технологиях, используемых для разработок эффективных декодеров. Фактически коллектив, работающий по гранту, стал входить в тройку разработчиков основных ведущих направлений технологически доступных методов кодирования: МПД, турбо и низкоплотностных (LDPC) кодов. Учитывая, что сложность МПД примерно в 100 раз меньше, чем у турбо кодов с равной эффективностью, а низкоплотностные коды имеют реализуемые с приемлемой сложностью характеристики при уровне энергетике порядка 1,5 дБ при кодовой скорости $R=1/2$, можно вполне обоснованно считать, что МПД несомненно остается в числе претендентов на лидерство и в дальнейшем. Его возможности для кодовой скорости $R=1/2$ сейчас оказываются в пределах энергетике ~ 1 дБ и даже менее, что соответствует для некоторых кодовых схем удаленности от границы Шеннона меньшей, чем 0,6 дБ. Кроме того, у МПД есть огромное преимущество по скорости работы, которое легко преобразовать и использовать для небольшого роста объема вычислений в тех каналах, где не нужна предельно высокая скорость декодирования.

Именно поэтому естественным продолжением данного гранта было бы продолжение работ по этой теме в рамках заявки на грант 2008 – 10 гг. №08-07-00078-а, поданной от имени коллектива исполнителей данного гранта в РФФИ. В гранте заявлены исследовательские работы по фундаментальной проблеме исправления ошибок в непосредственной близости от границы Шеннона, а также предложен подход к рассмотрению возможности построения алгоритмов, работающих даже несколько ниже уровня энергетике 0,2 дБ, определяемой границей Шеннона. Решение этой, конечно же, очень сложной проблемы, вывело бы отечественную науку в рассматриваемой области цифровой обработки сигналов на абсолютные лидерские позиции, что при соревновании с технологически развитыми странами в столь наукоемкой области техники цифровой связи является чрезвычайно сложной, исключительно важной и в высшей степени престижной теоретической задачей. Ее решение поднимет к.п.д. цифровых каналов до уровня столь близкого к 100%, который еще 5 лет назад было невозможно и представить.

3.7. Степень новизны полученных результатов

В рамках проекта РФФИ в 2007 году получены новые результаты по методам декодирования недвоичных кодов, которые позволяют дополнительно уменьшить вероятности ошибки на блок на 3 – 5 десятичных порядков по сравнению с уже очень

эффективными методами многопорогового декодирования.

Научной новизной также характеризуются результаты, относящиеся к поиску решений в области разработки многопороговых декодеров для каналов с неравномерной энергетикой. При организации таких каналов за счет перераспределения энергии между информационными и проверочными символами удалось обеспечить работу многопорогового декодера при энергетике, всего лишь на 1 дБ большей минимально возможной, определяемой пропускной способностью канала

На основе новой общей теории алгоритмов помехоустойчивого кодирования, построенных на принципах глобальной оптимизации функционалов, в ИКИ РАН создана аппаратура помехоустойчивого кодирования, реализующая алгоритмы многопорогового декодирования, опережающая аналогичные зарубежные разработки на 5 – 7 лет. Отечественное космическое приборостроение для дистанционного зондирования Земли и других приложений обеспечено такими программными и аппаратными средствами защиты от ошибок при передаче данных по высокоскоростным космическим и спутниковым каналам, характеристики которых по быстрдействию и другим параметрам не имеют сопоставимых аналогов в стране и за рубежом.

На базе новых патентуемых в настоящее время оптимизационных процедур помехоустойчивого кодирования в ИКИ РАН созданы методы особо надежного хранения данных и наиболее важных файлов и данных в сверхбольших БД, использующие особые модификации алгоритмов многопорогового декодирования, которые по скорости контроля ошибок и восстановления искаженной информации в таких базах данных не имеют аналогов. По быстрдействию разработанная система кодирования оказывается почти на 2 порядка более быстрой, чем ее зарубежные аналоги. Характеристикам противодействия возможным искажениям цифровых данных среди всех других известных алгоритмов аналогов в мире не существует. За рубежом исследования для кодов такого типа даже не ведутся, поскольку все теоретические основы алгоритмов МПД, без которых невозможно развитие этих высокоэффективных методов невозможно, не развиваются вообще.

За последний год работы над проектом завершена работа над разработкой трех новых каскадных схем кодирования/декодирования, в которых в качестве составляющего элемента используются многопороговые декодеры. Получены новые аналитические оценки эффективности данных каскадных схем. Показано, что использование предложенных каскадных схем кодирования/декодирования позволяет как уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы МПД на 2 – 4 десятичных порядка, так и приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала примерно на 0,5 дБ при сохранении невысокой сложности практической реализации.

3.8. Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем

Сопоставление характеристик многопороговых декодеров с характеристиками лучших современных методов коррекции ошибок было приведено в расширенном отчете за 2005 и 2006 года. Сопоставление полученных за отчетный период результатов с мировым уровнем было проведено в разделе 3.6 данного отчета при их описании.

Отметим только, что уникальные характеристики МПД для двоичных кодов уже позволили на основе последних теоретических проработок строить сверхбыстродействующие декодеры, мировое лидерство коллектива проекта по которым сохранится примерно на 5 – 7 лет. Уникальность характеристик не двоичных МПД позволяет говорить об их абсолютном преимуществе над кодами РС для всех достаточно длинных кодов при любых параметрах кодирования. Это определяется уровнем теоретических изысканий, аналогов которым в мире нет, и прикладных

достижений, которые можно охарактеризовать как открытия в области алгоритмов цифровой обработки. Абсолютные приоритеты российских исследований в этой сфере алгоритмов цифровой обработки неоспоримы, а экономические характеристики кодов при их реализации будут совершенно грандиозны благодаря особой легкости повышения к.п.д. использования очень дорогих цифровых каналов с помощью алгоритмов МПД.

3.9. *Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта*

Разработки и исследования проводились на основе теории вероятностей, математической статистики, системного анализа, математического и имитационного моделирования, технологий модульного и объектно-ориентированного программирования.

Подчеркнем один важнейший момент, который в решающей степени определяет, по мнению исполнителей проекта, успех небольшого коллектива проекта в разработке максимально простых методов кодирования.

Специалисты всего мира, понимая важность создания декодеров, выполняющих минимальное число операций, тем не менее, создают все более сложные методы, которые иногда при правильном проектировании декодеров действительно улучшают характеристики методов опять же за счет роста сложности. Все исследователи обычно только после получения более эффективных декодеров пытаются упростить их. Успех исполнителей данного проекта, претендующих на продолжение работ по кодированию и на получение результатов, которые даже не планируются пока зарубежными исследователями, состоит, по нашему мнению, в следующем.

Все исследования по МПД, в отличие от западных работ, базируются на принципе развития максимально простых методов коррекции ошибок. Особо показательным в этом отношении являются недвоичные декодеры, которые при некоторых типичных наборах параметров кодирования оказываются лучше и проще декодеров кодов Рида-Соломона в десятки тысяч или даже в миллионы раз для самых длинных из уже проанализированных коллективом проекта кодов. И только после тонкой и точной отработки основного метода исследования мы проводим доработку методов декодирования в плане повышения эффективности. Имея огромное преимущество методов МПД перед другими алгоритмами, коллектив разработчиков имеет возможность и ресурсы для небольшого увеличения числа операций декодирования, если при этом возможно очень значительное дополнительное улучшение характеристик таких улучшенных декодеров. Эта особенность исследовательских работ, проводимых коллективом сотрудников гранта позволила этому коллективу приблизиться к уровню результатов для упоминавшихся выше турбо и LDPC кодов при числе сотрудников, работающих по теме гранта, примерно в 10000 раз меньшем, чем по указанным наиболее популярным темам теории кодирования. Мы уверены, что именно предложенный нами стиль от простейших методов к их более эффективным модификациям, а не максимальная эффективность за счет сложности и последующее – обычно очень проблемное! – упрощение (стиль западных исследований), сможет помочь решить в ближайшем будущем проблему декодирования максимально просто и быстро.

3.10.1. *Количество научных работ, опубликованных в ходе выполнения проекта*

31

3.10.2. *Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати в 2007 г.*

10

3.11. *Участие в научных мероприятиях по тематике проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда*

6

- 3.12. *Использовалось ли оборудование центров коллективного пользования*
нет
- 3.13. *Участие в экспедициях по тематике проекта, проводимых при финансовой поддержке Фонда*
- 3.14. *Финансовые средства, полученные от РФФИ*
350000 руб.
- 3.15. *Вычислительная техника и научное оборудование, приобретенные на средства Фонда*
Ноутбук DELL - 47658 р.
- 3.16. *Адреса (полностью) ресурсов в Internet, подготовленных авторами по данному проекту*
www.mtdbest.iki.rssi.ru
- 3.17. *Библиографический список всех публикаций по проекту*
1. Колупаев А.В., Кондрахин А.В., Овечкин Г.В. Система имитации цифровой передачи данных по спутниковым и иным каналам связи // Межвуз. сб. науч. тр. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем». Рязань, РГРТА, 2005. С. 109–111.
 2. Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Эффективность каскадных схем кодирования на базе многопорогового декодера // Межвуз. сб. науч. тр. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем». Рязань, РГРТА, 2005. С. 119–123.
 3. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Развитие многопороговых алгоритмов декодирования помехоустойчивых кодов // мат. науч.-практ. конф. «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития». Одесса: Черноморье, 2005. Том 7. С. 13–14.
 4. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В. Перспективные методы коррекции ошибок для высокоскоростных спутниковых систем связи // Мат. 14-й Межд. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2005. С. 48–49.
 5. Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Многопороговые декодеры: новые достижения // Мат. 14-й Межд. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2005. С. 57–58.
 6. Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Построение самоортогональных кодов устойчивых к эффекту размножения ошибок // Мат. 14-й Межд. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2005. С. 70–71.
 7. Дмитриева Т.А., Золотарев В.В. Разработка алгоритма декодирования на основе многопорогового декодера // Мат. 14-й Межд. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2005. С. 50–52.
 8. Овечкин П.В., Цыплаков Д.А. Разработка методов декодирования помехоустойчивых кодов на базе многопороговых декодеров // материалы всероссийского смотра-конкурса научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика-2005». Новочеркасск, 2005. Часть 1. С. 140–144.
 9. Золотарев В.В. Алгоритмы многопорогового декодирования линейных кодов // Мобильные системы. М.: 2005. №12. С. 56–62.
 10. Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Дмитриева Т.А. Многопороговые алгоритмы для спутниковых сетей с оптимальными характеристиками // Электросвязь, №10, 2006.
 11. Золотарев В.В. Многопороговое декодирование для информационных потоков с байтовой структурой // Мобильные системы, №3, 2006 г.

12. Гринченко Н.Н., Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Применение многопорогового декодера в каналах со стираниями // Труды НТОРЭС им. А.С.Попова, 2006 г. С. 338–340.
13. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В. Имитатор цифрового спутникового канала связи // мат. Всероссийского научно-практического семинара «Сети и системы связи». Рязань: РВВКУС, 2006. С. 168–170.
14. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Вопросы применения многопороговых декодеров в каналах связи со стираниями // Межвуз. сб. науч. тр. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем». Рязань, РГРТА, 2006. С. 47–50.
15. Гринченко Н.Н. Разработка каскадных схем кодирования на основе многопороговых декодеров // мат. Всероссийской научно-технической конференции НИТ-2006. Рязань: 2006. С. 73–74.
16. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование для высокоскоростных спутниковых каналов связи // Цифровая обработка сигналов, 2006. №4, С. 29–33.
17. Овечкин П.В. Эффективность использования многопорогового декодера в каналах связи со стираниями // мат. Всероссийской научно-технической конференции НИТ-2006. Рязань: 2006. С. 74–76.
18. Дмитриева Т.А., Золотарев В.В. Разработка алгоритма декодирования на основе многопорогового декодера // 8-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Доклады-1, М.: 2006. С. 57–59.
19. Гринченко Н.Н., Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Многопороговое декодирование в каналах с многопозиционной модуляцией // Вестник РГРТУ, 2006 г. Вып. 19, С. 179–182.
20. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Разработка каскадных схем кодирования на основе многопороговых декодеров // 8-я межд. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М.: 2006. Том 1. С. 60–63.
21. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование для цифровых систем связи // Известия ТРТУ, №15(70), Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. С. 5–10.
22. Гринченко Н.Н., Костров Б.В. Оценка эффективности каскадной схемы кодирования на основе кодека Хэмминга и многопорогового декодера // Мат. 5-й Международной конференции «К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» – Рязань, РГРТУ. 2007. С. 184–187.
23. Овечкин Г.В. Перспективные методы помехоустойчивого кодирования для высокоскоростных спутниковых каналов связи // Мат. 5-й Международной конференции «К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» – Рязань, РГРТУ. 2007. С. 181–184.
24. Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Эффективность многопороговых декодеров при использовании многопозиционных ФМ и КАМ // 9-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Доклады-1, М.: 2007. С. 24–28.
25. Овечкин Г.В. Выбор метода коррекции ошибок для высокоскоростной линии связи // Межвуз. сб. науч. тр. «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем». Рязань, РГРТУ, 2007. С. 43–47.
26. Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В. Достижение характеристик оптимального декодирования на основе многопороговых алгоритмов- 9-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Доклады-1, Пленарный доклад, Москва, 2007, С.12–15.
27. Золотарев В.В. Обобщение алгоритма МПД на двоичные коды // «Мобильные системы», №3, 2007г, С. 39–42.

28. Золотарев В.В., Назиров Р.Р., Чулков И.В. Оптимальное декодирование в Цифровых спутниковых каналах при дистанционном зондировании Земли // «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Выпуск 4, том 1, Москва, ООО «Азбука», 2007, С. 229-235.
29. Zolotarev V.V., Averin S.V., Chulkov I.V. Optimum Decoding Characteristics Achievement on the Basis of Multithreshold Algorithms. – 9-th ISCTA'07, July, UK, Ambleside, 2007.
30. Zolotarev V.V., Averin S.V. Non-Binary Multithreshold Decoders with Almost Optimal Performance – 9-th ISCTA'07, July, UK, Ambleside, 2007.
31. Zolotarev V.V., Nazirov R.R., Chulkov I.V. The Quick Almost optimal multithreshold decoders for Noisy Gaussian Channels – RCSGSO International Conference ESA in Moscow, Russia, June, 2007.

Подпись руководителя проекта

Форма 511. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗАВЕРШЕННОГО ПРОЕКТА РФФИ В ПРИКЛАДНОЙ ОБЛАСТИ

11.1. Номер проекта
05-07-90024

11.2. Приоритетное направление развития науки и техники, в котором, по мнению исполнителей проекта, можно использовать результаты завершеного проекта РФФИ
7

11.3. Планируемая продолжительность работы
до 2 лет

11.4. Предлагаемое авторами название работы в прикладной области
Многopороговые декодеры для спутниковых, космических и иных цифровых систем связи

11.5. Ожидаемые результаты работы в прикладной области

В настоящее время весь мир переживает трудный очень дорогой в финансовом плане период перехода на полностью цифровые методы создания, обработки и передачи информации. В этих условиях именно простые методы обеспечения высокодостоверной передачи данных на основе методов помехоустойчивого кодирования могут создать огромную экономию финансовых средств при создании новейших систем и сетей связи. Большой экономический эффект от применения кодирования проявляется в том, что с уменьшением допустимого отношения сигнал/шум на передаче вследствие применения кодирования появляется возможность очень значительного роста скорости передачи, увеличения дальности связи или уменьшения размера используемых обычно очень дорогих антенн. А поскольку и дальше требования к достоверности передаваемых цифровых данных будут только расти, то важность кодирования и его экономическая необходимость будут только увеличиваться. Поэтому оценивавшаяся в 80-х годах экономическая ценность кодирования в миллионы долларов в настоящее время для широкомасштабных систем уже исчисляется десятками миллионов долларов и в дальнейшем будет только быстро увеличиваться.

К сожалению, сейчас в России создаются модемы (одним из важнейших узлов которых и являются устройства помехоустойчивого кодирования), которые обычно не могут работать при достаточно большом уровне шума в канале связи. Тем не менее, постепенно у заказчиков различных ведомств постепенно появляются средства на создание цифровых модемов высокого качества. При их весьма трудоемкой разработке особое внимание уделяется созданию самого главного узла такого модема – помехоустойчивому кодеку, – который должен обладать достаточно большим запасом прочности по наиболее важным для такого модема параметрам: производительности, энергетической эффективности, совместимости с различными системами сигналов и адаптивности к прочим параметрам систем связи. Высококачественные кодеки создают возможность для успешной передачи цифровых данных этими модемами при гораздо меньших уровнях сигнала по сравнению со случаем, когда кодирование не используется. В настоящее время для ряда современных высокоскоростных систем связи основным методом кодирования могут быть признаны развиваемые в рамках гранта многopороговые методы декодирования (МПД) помехоустойчивых кодов, характеризующиеся предельно возможными уровнями энергетического выигрыша и очень высоким быстродействием. Данные методы при

декодировании требуют в 10-100 раз меньшее число операций по сравнению с другими сопоставимыми по эффективности методами, причем эти операции могут быть полностью распараллелены при аппаратной реализации. В результате реализованные на ПЛИС МПД смогут обеспечивать декодирование со скоростью до нескольких Гбит/с. Это позволяет уже сейчас решить проблему эффективного кодирования в высокоскоростных каналах с большим уровнем шума.

Разработки алгоритмов типа МПД ведутся уже в течение 30 лет и к настоящему времени данные алгоритмы находятся в высокой степени готовности к применению в различных системах цифровой связи. Сейчас в НИИРадио и в других организациях уже создано несколько поколений успешно работающих МПД декодеров. Дополнительным подтверждением полезности многопороговых декодеров является глубокая заинтересованность многих крупных организаций («Энергия», КБ им. Лавочкина и др.) в продолжении разработок по проекту.

Выполняемые в рамках гранта работы позволили подготовить максимально благоприятные условия для реализации МПД алгоритмов, поскольку при этом разработана совокупность алгоритмов со всеми возможными основными наборами параметров, созданы демонстрационно-испытательные стенды. На них можно демонстрировать работу МПД в различных условиях. Хорошим подтверждением возможности широкого применения МПД являются и те уже завершённые, пока немногочисленные разработки МПД, которые успешно работают у заказчиков различных уровней.

Таким образом, МПД алгоритмы являются уникальными технически высокоэффективными алгоритмами, дающими огромный экономический эффект в новых и модернизируемых сетях связи, которые гораздо более эффективны и одновременно менее дороги в разработке, чем другие сопоставимые с ними по основным параметрам декодеры. Внедрение МПД в разработки систем связи ведомств всех уровней обеспечит достижение уникально высоких характеристик этих систем в самые короткие сроки и с минимальными затратами.

Именно в таких системах и следует применять многопороговые декодеры, способные работать при очень низких отношениях сигнал/шум. При этом кодирование фактически увеличивает, причем, иногда многократно (!) к.п.д. использования очень дорогих каналов связи просто за счет несколько больших вычислений при обработке сигнала без увеличения объема прочих необходимых частотных и финансовых ресурсов создаваемых сверхдорогих ныне коммуникационных систем. Это и является основанием для самого широкого внедрения исследований по кодам в технику связи во всем мире именно из-за огромной нормы прибыли по разработкам такого типа, которая может достигать в некоторых случаях десятков тысяч процентов.

11.6. Информация, связанная с интеллектуальной собственностью патент (свидетельство на полезную модель)

имеется

11.7. Завершённая к настоящему времени стадия работы результаты проекта РФФИ

Подпись руководителя проекта

Форма 523. СВЕДЕНИЯ О СОЗДАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСАХ (ИР)

23.1. *Номер проекта*
05-07-90024

23.2.1. *Руководитель проекта*
Золотарев Валерий Владимирович

23.2.2. *Руководитель проекта (на английском языке)*
Zolotarev Valery Vladimirovich

23.3.1. *Название проекта*

Разработка методов повышения достоверности передачи данных в телекоммуникационных системах

23.3.2. *Название проекта на английском языке*

The developing of methods for increasing reliability of data transmission in telecommunication systems

23.4. *Коды по классификатору РФФИ, обозначающие область применения ИР*
07-820 07-660

23.5.1. *Название ИР*

веб-сайт о многопороговом алгоритме декодирования

23.5.2. *Название ИР на английском языке*

web-site about multithreshold decoder

23.6.1. *Краткое описание ИР*

Информационный ресурс представляет собой специализированный веб-сайт на базе технических средств ИКИ РАН, который содержит большой объем информации о многопороговом алгоритме декодирования самоортогональных и других кодов. На данном веб-сайте регулярно помещаются новые статьи, демонстрационные материалы и презентации последних результатов по многопороговому декодированию. Здесь же можно найти ответы на вопросы по кодированию и объявления о предстоящих или уже состоявшихся событиях в сфере разработок алгоритмов многопорогового декодирования. Объем сайта – более 240 информационных блоков.

23.6.2. *Краткое описание ИР на английском языке*

The information resource represents the specialized website of SRI RAS, which contains great volume of the information about multithreshold decoding of self-orthogonal and some other codes. New articles, demonstration materials and presentations of last results on multithreshold decoding are located on the given website. Here it is possible to find answers to questions on coding and announcements of forthcoming or already taken place events in sphere of multithreshold decoding. The size of web-site – is more then 240 information blocks.

23.7.1. *Название организации, поддерживающей ИР*
ИКИ РАН

23.7.2. *Адрес и телефон организации-разработчика ИР*
г. Москва, ул. Профсоюзная, д.84/32, тел. (495)3334545

23.8. *Категория ресурса*
WEB-сайт

23.9. *Характеристика представления ресурса*
гипертекст

- 23.10. *Оценка объема ИР в информационных единицах*
Более 240 документов
- 23.11. *Оценка объема ИР в байтах*
150 000 000
- 23.12. *Источники формирования ИР*
экспериментальные данные, переписка с читателями, открытые публикации, научно-техническая литература, Интернет
- 23.13. *Обновляемость ИР*
ежемесячная
- 23.14. *Способ доступа к ИР*
Интернет, IE .
- 23.15. *URL для сетевого доступа к ИР*
<http://www.mtdbest.iki.rssi.ru/MTD.html>
- 23.16. *Ограничения доступа*
свободный
- 23.17. *Кодировка кириллицы*
CP1251
- 23.18. *Программные средства управления ИР*
- 23.19. *Программно-аппаратная платформа сервера*
- 23.20. *Программно-аппаратная платформа клиента IE*
- 23.21. *Дополнительные характеристики ИР*
- 23.22. *Регистрационный номер государственного регистра баз данных*

Подпись руководителя проекта

**Отзыв на результаты выполнения
проекта РФФИ по гранту №05-07-90024
«Разработка методов повышения достоверности передачи данных в
телекоммуникационных системах»**

Выражаю полную поддержку глубоких новаторских теоретических и прикладных исследований, проводимых по гранту РФФИ №05-07-90024 под руководством д.т.н. В.В.Золотарёва, ведущего научного сотрудника ИКИ РАН.

Важнейшим теоретическим результатом его исследований стала разработка принципиально новых алгоритмов обработки цифровых потоков в условиях предельно больших уровней шума в очень дорогих каналах космической и спутниковой связи. Многопороговые декодеры (МПД) в этом проекте обеспечивают в реальных системах связи существенное, иногда многократное повышение КПД цифровых каналов, что и определяет высочайшую степень экономической эффективности декодеров этого типа, поскольку всего лишь за счёт выбора математической обработки достигается тот же эффект, что и при создании нескольких новых сетей связи.

Некоторые из методов, предложенных В.В.Золотарёвым и коллективом проекта уже приняты к реализации в космических проектах.

Несомненно особым достижением сотрудников проекта стали новые алгоритмы кодирования и декодирования символьных данных. Аналогов столь высокоэффективным и одновременно очень простым МПД методам среди других алгоритмов не существует. Это позволяет считать недвоичные коды, глубоко изученные в данном проекте, очень ценными открытиями в теории кодирования, которые уже сейчас можно применить в сверхнадёжных базах данных очень большого объёма.

Заслуживает особого внимания и готовность коллектива проекта рассмотреть возможности и способы организации декодирования при теоретически самых тяжёлых шумовых характеристиках канала связи, что и указано в их заявке на грант РФФИ № 08-07-00078. Отметим, что такая труднейшая постановка задачи декодирования даже и не возникает пока в работах зарубежных специалистов.

Считаю, что поддержка заявки на новый грант со стороны РФФИ позволит руководителю проекта, несомненно, мировому лидеру в области многопороговых алгоритмов, Лауреату премии Правительства РФ по науке и технике д.т.н. В.В.Золотарёву и его коллегам по проекту упрочить своё лидерство в наукоёмких исследованиях и разработках новых средств помехоустойчивого кодирования для космических исследований и современных систем связи

Академик РАН
д.т.н., профессор,
Лауреат Ленинской и
Государственной премий СССР

В.К.Левин

**Отзыв на результаты выполнения
проекта РФФИ по гранту №05-07-90024
«Разработка методов повышения достоверности передачи данных
в телекоммуникационных системах»**

Поддерживая в течение многих лет исследования д.т.н., Лауреата премии правительства РФ по науке и технике В.В.Золотарёва считаю совершенно необходимым указать на чрезвычайную ценность проводимых им очень оригинальных разработок в сфере теории и прикладных вопросов помехоустойчивого кодирования, в том числе очень важных для науки и непосредственно для техники связи результатов, полученных им и руководимым им коллективом исследователей в рамках проекта РФФИ по гранту №05-07-90024.

Полученные коллективом исследователей по проекту № 05-07-90024 результаты в течение всего лишь трехлетних исследований по гранту РФФИ, поддержанных и руководством ИКИ РАН, выводят отечественную теорию кодирования в лице этих очень способных и несомненно перспективных исследователей в ряды наиболее успешных и авторитетных направлений мировой науки по этой сложной наукоемкой тематике.

Совершенно оправдавшая себя идеология подхода к решению главной проблемы теории помехоустойчивого кодирования – простого эффективного декодирования - как к задаче поиска глобального экстремума по возможности более просто функционала позволила достичь столь высокой реальной эффективности создаваемых этим коллективом декодеров, что при равном уровне помехоустойчивости уже разработанные им многопороговые декодеры (МПД) для двоичных данных выполняют примерно на 2 десятичных порядка меньшее число операций, чем другие алгоритмы. Столь огромная разница в сложности декодирования МПД по сравнению с другими методами является уникальной. Эти методы должны найти самое широкое применение во множестве различных систем связи по очень дорогим спутниковым и космическим каналам передачи данных.

Исследованные в рамках проекта РФФИ МПД методы для недвоичных потоков данных являются фактически открытиями в области теории помехоустойчивого кодирования, а их характеристики во многих случаях вообще недоступны ни для каких других кодов. Очень важно организовать их дальнейшее исследование и непосредственное широкое применение в различных базах данных особо высокой надёжности и сверхбольшого объёма.

Считаю важным поддержать работы этого коллектива мирового уровня исследователей согласно их новой заявке на грант РФФИ № 08-07-00078.

Член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор
Заслуженный деятель науки РФ,
Лауреат государственной премии РФ и
Премии правительства РФ

Ю.Б.Зубарев