

Форма 501. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

1.1. Номер проекта

08-07-00078

1.2. Руководитель проекта

Золотарев Валерий Владимирович

1.3. Название проекта

Разработка алгоритмов многопорогового декодирования для цифровых систем передачи, обработки и хранения данных для работы вблизи пропускной способности канала

1.4. Вид конкурса

а - Инициативные проекты

1.5. Год представления отчета

2009

1.6. Вид отчета

этап 2008 года

1.7. Аннотация

Основное внимание в первый год выполнения проекта было уделено решению вопросов более масштабной по всем переменным оптимизации кодов и параметров декодирования, позволяющих получить характеристики, как можно более близкие к предельным. При этом была предложена принципиально новая методика подбора структуры применяемых в многопороговых декодерах (МПД) самоортогональных кодов, которая позволяет за счет оптимизации веса информационных и проверочных ветвей получать коды с существенно меньшим проявлением эффекта размножения ошибок, и, соответственно, обеспечивать их близкое к оптимальному декодирование при более высоком уровне шума в канале связи. Данная методика была реализована в 2008 году в программных средствах, которые будут использоваться в течение 2009 года при построении кодов и одновременной оптимизации параметров декодеров.

Для дополнительного повышения эффективности декодирования в условиях большого шума был предложен модифицированный алгоритм многопорогового декодирования, пороговый элемент которого использует предварительную оценку ошибочности проверок.

Большое внимание в течение отчетного периода было уделено повышению эффективности недвоичного многопорогового декодера (QMПД), который используется для декодирования символьных данных. Данные декодеры могут применяться для формирования, поддержания и восстановления файлов сверхбольших спец-, аудио- и видео- баз данных. В частности был предложен алгоритм работы недвоичного порогового элемента, отличающийся от известного существенно меньшими затратами вычислительных ресурсов при декодировании. Это позволяет в несколько раз увеличить скорость работы QМПД, которая и до этого была уже достаточно высока у исходного варианта декодера, составляя 10 – 20 Мбит/с для каналов с большим уровнем шума на обычных ПК. В данный момент прорабатываются вопросы о необходимости его патентования.

Также были разработаны каскадные схемы кодирования/декодирования, состоящие из QМПД и недвоичного кода с контролем четности или недвоичного кода Хэмминга. Ранее последние схемы были неизвестны. Показано, что использование данных кодов совместно с QМПД, как и в двоичном случае, позволяет на несколько порядков уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы QМПД по сравнению с базовым QМПД при незначительном увеличении сложности реализации. В процессе исследования предложенных схем кодирования/декодирования были получены аналитические оценки их эффективности.

На основе последних достижений в области недвоичных многопороговых декодеров началась разработка принципиально новой методики для защиты файлов от искажений при их долговременном хранении. Применение данной методики позволит в десятки раз увеличить скорость кодирования и восстановления информации по сравнению с существующими аналогами. В настоящее время методика реализуется в программных средствах для защиты файлов от искажений, типичных для реальных условий применения кодирования.

В процессе выполнения проекта продолжал развиваться созданный в рамках прошлого гранта РФФИ набор программных средств для исследования эффективности современных методов коррекции ошибок, в который за год работы над проектом включены LDPC коды, рекомендованные стандартом DVB-S2, а также турбо коды стандарта DVB-S. Данные

программные средства доступны на сайте ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru .

В течение всего периода выполнения проекта развивался специализированный веб-сайт ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru , на котором представляются основные результаты разработок МПД алгоритмов.

Выполнена дополнительная масштабная задача написания и опубликования в высокоприоритетном журнале «Электросвязь» обзора по наиболее крупным достижениям в области теории кодирования и ее прикладных достижений. Другая важная большая обзорная статья по МПД алгоритмам опубликована в журнале из списка ВАК «Цифровая обработка сигналов». В обоих случаях публикации осуществлены при непосредственном участии и поддержке члена-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева.

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

08-07-00078

2.2. Руководитель проекта

Zolotarev Valery Vladimirovich

2.3. Название проекта

Development of multithreshold decoders for digital systems of data transmission, processing and storage and storage for work near channel capacity

2.4. Год представления отчета

2009

2.5. Вид отчета

этап 2008 года

2.6. Аннотация

The main attention in the first year of the project has been given the optimization of codes and decoding parameters. It allows to receive the performance closer to the capacity. Essentially new technique for selection of structure of self-orthogonal codes applied in the multithreshold decoders has been offered. The technique performs optimization of information and checking branches weight of codes. It allows to construct codes with essentially smaller the errors propagation effect and to provide their near optimal decoding at higher noise level. The given technique has been implemented in software during 2008 year. The software will be used in 2009 year for searching of codes with best performance.

For additional increasing efficiency of decoder at high noise level a modified algorithm of the multithreshold decoding has been offered. The threshold element of the offered algorithm uses tentative estimation of inaccuracy of checks.

The big attention has been given to increasing efficiency of the non-binary multithreshold decoder (QMTD) which is used for decoding of symbolical data. The given decoder can be applied to formation, maintenance and restoration of files for superbig audio- and video- databases. In particular an algorithm for the non-binary threshold element differing from known for essentially smaller complexity has been offered. It allows to accelerate work of QMTD in several times.

Also concatenated schemes of coding/decoding consisting of QMTD and non-binary parity-check codes or non-binary modified Hamming codes have been developed. These schemes were unknown before. Use of the given codes together with QMTD, as well as in a binary case, allows to reduce in several times the symbol error rate after decoding in the field of effective work of QMTD in comparison with base QMTD at insignificant growing of implementation complexity. In the course of analysis of the offered schemes of coding/decoding analytical estimations of their efficiency have been done.

On the basis of last achievements in the field of non-binary multithreshold decoders a technique for protection of files against distortions has began developed. The given technique will allow to increase in tens times speed of coding and restoration of information in comparison with existing analogues. Now the technique is realized in software for protection of files against distortions in typical conditions of decoders using.

For the last year set of software for research of efficiency of modern methods for error correction continued to develop. Software for simulation of the LDPC codes recommended by DVB-S2 standard and the turbo codes recommended by DVB-S standard was developed.

During all period of the project specialized web site www.mtdbest.iki.rssi.ru is developed. The basic results of workings out of MTD algorithms are presented in it.

Two surveys on coding theory and its applications were published in main magazines on communications.

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*

08-07-00078

3.2. *Название проекта*

Разработка алгоритмов многопорогового декодирования для цифровых систем передачи, обработки и хранения данных для работы вблизи пропускной способности канала

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

07-660 07-820

3.4. *Объявленные ранее (в исходной заявке) цели проекта на 2008 год*

К концу 2008 года должны быть проведены исследования, направленные на изучение особенностей работы МПД в наиболее трудных режимах: при максимально возможном уровне шума канала и при наличии пакетной компоненты в потоке ошибок гауссовского канала. На основании данных исследований будут выбраны параметры схем кодирования и многопорогового декодирования, которые позволят им эффективно работать вблизи пропускной способности канала.

Исследования и разработки МПД для области шумов, соответствующих непосредственной близости к пропускной способности канала, позволят достичь новых важных рубежей в области высокоэффективного использования дорогих спутниковых и космических каналов связи и создадут условия для разработки более совершенных алгоритмов, которые смогут обеспечивать эффективную обработку цифровых потоков данных в условиях очень большого уровня шума.

Также в 2008 году начнется разработка каскадных схем коррекции ошибок, применение которых позволит получить дополнительный энергетический выигрыш при очень малой сложности реализации.

3.5. *Степень выполнения поставленных в проекте задач*

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

– исследовано поведение МПД при большом уровне шума. В результате проведенного исследования была предложена новая методика по выбору наиболее подходящих для данных условий кодов, обладающих большей устойчивостью к размножению ошибок, и параметров декодирования;

– с использованием предложенной методики были выбраны коды и параметры декодирования, которые позволяют МПД эффективно работать достаточно близко к пропускной способности канала;

– разработаны каскадные схемы кодирования/декодирования, основанные на недвоичном многопороговом декодере;

– предложен алгоритм работы порогового элемента недвоичного многопорогового декодера, позволяющий в несколько раз повысить быстродействие МПД при сохранении такой же высокой эффективности декодирования.

Таким образом, запланированные работы первого года проекта выполнены полностью.

Кроме этого началось решение некоторых задач, запланированных на второй год выполнения проекта, в частности началась разработка методики применения недвоичных многопороговых декодеров для защиты файлов сверхбольших спец-, аудио- и видео- баз данных от искажений.

3.6. *Полученные за отчетный период важнейшие результаты*

1. Предложена принципиально новая методика подбора структуры применяемых в многопороговых декодерах (МПД) самоортогональных кодов, которая позволяет за счет оптимизации веса информационных и проверочных ветвей получать коды с существенно меньшим проявлением эффекта размножения ошибок, и, соответственно, обеспечивать их близкое к оптимальному декодирование при более высоком уровне шума в канале связи. Данная методика была реализована в программных средствах.

В процессе ранее проведенных работ по исследованию и повышению эффективности МПД были предложены так называемые самоортогональные коды (СОК) с параллельным каскадированием, которые обеспечивают большую эффективность декодирования по сравнению с обычными СОК. В основе построения данных кодов лежит выделение в базовом СОК C_0 с кодовым расстоянием d_0 и кодовой скоростью r_0 некоторого составляющего кода C_1 с кодовой

скоростью $r_1 > r_0$, тоже являющегося СОК. Кодовое расстояние d_1 выделенного кода выбирается значительно меньшим d_0 , и, следовательно, область его эффективной работы будет ближе к границе Шеннона. При декодировании параллельного кода сначала выполняются несколько итераций декодирования составляющего кода C_1 , позволяющие примерно на порядок снизить вероятность ошибки в принятой из канала информационной последовательности, после чего в процесс декодирования включается оставшаяся часть кода C_0 . Отличительной особенностью данной схемы кодирования является то, что здесь внешний код работает с кодовой скоростью r_0 , в то время как в обычных каскадных кодах кодовая скорость внешнего кода близка к единице и его эффективность весьма мала. Данное свойство обеспечивает существенное преимущество МПД перед другими каскадными конструкциями.

Пример структуры кода для схемы параллельного кодирования приведен на рис. 1. Строки таблицы соответствуют проверочным ветвям, столбцы – информационным ветвям, а в каждой ячейке с индексами i и j таблицы указано количество элементов информационной ветви j , которое участвует в формировании каждого символа проверочной ветви i . В данном примере используется 8 информационных и 8 проверочных ветвей. В процессе декодирования кода на первых итерациях используются только 7 проверочных ветвей. Проверки в этих ветвях имеют малую размерность и поэтому декодер такого “уменьшенного” кода хорошо работает при больших вероятностях ошибки в канале. Когда вероятность ошибки декодирования в информационных ветвях будет невысокой (порядка 10^{-3}), включается и последняя проверочная ветвь с большой размерностью проверок. С помощью этой ветви исправляются оставшиеся ошибки в информационных ветвях, и вероятность ошибки на выходе декодера снижается еще на несколько порядков.

1	1	1	1	1	1	1	1	8
1	1	1	1	1	1	1	1	8
1	1	1	1	1	1	1	1	8
1	1	1	1	1	1	1	1	8
1	1	1	1	1	1	1	1	8
1	1	1	1	1	1	1	1	8
1	1	1	1	1	1	1	1	8
9	9	9	9	9	9	9	9	72
16	16	16	16	16	16	16	16	

Рис. 1. Структура параллельного кода

Было показано, что интуитивный выбор размерностей проверок для каждой информационной и проверочной ветви при построении СОК для схем параллельного кодирования является чрезвычайно трудоемкой задачей. Для того чтобы автоматизировать этот процесс, можно перебирать все возможные варианты кодов с различными размерностями проверок, и при заданной вероятности ошибки в канале выбирать тот, декодер которого оставляет после себя наименьший процент ошибок. Алгоритм выбора наиболее эффективного СОК будет состоять в следующем:

1. Задается самоортогональный код с nk информационными ветвями и nr проверочными ветвями. Для каждой пары информационная–проверочная ветвь устанавливается количество проверок и позиции этих проверок. Также для каждой пары задается минимальная и максимальная размерность проверок, которая может быть в результирующем коде. Инициализируем минимум вероятности ошибки на бит на выходе декодера $P_{min}=1$.

2. По всем парам ветвей организуется серия вложенных циклов, параметр каждого из которых будет определять текущую размерность проверок для соответствующей пары ветвей. Этот параметр будет изменяться от минимальной до максимальной размерностей проверок, определенный в пункте 1.

3. В теле самого внутреннего цикла происходит модификация первоначального кода в соответствии с текущими значениями размерностей проверок для каждой пары ветвей.

4. Путем применения имитационного моделирования вычисляется вероятность ошибки P_{err} на выходе многопорогового декодера для полученного самоортогонального кода.

5. Если $P_{err} < P_{min}$, то запоминаем текущий СОК и меняем минимальную вероятность ошибки $P_{min} = P_{err}$.

6. Осуществляется переход к следующему СОК в пункте 2.

При выполнении данного алгоритма выполняется полный перебор всех возможных сочетаний размерностей проверок, что также представляется вычислительно сложным. Поэтому для поиска наилучшего сочетания размерностей проверок в данный алгоритм были внесены элементы оптимизационного алгоритма релаксации.

Пример кода для схемы параллельного кодирования, полученного с помощью программы подбора наилучшего варианта кода, приведен на рис. 2. При использовании данного кода достигаются лучшие результаты декодирования, среди всех СОК с кодовой скоростью $R=1/2$ и минимальным кодовым расстоянием $d=17$.

2	2	1	1	1	0	0	0	7
2	2	1	0	1	1	0	0	7
1	2	2	0	1	1	1	0	8
1	2	2	0	1	1	1	1	9
2	1	2	1	0	1	1	1	9
2	1	2	1	0	0	1	1	8
2	2	2	1	0	0	0	1	8
4	4	4	12	12	12	12	12	72

16	16	16	16	16	16	16	16
----	----	----	----	----	----	----	----

Рис. 2. Структура параллельного кода, при которой достигаются лучшие результаты декодирования

На рис. 3 приведены результаты моделирования декодера найденного СОК. Видно, что данный СОК обладает лучшими характеристиками и позволяет сдвинуться на 0.3 дБ и более в область больших шумов. Вероятность ошибки на бит на выходе декодера такого СОК достигает 10^{-8} при отношении сигнал-шум в канале 3 дБ.

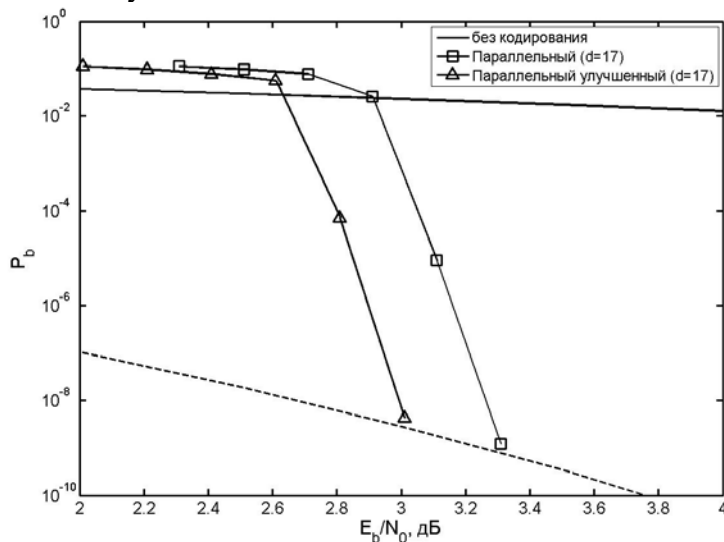


Рис. 3. Результаты моделирования улучшенного параллельного кода на базе МПД в канале с АБГШ

Этот новый подход к единому проектированию кодов и алгоритма декодирования позволит и при дальнейшем выполнении проекта решить задачу более эффективного декодирования. Но для ее успешного решения нужно существенно увеличить объемы работ по совместной оптимизации кодов и алгоритмов.

2. Предложен модифицированный алгоритм многопорогового декодирования, пороговый элемент которого использует предварительную оценку ошибочности проверок. Использование данного алгоритма позволяет дополнительно повысить эффективность декодирования в условиях большого шума.

Основной шаг декодирования МПД заключается в том, что для произвольно взятого символа u_j вычисляется функция правдоподобия L_j , зависящая от относящихся к нему проверок S_{j_k} и j -го элемента разностного регистра \bar{D} :

$$L_j = \sum_{\{j_k\}} S_{j_k} + d_j. \quad (1)$$

Причем в данном выражении часть проверок S_{j_k} может быть искажена из-за ошибок в других информационных символах. Поэтому для повышения эффективности декодирования можно предварительно получить более точные значения проверок и использовать их в выражении (1).

Каждая проверка S_{j_k} из множества $\{S_{j_k}\}$ равна:

$$S_{j_k} = \sum_{\{u_i\}} e_{u_i} + e_{v_{j_k}}, \quad (2)$$

где e_{u_i} – все ошибки в информационных битах, от которых зависит значение проверки S_{j_k} ; $e_{v_{j_k}}$ – ошибка в соответствующем проверочном бите, полученная из канала.

Проверка S_{j_k} , исходя из выражения (2), может быть изменена при декодировании информационных битов e_{u_i} в соответствии с выражением (1).

Предлагаемый алгоритм повышения эффективности заключается в следующем. При декодировании произвольно взятого информационного бита u_j в выражении (1) необходимо использовать уточненные значения битов S_{j_k} . Для этого по выражению (2) для каждого бита S_{j_k} необходимо вычислить значения соответствующих выражению (1) функций правдоподобия L_i , при этом исключив проверку, соответствующую декодируемому информационному символу. Уточненное значение проверок S_{j_k} будет равно:

$$\hat{S}_{j_k} = \begin{cases} S_{j_k}, & \text{если } \text{count}(L_i > T) - \text{четное} \\ \bar{S}_{j_k}, & \text{если } \text{count}(L_i > T) - \text{нечетное} \end{cases} \quad (3)$$

где $\text{count}(L_i > T)$ – функция, определяющая число раз выполнения условия $L_i > T$.

В заключение, для декодирования информационного бита u_j необходимо определить новое значение функции правдоподобия по формуле:

$$L_j = \sum_{\{j_k\}} \hat{S}_{j_k} + d_j \quad (4)$$

где значения проверок \hat{S}_{j_k} вычислены по формуле (3).

Были разработаны программные средства, которые моделируют работу алгоритма повышения эффективности работы многопорогового алгоритма декодирования за счет предварительной оценки ошибочности проверок.

На рис. 4 представлены характеристики предложенной модификации многопорогового декодера для кодов с различными кодовыми расстояниями d при кодовой скорости $R=1/2$. Результаты моделирования свидетельствуют о дополнительном продвижении на несколько десятых децибел (0.2-0.3 дБ) границы области эффективной работы многопорогового декодера по вероятности ошибки на бит в сторону увеличения шума до средних отношений E_b/N_0 .

Данный алгоритм, а также другие ранее полученные достижения в области многопорогового декодирования, легли в основу защищенной в 2008 г. диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Диссертация защищена в Рязанском государственном радиотехническом университете. Автор работы Дмитриева Т.А., название работы «Разработка и исследование алгоритмов помехоустойчивого кодирования на основе многопороговых декодеров для телекоммуникационных систем», руководитель Золотарев В.В.

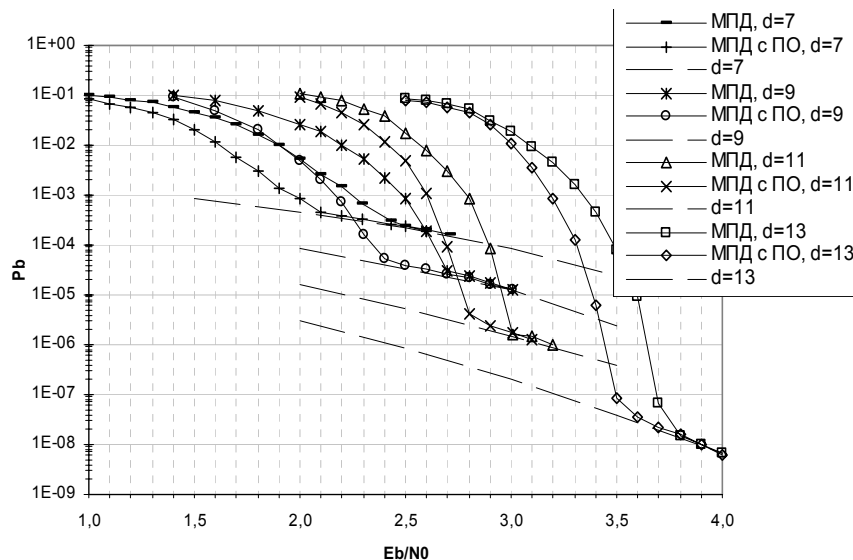


Рис. 4. Характеристики МПД с предварительной оценкой ошибочности проверок для различных кодовых расстояний d и кодовой скорости $1/2$

3. Предложен алгоритм работы недвоичного порогового элемента, отличающийся от известного существенно меньшими затратами вычислительных ресурсов при декодировании при сохранении такой же эффективности декодирования. Это позволяет в ряде случаев в несколько раз ускорить работу QМПД.

Известно, что схема недвоичного многопорогового декодера (QМПД) состоит только из регистров сдвига, сумматоров, вычитателей по модулю q и недвоичного порогового элемента. Среди этих элементов декодера наибольшую сложность имеет недвоичный пороговый элемент (qПЭ). Поэтому для того, чтобы ускорить QМПД необходимо ускорить работу qПЭ. В процессе исследования работы QМПД было замечено, что часто на соседних итерациях для одного информационного символа не меняется информация, поступающая на пороговый элемент. Поэтому было решено ввести в схему QМПД дополнительный регистр, элементы которого показывают, нужно ли заново обрабатывать информацию, поступающую на пороговый элемент с синдромного и разностного регистров. Схема модифицированного QМПД показана на рис. 5. На рисунке линиями одного цвета показано, на работу qПЭ для каких информационных символов влияет изменение соответствующего элемента синдромного регистра. Каждый элемент регистра признаков пересчета может содержать всего два значения: 0 или 1, на первой итерации декодирования регистр признаков пересчета заполняется единицами.

Теперь процедура декодирования принятого сообщения состоит в следующем:

1. Произвольно выбирается q -ичный декодируемый информационный символ u_j принятого сообщения.

2. Если элемент регистра признаков пересчета, соответствующий информационному символу u_j , равен 1, то для декодируемого информационного символа подсчитывается число двух наиболее часто встречающихся значений проверок из общего числа всех проверок, относящихся к символу u_j , а также символа d_j разностного регистра, соответствующего символу u_j . Пусть значения этих двух проверок равны b_1 и b_2 , а их количество равно m_1 и m_2 соответственно, причем $m_1 > m_2$.

3. Если элемент регистра признаков пересчета, соответствующий информационному символу u_j , равен 0, то значение разности $m_1 - m_2$ для четвертого и пятого шагов устанавливается равным значению текущего элемента порогового регистра, а значение b_1 – значению текущего элемента регистра коррекций.

4. Если $m_1 - m_2 \leq T$, где $T=0, 1, 2, \dots$ – целое неотрицательное число, то устанавливается в 0 значение элемента регистра признаков пересчета, соответствующего информационному символу u_j , в текущий элемент порогового регистра заносится разность $m_1 - m_2$, в текущий элемент регистра коррекций – значение b_1 и осуществляется переход к новому произвольному u_m , $m \neq j$, и далее переход к п.2.

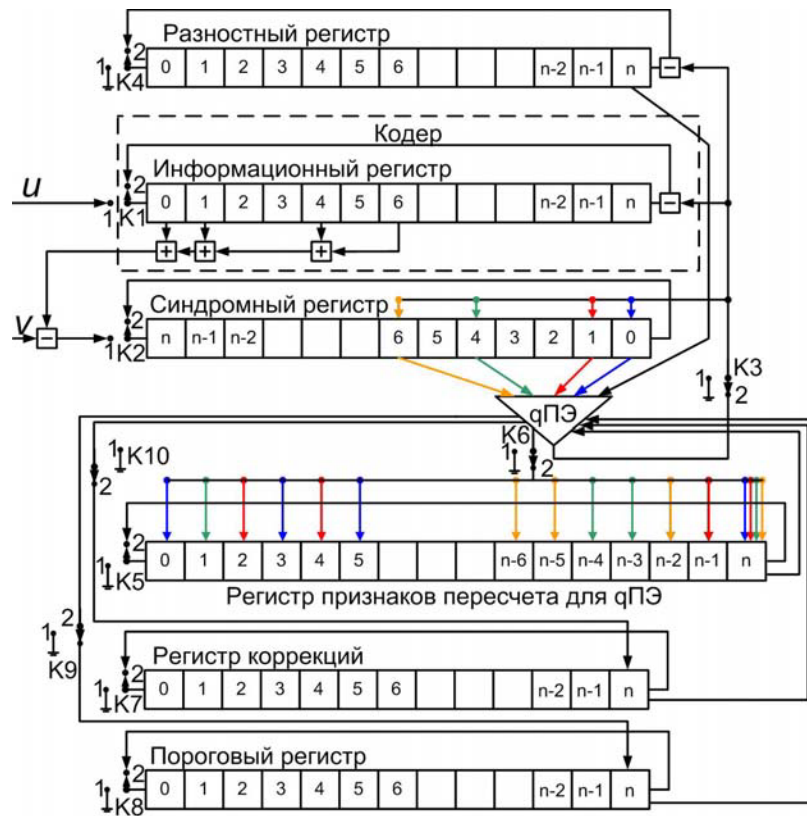


Рис. 5. Модифицированный QMPC блочного недвоичного СОК с $R=1/2$, $d=5$

5. Если $m_1 - m_2 > T$, то из u_j , d_j , и всех проверок относительно u_j вычитается оценка ошибки, равная b_1 . Также устанавливаются в 1 все элементы регистра признаков, соответствующие информационные символы которых участвовали в формировании измененных символов синдромного регистра, затем происходит выбор нового произвольного u_m , $m \neq j$, и далее переход к п.2.

В п.5 всего потребуется $(d-1) \cdot (d-2) + 1$ изменений элементов регистра признаков пересчета в случае коррекции каждого информационного символа. Данную модификацию QMPC в некоторых случаях следует применять после нескольких обычных итераций декодирования. В результате применения модифицированного алгоритма работы недвоичного порогового элемента быстродействие QMPC увеличивается в 1.5 – 3 и более раз в зависимости от уровня шума и параметров кодека. Подчеркнем, что корректирующая способность декодера при этом не изменяется.

4. Разработаны каскадные схемы кодирования/декодирования, состоящие из QMPC и недвоичного кода с контролем четности или недвоичного кода Хэмминга. Показано, что использование данных кодов совместно с QMPC, как и в двоичном случае, позволяет на несколько порядков уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы QMPC по сравнению с базовым QMPC при незначительном увеличении сложности реализации. **В процессе исследования предложенных схем кодирования/декодирования получены аналитические оценки их эффективности.**

Одним из способов улучшения характеристик QMPC является его использование в каскадных схемах кодирования. Наиболее простой и эффективной каскадной схемой кодирования является каскадная схема на основе недвоичного СОК и кода контроля по модулю q . Известно, что в области своей эффективной работы QMPC после себя оставляет в основном редкие одиночные ошибки. Задача исправления этих одиночных ошибок легко решается с помощью кодов контроля по модулю q .

Кратко опишем принцип работы этой каскадной схемы. Процесс кодирования кодером каскадного кода на основе недвоичного СОК и кода контроля по модулю q заключается в следующем. Сначала каждая последовательность из $n-1$ символов дополняется таким n -м символом, что сумма символов последовательности из n элементов по модулю q станет равной 0. Далее эта новая последовательность из n элементов кодируется кодером недвоичного СОК. При этом можно сформировать не один, а несколько подблоков контроля по модулю q , которые

вместе образуют информационный блок для QМПД, кодируемый кодером недвоичного СОК. Процесс декодирования принятого из канала сообщения производится в обратном порядке, то есть сначала выполняется недвоичное многопороговое декодирование, после которого при малом уровне шума в канале остаются в основном одиночные ошибки. Работа декодера кода контроля по модулю q заключается в следующем. Сначала вычисляется сумма e по модулю q символов для каждого подблока из n элементов. Если эта сумма e не равна 0, то в данном подблоке ищется такой символ inf , у которого среди наиболее часто встречающихся проверок недвоичного самоортогонального кода есть символ со значением e , который встречается m_1 раз, а остальные символы встречаются не более m_1 раз. Этот символ inf и изменяется на величину e .

На рис. 6 показана эффективность использования в q -ичном симметричном канале каскадной схемы кодирования, состоящей из недвоичного СОК и кода контроля по модулю q . Во внутреннем каскаде использовался недвоичный СОК с минимальным кодовым расстоянием $d=9$, кодовой скоростью $R=1/2$. Совместно с ним во внешнем каскаде использовался код контроля по модулю q с длинами $L=100$ и $L=20$. При декодировании недвоичного СОК было использовано 20 итераций декодирования. Также на рисунке приведены полученные нижние оценки эффективности работы данных каскадных схем в q СК. Отметим, что использование декодера кода контроля по модулю q с длиной блока $L=100$ после QМПД позволяет снизить вероятность ошибки декодирования более чем на два порядка, а применение декодера кода контроля по модулю q с длиной блока $L=20$ позволяет снизить вероятность ошибки более чем на три порядка за счет введения большей избыточности. Увеличение объема вычислений в каскадном коде составляет менее 20% по сравнению с исходным алгоритмом QМПД.

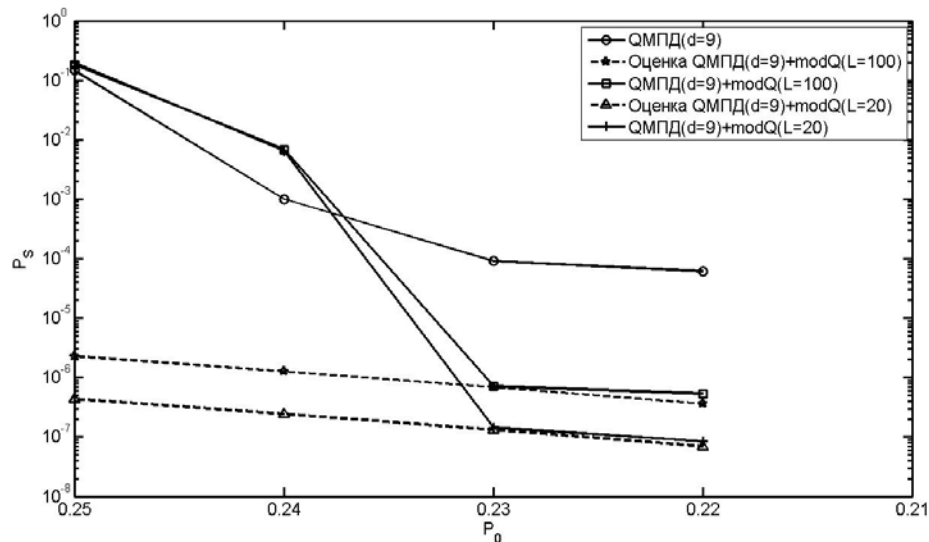


Рис. 6. Эффективность использования каскадной схемы кодирования, состоящей из недвоичного СОК и кода контроля по модулю q

Также были разработаны и исследованы каскадные схемы кодирования, состоящие из недвоичного СОК и модифицированного недвоичного кода Хэмминга и из недвоичного СОК и модифицированного недвоичного расширенного кода Хэмминга.

Для предварительной оценки эффективности предложенных каскадных схем кодирования получены нижние оценки вероятности ошибки декодирования при работе в q -ичном симметричном канале, представленные на рис. 7 для недвоичных многопороговых декодеров с кодовой скоростью $R=1/2$, минимальными кодовыми расстояниями $d=9$ и $d=15$, основанием недвоичного кода $q=256$ и кодов Хэмминга длиной 127 символов. Для расширенного кода Хэмминга использовалась длина кода 128 символов. Из данных оценок следует, что применение схемы на основе МПД и недвоичного кода Хэмминга позволит уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы QМПД на три и более порядков для СОК с $d=9$ и на пять и более порядков для СОК с $d=15$. А применение схемы на основе МПД и недвоичного расширенного кода Хэмминга позволит уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы QМПД на пять и более порядков для СОК с $d=9$ и на семь и более порядков для СОК с $d=15$.

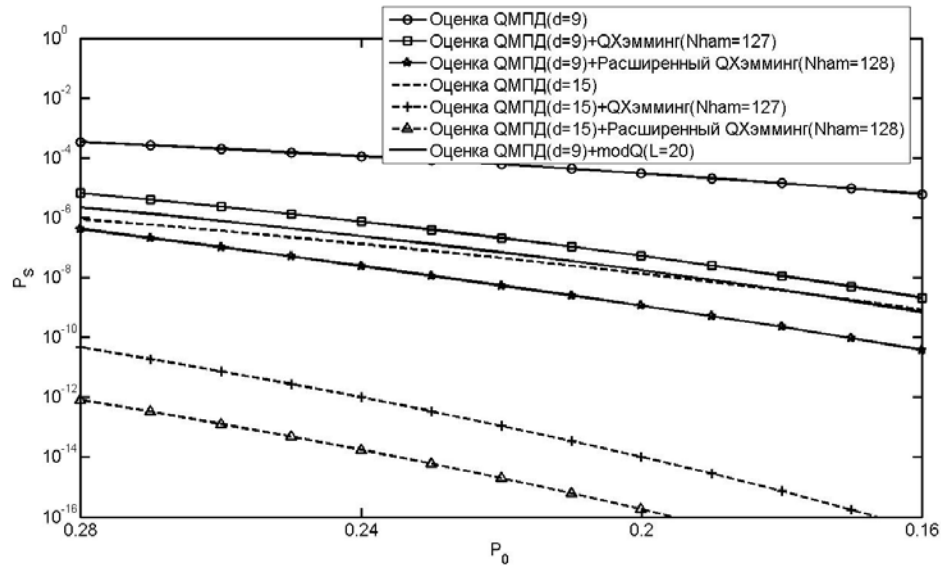


Рис.7. Оценка вероятности ошибки на выходе каскадной схемы, состоящей из QМПД и декодера обычных и расширенных кодов Хэмминга

На рис. 8 показаны экспериментальные характеристики каскадных кодов, состоящих из недвоичных СОК с минимальным кодовым расстоянием $d=9$ и недвоичных кодов Хэмминга с длиной блока $N_{ham} = 127$ для обычного кода Хэмминга и длиной блока $N_{exham} = 128$ для расширенного кода Хэмминга. Экспериментальная оценка эффективности каскадных схем кодирования проводилась для q -ичного симметричного канала и выполнялась при помощи разработанных программных средств. Анализ зависимостей показывает, что применение совместно с недвоичным многопороговым декодером в области его эффективной работы декодера недвоичного кода Хэмминга позволяет снизить вероятность ошибки на выходе каскадной схемы на три и более порядков. При переходе от обычного недвоичного кода Хэмминга к расширенному недвоичному коду Хэмминга можно снизить вероятность ошибки еще более чем на один порядок, причем сложность итоговой каскадной схемы при этом изменится незначительно. Также отметим, что полученные оценки, представленные на рисунке пунктиром, оказываются достаточно точными для предварительного оценивания характеристик каскадных схем кодирования.

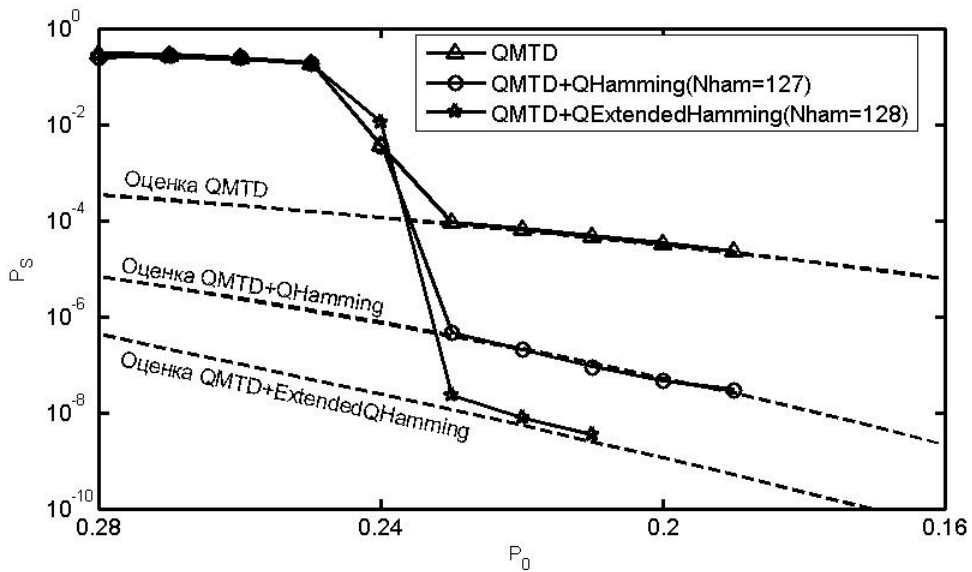


Рис. 8. Экспериментальная оценка эффективности использования каскадной схемы кодирования, состоящей из недвоичного СОК и недвоичных кодов Хэмминга

5. На основе последних достижений в области недвоичных многопороговых декодеров началась разработка методики для защиты файлов от искажений. Применение данной методики позволит в десятки раз увеличить скорость кодирования и восстановления информации по сравнению с существующими аналогами.

Ни одно современное устройство для хранения информации не может работать без использования схем коррекции ошибок. Среди таких устройств винчестеры, оперативная память, CD, DVD, Blu-ray, HD-DVD и т.д. В большинстве своем данные устройства для защиты информации используют коды Рида-Соломона в том или ином сочетании. Иногда возможностей встроенных в устройства хранения схем коррекций ошибок бывает недостаточно (например, если на оптическом диске хранится особо важная информация). В этом случае приходят на помощь специальные программы, основанные на кодах Рида-Соломона и кодировании/декодировании с использованием матриц Вандермонда, которые для файла или набора файлов создают дополнительный файл, используя который, можно восстановить исходную информацию, даже если она была искажена.

Этот метод кодирования/декодирования ориентирован не на символ информации, а на блок, состоящий из нескольких символов. В процессе кодирования файл, который необходимо защитить от искажений, возникающих при хранении или его передачи по каналам связи, разбивается на n блоков одинакового размера, каждый из которых имеет длину k символов. При введении избыточности в m блоков, применение алгоритма позволяет восстановить любые m поврежденных блоков среди информационных и проверочных блоков. Если количество поврежденных блоков больше m , то восстановление искаженной информации невозможно. При этом вычислительная сложность алгоритма пропорциональна n^3 операций сложения и умножения в полях Галуа $GF(q)$.

Все известные программы на основе матриц Вандермонда работают сравнительно быстро только при разбиении исходных файлов на достаточно большие блоки. Такое разбиение на большие блоки зачастую приводит к невозможности восстановления информации, так как блок считается потерянным, даже если в нем произошла только одна битовая ошибка. А уже при разбиении исходной информации на 1000 блоков, создание проверочного файла и восстановление исходного файла размером 700 мегабайт занимает часы работы на компьютере с хорошими характеристиками. Кроме того, данными программами в основном пользуются, когда создают копии важной информации на оптических дисках. Как известно, на CD диске дорожка делает более 15 тысяч витков. Каждый блок данных (для программ на основе кодирования/декодирования с матрицей Вандермонда) будет занимать несколько витков дорожки, поэтому при возникновении неисправимой приводом царапины проходящей по радиусу диска все блоки будут ошибочны и восстановление будет невозможно.

Другим декодером, который может быть использован для защиты информации в системах хранения, является недвоичный многопороговый декодер (QMПД). Этот декодер является недвоичным и поэтому чрезвычайно эффективен для исправления пакетов ошибок. Кроме того, данный декодер очень простой, что позволяет ему декодировать информацию со скоростью более 1 Гбит/с. QМПД обладают свойством сходимости к решению оптимального декодера при сохранении линейной от длины кода сложности реализации, которая свойственна только пороговым процедурам. При существенном увеличении объема защищаемой информации для QМПД время ее обработки растет линейно от длины исходных файлов. Сейчас это очень актуально, так как появляются новые носители информации большого объема (например, Blu-ray, HD-DVD). Исследование недвоичных самоортогональных кодов, декодируемых QМПД, показало, что они превосходят коды Рида-Соломона по эффективности, имея при этом меньшую вычислительную сложность декодирования. Следует отметить, что для QМПД не существует ограничений на размер символа, и он одинаково быстро может производить действия как над однобайтовыми символами, так и над двух и даже восьми байтовыми символами. При этом символьная скорость декодирования практически не изменяется, а битовая существенно возрастает. В отличие от других методов кодирования/декодирования недвоичных кодов QМПД производит действия не в полях Галуа, а просто над целыми числами по некоторому модулю q . Поэтому для защиты файлов от искажений предлагается использовать алгоритм QМПД.

Результаты предварительного исследования показывают, что использование QМПД для защиты файлов позволит повысить скорость кодирования/восстановления информации примерно **в десятки раз** по сравнению с известными аналогами. Также QМПД одинаково

эффективно будет исправлять как независимые ошибки так и пакеты ошибок. Этого нельзя сказать о методах коррекции ошибок, используемых для защиты файлов в существующих на рынке ПО программах, которые эффективно исправляют пакеты ошибок, но не справляются даже с малым процентом независимых ошибок.

6. В процессе выполнения проекта продолжал развиваться набор программных средств для исследования эффективности современных методов коррекции ошибок, в который за последний год включены LDPC коды, рекомендованные стандартом DVB-S2, а также турбо коды стандарта DVB-S.

Сейчас набор программных средств позволяет исследовать такие коды и алгоритмы декодирования, как:

- коды Хэмминга;
- сверточные коды, декодируемые с помощью алгоритма Витерби;
- коды Рида-Соломона;
- турбо коды, рекомендованные стандартом DVB-S;
- низкоплотностные коды, рекомендованные стандартом DVB-S2;
- несистематические коды для кодирования и защиты данных;
- многопороговые декодера самоортогональных кодов и различные их модификации.

Исследование всех перечисленных методов коррекции ошибок возможно в канале с гауссовским шумом при использовании как двоичной, так и многопозиционной модуляции (MPSK, QAM).

7. В течение всего периода выполнения проекта развивался специализированный веб-сайт ИКИ РАН www.mtdbest.iki.rssi.ru, на котором представляются основные результаты разработок МПД алгоритмов.

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 **300 (!!!)** 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 всех известных нам крупнейших научных и коммуникационных организаций России, занимающихся аналогичными научно-технологическими проблемами.

3.7. *Степень новизны полученных результатов*

В рамках проекта РФФИ в 2008 году получены новые научные результаты по разработке методов поиска самоортогональных кодов, обеспечивающих наилучшую эффективность при близком к предельном уровне шума в канале связи.

Научной новизной также обладает модифицированный алгоритм многопорогового декодирования, пороговый элемент которого использует предварительную оценку ошибочности проверок. Использование данного алгоритма позволяет на несколько десятых децибел приблизиться к пропускной способности канала.

За текущий год работы над проектом разработаны новые каскадные схемы кодирования/декодирования, в которых в качестве составляющих элементов используются не двоичные многопороговые декодеры, не двоичные коды с контролем по модулю q и не двоичные коды Хэмминга. Получены новые аналитические оценки эффективности данных каскадных схем. Показано, что использование предложенных каскадных схем кодирования/декодирования позволяет уменьшить вероятность ошибки декодирования на 7 десятичных порядков и даже более!

3.8. *Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем*

В настоящее время в теории кодирования известно всего несколько методов коррекции ошибок, обеспечивающих работу вблизи пропускной способности канала. Наиболее широкое практическое применение в реальных системах связи нашли сверточные коды, для декодирования которых часто используется оптимальный алгоритм Витерби (кривая «АВ, $K=7$ » на рис. 10), и различные каскадные коды, например, каскадные коды, состоящие из кода Рида-

Соломона и сверточного кода (кривая «АВ+РС» на рис. 10). В последнее время зарубежными специалистами активно развиваются турбо и низкоплотностные коды, эффективность которых очень высока. Например, самые мощные методы декодирования турбо кодов длиной в несколько десятков тысяч битов позволяют работать примерно в 0,5 дБ от пропускной способности канала (кривая «Турбо» на рис. 10). А с помощью низкоплотностных кодов длиной в несколько миллионов битов можно обеспечить сколь угодно малую вероятность ошибки декодирования при работе менее чем в 0,1 дБ от пропускной способности гауссовского канала (кривая «Низкоплотностные» на рисунке). К сожалению, данные методы при работе в условиях большого шума все еще обладают весьма большой сложностью реализации, что затрудняет их практическое применение в высокоскоростных системах передачи данных. Развиваемые в данной работе многопороговые декодеры позволяют почти оптимально декодировать даже очень длинные коды с линейной от длины кода сложностью исполнения, получая при этом энергетический выигрыш более 9 дБ. При этом МПД выполняют только простейшие операции сложения и сравнения целых чисел, что делает их очень привлекательными для применения в существующих и вновь создаваемых высокоскоростных цифровых системах передачи данных.

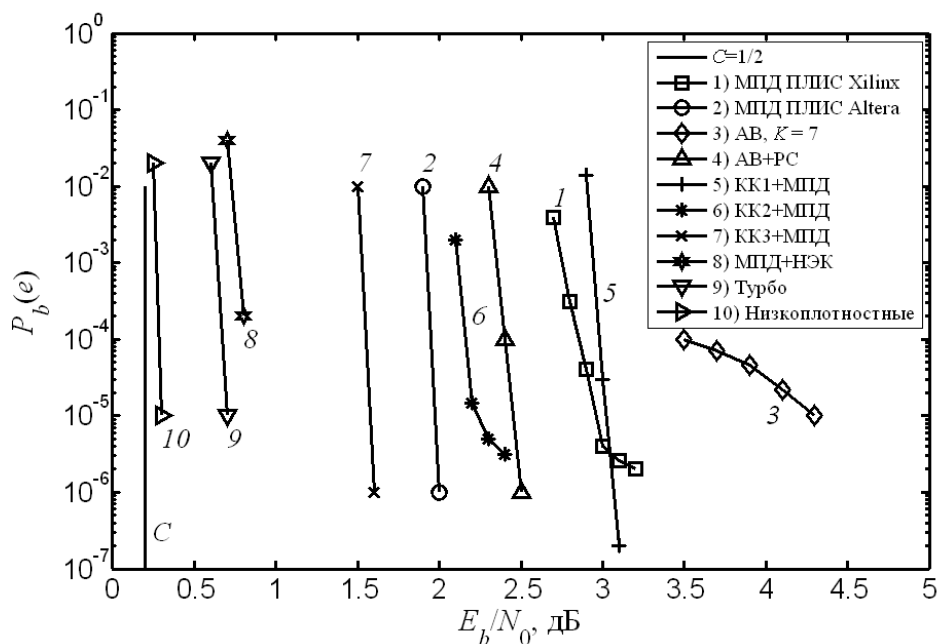


Рис. 10. Эффективность современных методов коррекции ошибок в канале с аддитивным белым гауссовским шумом при использовании двоичной фазовой модуляции

Характеристики декодеров типа МПД для кодовой скорости $R \sim 1/2$ представлены на рис. 10. Кривая «МПД ПЛИС Xilinx» относится к разработке сверточного МПД на ПЛИС Xilinx на скорости от 80 до 480 Мбит/с с полным распараллеливанием операций. Каскадная схема с использованием того же кода и кода контроля по четности (ККЧ) обеспечивает характеристики, показанные на графике «КК1+МПД». Они достаточно мало отличаются от возможностей стандартной и весьма эффективной каскадной схемы декодирования с алгоритмом декодирования Витерби (кривая «АВ, K=7») и декодером кода Рида-Соломона (РС) (график «АВ+РС»), но оказываются значительно проще, поскольку при использовании каскадирования с МПД наличие второго кода типа ККЧ добавляет всего 2 операции на каждый бит данных по сравнению с обычным МПД. Это не идет ни в какое сравнение со сложностью дополнительного декодера для кода РС. При этом каскадный МПД легко реализовать, как и обычный МПД декодер, для скоростей порядка 500 Мбит/с и даже выше.

Кривая «КК2+МПД» на рис. 10 соответствует МПД декодеру с объемом памяти ПЛИС, увеличенным по сравнению с первым примером в 1,4 раза, который каскадируется с таким же ККЧ. Эта простая схема также с очень высоким потенциальным быстродействием уже существенно эффективнее каскадной схемы АВ+РС как по энергетике, так и по скорости передачи. Более того, поскольку уровень остаточных ошибок у этого каскадного МПД очень невелик, то добавление любого самого простого малоизбыточного кода в качестве внешнего каскада в эту схему приведет к абсолютному преимуществу такой каскадной схемы относительно варианта каскадных кодов АВ+РС вплоть до вероятностей ошибки $P_b(e) \sim 10^{-9}$.

График «МПД ПЛИС Altera» приведен для декодера МПД с 40 итерациями декодирования. Созданный в 2007 г. при поддержке гранта №05-07-90024 МПД на ПЛИС Altera успешно испытан в каналах с информационной скоростью передачи более 300 Мбит/с. Подчеркнем важнейшее свойство такого аппаратного МПД: эта обычная базовая схема декодера, т.е. она даже не относится к каскадным конструкциям, но оказывается существенно более эффективной по уровню шума, при котором она работает, чем все предыдущие схемы на представленном рисунке. Столь высокая его эффективность обусловлена новыми достижениями в поиске кодов с низким уровнем размножения ошибок при их коррекции, что, в свою очередь, и позволило перейти к большему числу итераций декодирования. Можно утверждать, что такая схема, безусловно, относится к лучшим некаскадным процедурам коррекции ошибок, известным в теории и технике кодирования. Разумеется, успешная работа МПД алгоритма в условиях столь большого уровня шума в соответствии с фундаментальными свойствами кодов оказывается возможной только при значительном увеличении их длины и задержки декодирования.

В связи с большим преимуществом каскадных схем перед базовыми методами кодирования/декодирования применение самых лучших базовых алгоритмов МПД в каскадных конструкциях совместно с внешними кодами с минимальным кодовым расстоянием $d=3\div 9$ также обеспечивает значительное улучшение энергетических характеристик при декодировании. График «ККЗ+МПД» показывает возможности такой каскадной схемы с использованием МПД во внутренних каскадах. При этом применение каскадирования позволяет еще и снизить в таком декодере полную задержку принятия решений примерно в 1,5 раза при сохранении высокой производительности МПД декодера и в этом варианте применения. Хорошим примером широких возможностей МПД по адаптации к особым условиям применения являются новые МПД алгоритмы для каналов с неравномерной энергетикой (НЭК). Характеристики одного из таких МПД декодеров также представлены на рисунке кривой «МПД+НЭК», иллюстрируя уже очень высокую энергетическую эффективность алгоритма на расстоянии всего лишь порядка 0,6 дБ от пропускной способности гауссовского канала связи. Абсолютное большинство других алгоритмов коррекции ошибок оказываются в области столь больших шумов чрезвычайно сложными.

Очень высокую эффективность способны обеспечить и недвоичные многопороговые декодеры (QMПД). Они, как и обычные двоичные МПД, обладают свойством стремления к решению оптимального декодера при сохранении линейной от длины кода сложности реализации, которая свойственна только пороговым процедурам. Следует особо отметить, что в отличие от кодов Рида-Соломона (РС) для QМПД никаких ограничений по длине кода вообще нет, поскольку длина кода n и величина его основания q в недвоичных кодах с многопороговым декодированием совершенно не зависят друг от друга.

Характеристики QМПД с различными параметрами представлены на рис. 11. Здесь кривыми «4) qМПД($R=1/2, q=256, n=4K$)» и «5) qМПД($R=1/2, q=256, n=32K$)» показаны характеристики QМПД кодов с кодовой скоростью $1/2$ и длиной блока 4000 и 32000 символов при использовании 8-ми битовых символов ($q=256$). Объем моделирования в нижних точках данных графиков составлял от $5 \cdot 10^{10}$ до $2 \cdot 10^{12}$ символов, что свидетельствует о крайней простоте метода. Из рисунка видно, что эффективность QМПД оказывается гораздо лучше эффективности кодов РС с таким же q . Их характеристики для $q=256$ и $q=65536$ показаны на рис. 11 кривыми «1) РС($R=1/2, q=256, n=255$)» и «2) РС($R=1/2, q=65536, n=65535$)» соответственно. При увеличении длины блока QМПД, что не вызывает никакой сложности, разница в эффективности становится еще более существенной. Характеристики QМПД при использовании двухбайтовых символов представлены на рис. 11 кривой «6) qМПД($R=1/2, q=65536, n=32K$)». Здесь также использовался код с $R=1/2$ и $n=32000$ символов. Отметим, что очень простой для реализации QМПД декодер для двухбайтового кода длины 32000 оказывается способным обеспечить простейшими мажоритарными методами помехоустойчивость, принципиально недостижимую даже для кода РС длины 65535 двухбайтовых символов, декодер для которого не будет создан никогда. При этом QМПД для двухбайтовых символов практически ни в чем не сложнее однобайтового, так как даже обычные микропроцессоры одинаково просто и быстро работают и с однобайтовыми символами, и с 2-х и даже иногда с 8-байтовыми словами.

Сопоставление полученных за отчетный период результатов с ранее полученными достижениями было проведено в разделе 3.6 данного отчета при их описании.

Отметим также, 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 двоичных МПД позволяет говорить об их абсолютном преимуществе над кодами Рида-Соломона 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.

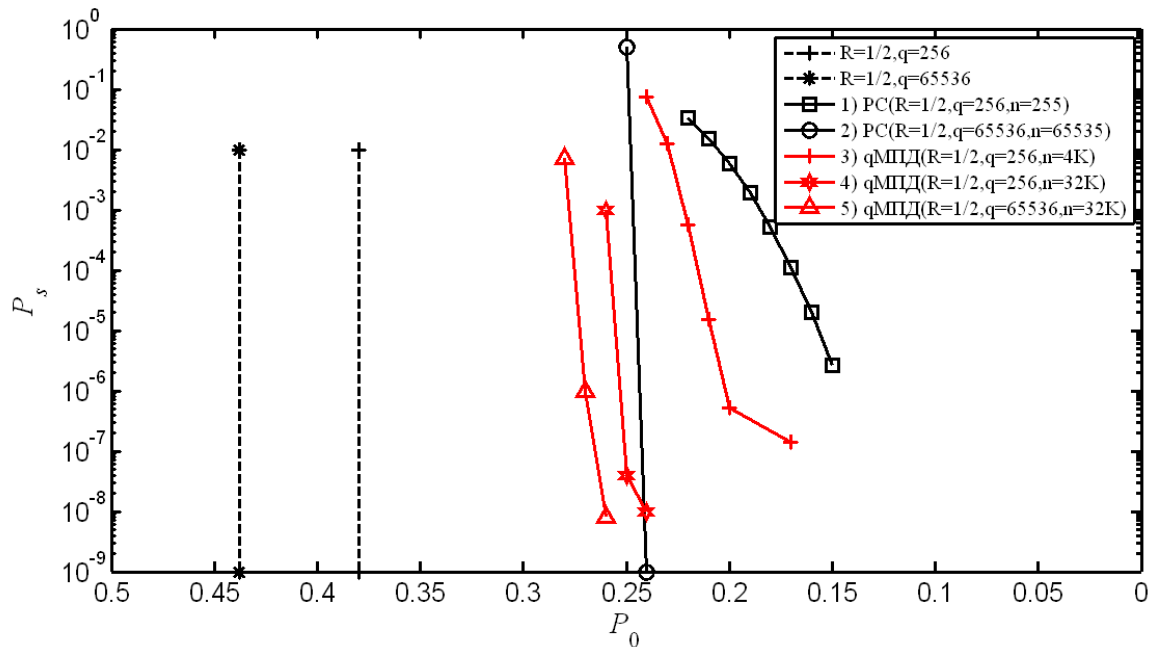


Рис. 11. Характеристики двоичных кодов с $R=1/2$ в qСК

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 показательными в этом отношении являются двоичные 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 нашему коллективу приблизиться к уровню результатов для упоминавшихся выше турбо и LDPC кодов при числе сотрудников, работающих по теме гранта, в тысячи раз меньшем, чем по указанным наиболее популярным темам теории кодирования за рубежом. Укажем также, что сфера работы нескольких оставшихся отечественных коллективов специалистов по теории кодирования много уже. 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*
10

3.10.2. *Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати в 2008 г.*
10

3.11. *Участие в научных мероприятиях по тематике проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда*
4

3.12. *Участие в экспедициях по тематике проекта, проводимых при финансовой поддержке Фонда*

3.13. *Финансовые средства, полученные от РФФИ*
300000 руб.

3.14. *Вычислительная техника и научное оборудование, приобретенные на средства Фонда*
Ноутбук Aser (1 шт) – 38925 р.

3.15. *Адреса (полностью) ресурсов в Internet, подготовленных авторами по данному проекту*
<http://www.mtdbest.iki.rssi.ru>

3.16. *Библиографический список всех публикаций по проекту*

1. Золотарев В.В. Каскадные схемы МПД декодирования для больших баз данных // Мобильные системы. М., 2008. С.66–71.

2. Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых декодеров // Цифровая обработка сигналов. М., 2008. №1. С.2–11.

3. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Алгоритмы многопорогового кодирования для гауссовских каналов // Информационные процессы. М., 2008. Том 8. №1. С.68–83.

4. Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В. Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых декодеров // Электросвязь. М., 2008. №12. С.2–11.

5. Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В. Каскадные схемы декодирования для баз данных на основе МПД // В сб.: «10 Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее приложения- DSPA-08». М., 2008.

6. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Применение многопорогового декодирования для повышения достоверности передачи данных // В сб.: 15-я Международная научно-техническая конференция «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2008. С.3–5.

7. В.В.Золотарев, Р.Р.Назирова. Сверхнадежное исправление ошибок на основе МПД алгоритмов для баз данных систем ДЗЗ // В сб.: ИКИ по дистанционному зондированию Земли. М.: ИКИ РАН, 2008.

8. Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Использование многопороговых декодеров в системах дистанционного зондирования Земли // Фундаментальные и прикладные космические исследования: V Конференция молодых ученых, посвященная Дню космонавтики. М.: ИКИ РАН, 2008. С.33.

9. Овечкин П.В. Использование не двоичных многопороговых декодеров в магнитных и оптических запоминающих устройствах // В сб.: «10 Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее приложения- DSPA-08». М., 2008.

10. Овечкин П.В. Каскадные схемы на основе не двоичного многопорогового декодера // В сб.: 15-я Международная научно-техническая конференция «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2008. С.34–35.

Публикации по проекту без ссылок на РФФИ

11. Золотарев В.В., Дмитриева Т.А. Разработка и исследование работы алгоритма многопорогового декодирования с предварительной оценкой ошибочности проверок // Вестник РГРТУ. Рязань, 2008. №2. Вып. 24. С. 7–11.

12. Золотарев В.В., Дмитриева Т.А. Разработка методики улучшения эффективности многопороговых декодеров при работе в канале с неравномерной энергетикой // В сб.: 15-я Международная научно-техническая конференция «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ, 2008. С. 39–41.

13. Овечкин Г.В., Чикин А.В. Архитектура и реализация декодера LDPC кодов для демодулятора DVB-S2 // Труды НИИР, 2008, №3. С. 58–66.

14. Овечкин Г.В. Многопороговые методы декодирования помехоустойчивых кодов // Труды НИИР, 2008, №3. С. 43–49.

3.17. *Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, в котором, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта*
информационно-телекоммуникационные системы

3.18. *Критическая технология РФ, в которой, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта*
технологии обработки, хранения, передачи и защиты информации

Подпись руководителя проекта