

УДК 519.72

МАЖОРИТАРНОЕ ДЕКОДИРОВАНИЕ БЫСТРОПРОСМАТРИВАЕМЫХ КОДОВ ДЛЯ ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК В КАНАЛАХ СВЯЗИ

В. В. Золотарев, д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник ИКИ РАН, Москва, Россия;
orcid.org/0000-0002-0277-6211, e-mail: zolotasd@yandex.ru

Г. В. Овечкин, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой ВПИМ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-6887-2217, e-mail: g_ovechkin@mail.ru

Рассматривается задача исправления ошибок при передаче данных по каналам с шумом, эффективное решение которой основывается на применении помехоустойчивых кодов и методов декодирования. Целью работы является получение характеристик быстропросматриваемых несистематических свёрточных и блочных кодов и анализ их возможностей при использовании в оптимальных алгоритмах Витерби различного типа, а также в новых схемах мажоритарного типа, в которых они характеризуются весьма высокой эффективностью. Описаны возможности этих алгоритмов в двоично-симметричных каналах и каналах с аддитивным белым гауссовским шумом. Обсуждаются их параметры в системах блочного кодирования. Указаны возможности этого нового направления в прикладной теории кодирования, также основанного на лучших результатах и достижениях оптимизационной теории кодирования.

Ключевые слова: оптимизационная теория кодирования, быстропросматриваемые коды, алгоритм Витерби, многопороговый алгоритм декодирования, основная теорема многопорогового декодирования, оптимальный декодер, коды с кратными скоростями, моделирование.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-25-33

Введение

Помехоустойчивое кодирование широко используется в телекоммуникационных системах для исправления возникающих при передаче данных ошибок [1]. За последние десятилетия были разработаны эффективные методы кодирования и простого декодирования помехоустойчивых кодов, обеспечивающие работу вблизи пропускной способности ряда типичных моделей каналов связи [1]. Среди этих методов можно выделить многопороговые алгоритмы декодирования помехоустойчивых кодов, развиваемые в рамках оптимизационной теории (ОТ) кодирования группой российских авторов. Как следует из [1-6], развитие ОТ позволило для всех классических моделей каналов обеспечить по критерию ПДС = «помехоустойчивость-достоверность-скорость» наилучшие характеристики декодеров. Тем самым научная школа ОТ полностью решила великую проблему Клода Шеннона о простой высокодостоверной передаче цифровых данных по каналам с большим относительным уровнем шума. Монография [5] и справочник [6] к настоящему времени создали все условия для быстрого и успешного проектирования всех известных типов алгоритма Витерби (АВ) [7, 8] и многопороговых декодеров (МПД) самоортогональных кодов (СОК) с самыми высокими характеристиками по критерию ПДС во всех традиционных для теории кодирования каналах, недоступных прочим методам коррекции ошибок.

Среди кодов, которые ранее не рассматривались с использованием технологий ОТ, были двоичные быстропросматриваемые несистематические коды [9], характеристики которых оказываются при использовании АВ также вполне удовлетворительными. Поэтому **целью работы** является адаптация быстропросматриваемых кодов для мажоритарных схем декодирования, обладающих простой реализацией, и получение характеристик их помехоустойчивости. Далее будут рассмотрены характеристики таких кодов с указанными алгоритмами,

относящимися к методам ОТ, в двоично-симметричных каналах (ДСК) и каналах с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ).

Напомним, что ценность применения быстропросматриваемых кодов определяется тем, что, например, в своих свёрточных несистематических вариантах реализации при кодовой скорости $R = 1/2$ эти коды имеют существенно более высокую корректирующую способность из-за примерно вдвое более высокого значения свободного кодового расстояния d_f по сравнению с систематическими кодами. А в случае применения алгоритмов МПД можно осуществлять передачу закодированных сообщений с той же высокой достоверностью, которую обеспечивают эти алгоритмы с систематическими кодами, не отправляя, однако, в канал информационную часть цифрового сообщения. Это во многих случаях обмена информацией в сетях связи полностью исключает свободный доступ к передаваемым данным без использования дорогостоящих дополнительных мер чтения неавторизованными посторонними пользователями информации, к ним не относящейся.

Быстропросматриваемые коды для свёрточного алгоритма Витерби

Применение быстропросматриваемых кодов для свёрточного АВ может в ряде случаев оказаться удобным в том случае, если в целях дополнительного контроля передачи полезно иметь ориентировочную последовательность переданного сообщения прямо в процессе приёма сообщения. В связи с этим на приёмной стороне системы связи согласны мириться с тем, что такое контрольное сообщение будет иметь значительную долю искажённых при передаче символов цифровой информации. Более того, допускается, что эта доля, возможно, будет превышать среднюю вероятность ошибки в канале, используемом сетью. Но, тем не менее, некоторый примерный «макет» сообщения будет всегда доступен такому приёмнику сразу. А при успешно работающем декодере, исправляющем ошибки, после обработки входных данных пользователю, конечно, всегда направляется почти «истинное» высокодостоверное сообщение, в котором ошибки являются редкостью.

Напомним, что для канала, в котором используется АВ для свёрточного кода с кодовой скоростью $R = 1/2$, несистематический быстропросматриваемый код формируется так, что первый порождающий полином может иметь вид $P_1 = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_k)$, а вторым полиномом будет $P_2 = (0, a_2, a_3, \dots, a_k)$. Как следует из их вида, при использовании такого быстропросматриваемого кода можно сложить посимвольно 2 создаваемые кодером кодовые последовательности, что приведёт к формированию исходной информационной последовательности. Но в данном конкретном примере, после передачи по каналу в этой последовательности у приёмника будет уже в $2(1-p)$ раз (где p – вероятность ошибки в канале) большая доля ошибок, чем в самом канале, что, конечно, не влияет на итог работы АВ, который совершенно не использует этот «контрольный» поток при своём декодировании. Разумеется, нулевой символ «пробела» во втором полиноме может находиться на любой другой позиции со сдвигом m , $m > 0$. Тогда восстановленный информационный поток как результат суммирования принятых кодовых векторов, соответствующих полиномам P_1 и P_2 , будет иметь сдвиг относительно своего истинного положения на m позиций, также не затрагивая итогового результата АВ.

На рисунке 1 представлены характеристики АВ для обычных и быстропросматриваемых свёрточных кодов с кодовой скоростью $R = 1/2$ и с длиной кодирующего полинома $K = 7$, $K = 18$ в каналах ДСК (Н) и АБГШ (S). Быстропросматриваемые коды для единообразия выбирались так, что второй полином был с «0» на начальной позиции. Обычным кодам соответствуют пунктирные кривые, а быстропросматриваемым – сплошные. Как следует из представленных графиков, которые, что давно объясняет ОТ, никогда не могут быть получены расчётным путём для большого уровня шума, применение быстропросматриваемых кодов примерно так же эффективно, как и других достаточно хороших кодов для таких же значений K . Выделенную декодером зашумлённую информационную последовательность можно использовать для отдельных процедур контроля уровня шума канала и в процессах синхронизации.

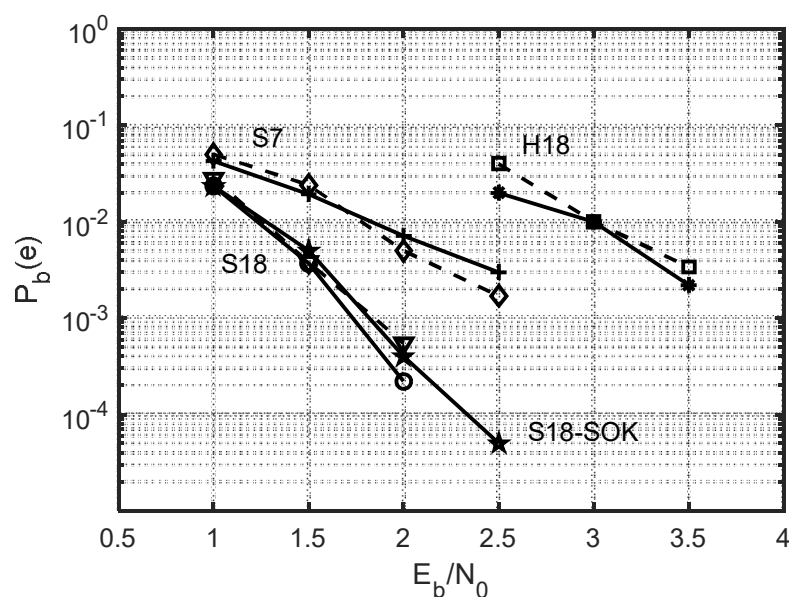


Рисунок 1 – Характеристики несистематических и быстропросматриваемых кодов со скоростью 1/2 при использовании алгоритма Витерби
Figure 1 – Characteristics of nonsystematic and quick look codes of rate 1/2 for Viterbi algorithm

Мажоритарное декодирование свёрточных быстропросматриваемых кодов

Как уже отмечалось, при всех успехах в развитии теории ОТ и связанных с ними МПД алгоритмов для систематических СОК, тем не менее, применение несистематических кодов в декодерах МПД нигде до сих пор не рассматривалось. Рассмотрим один из возможных способов решения этой задачи. Отметим сначала, что в случае быстропросматриваемых несистематических кодов ключевым вопросом для мажоритарных МПД является создание методов вычисления синдрома сообщения, для чего нужна информационная последовательность, пусть даже и содержащая некоторую долю ошибок после приёма. А быстропросматриваемые коды именно благодаря своей структуре позволяют выделить из принятой кодовой последовательности её информационную часть. Однако, например, для $R = 1/2$ плотность ошибок в этой последовательности, как отмечалось в предыдущем разделе, примерно вдвое выше, чем в канале. Но, с другой стороны, взяв для проектируемого кода полином P_1 кода СОК, который ранее продемонстрировал свои реальные характеристики с АВ, мы получаем код с мажоритарным декодированием, у которого можно создать почти вдвое больше проверок, чем в случае систематического кода с тем же полиномом. Сразу возникающий при этом вопрос состоит в том, сможет ли такой рост числа проверок скомпенсировать почти удвоенную плотность ошибок в генерируемых декодером информационных символах, которые будут использоваться при формировании проверок для порогового элемента такого мажоритарного декодера. Эта задача не имеет удобного итогового решения в виде формул для вероятности ошибки нового декодера, как и все другие вопросы определения параметров критерия ПДС для вообще любых декодеров при большом уровне шума.

Отметим далее, что в теории ОТ уже давно показано [2-6], что Основная Теорема МПД (ОТМПД) также всегда имеет место и для несистематических кодов. Значит, использование для их декодирования методов МПД вполне правомерно: все его решения будут стремиться к решениям ОД. Но давно известно и то, что группирование ошибок в таком МПД, который мы только что фактически построили для быстропросматриваемого кода на базе СОК, весьма велико, существенно больше, чем в обычном МПД [6]. Поэтому сразу обратимся к построению быстропросматриваемых кодов с кратными скоростями или, что то же самое, с переменными связями [3-6], среди которых в школе ОТ давно научились особыми оптимизационными методами строить коды с действительно малым уровнем подверженности размно-

жению ошибок декодирования [5, 6]. Пример одного из предварительно моделировавшихся свёрточных быстропросматриваемых кодов с кодовой скоростью $R = k/n = 2/4$ представлен его восемью $(k \times n)$ полиномами, представленными ниже множеством степеней с ненулевыми коэффициентами:

$$\begin{aligned} k_0-r_0 &= \{0, 2\}; k_0-r_1 = \{2\}; k_0-r_2 = \{8\}; k_0-r_3 = \{8\}; \\ k_1-r_0 &= \{19\}; k_1-r_1 = \{19\}; k_1-r_2 = \{0, 3\}; k_1-r_3 = \{3\}. \end{aligned}$$

Схема данного кодера показана на рисунке 2.

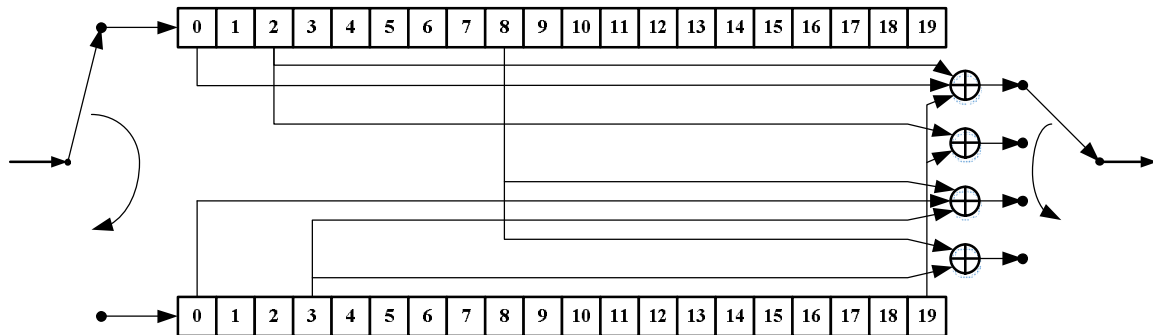


Рисунок 2 – Схема кодера несистематического быстропросматриваемого кода
Figure 2 – Characteristics of nonsystematic and quick look codes
of rate 1/2 for Viterbi algorithm

Две информационных ветви кода формируют 4 кодовых ветви суммированием компонент полиномов с одинаковыми значениями k . Сами полиномы, кроме двух, вес которых 2, в данном примере просто однокомпонентные, а указанные для них числа, как обычно, просто степени при ненулевых коэффициентах [3, 5]. Вычисление гипотез о двух информационных потоках, соответствующих четырём принятым кодовым векторам, выполняется покомпонентным суммированием сначала двух первых кодовых потоков, т. е. с r -индексами 0 и 1, а затем – 2 и 3. Ясно, что результат в обоих случаях равен 0, т. е. оба информационных вектора выделяются из принятого сообщения с нулевым сдвигом их позиций относительно кодера. Поскольку суммарный вес полиномов по каждой информационной ветви равен 5, а полиномы относятся к СОК коду, то минимальное кодовое расстояние также равно $d = 5$. И эффект размножения ошибок у такого кода оказывается немного меньшим, чем для $R = 1/2$ с таким же d . Переход к $R = 3/6$, $R = 4/8$ и далее также способствует дальнейшему снижению размножения ошибок для таких кодов.

На рисунке 3 приведены результаты сопоставления экспериментальных характеристик традиционных МПД на систематических СОК и новых МПД для несистематических быстропросматриваемых кодов, все – с кодовыми скоростями $R = 5/10$ и кодовым расстоянием $d = 11$. Все эксперименты выполнены для каналов ДСК и АБГШ при $I = 10$ итерациях и с примерно одинаковыми задержками принятия решений порядка 5000 кодовых символов. Классические МПД для ДСК (Н) и АБГШ (S) каналов представлены сплошными кривыми, а МПД для быстропросматриваемых кодов – пунктирными. Поскольку оба типа кодов достаточно короткие, а число итераций декодирования невелико, что было сделано для простого показа именно лишь принципов перехода к быстропросматриваемым кодам, то и вероятностные характеристики декодеров МПД обоих типов невысокие. Но существенно, что МПД декодеры с быстропросматриваемыми кодами имеют примерно те же, хотя и немного более низкие итоговые достоверности, что и у классических МПД. И это при том, что МПД для быстропросматриваемых кодов работает при начальных вероятностях ошибок в гипотезах об информационных символах, почти вдвое более высоких, чем вероятность ошибки в канале. Именно поэтому при одинаковых прочих параметрах кодов декодер для быстропросматриваемых кодов начинает работать в гораздо более сложных условиях. Его характеристики будут улучшены, если допустить большее число итераций по сравнению с классическим МПД. А такое улучшение может быть реально достигнуто благодаря более высокому, увеличенному

почти вдвое, минимальному расстоянию быстропросматриваемого кода по сравнению с обычным систематическим СОК.

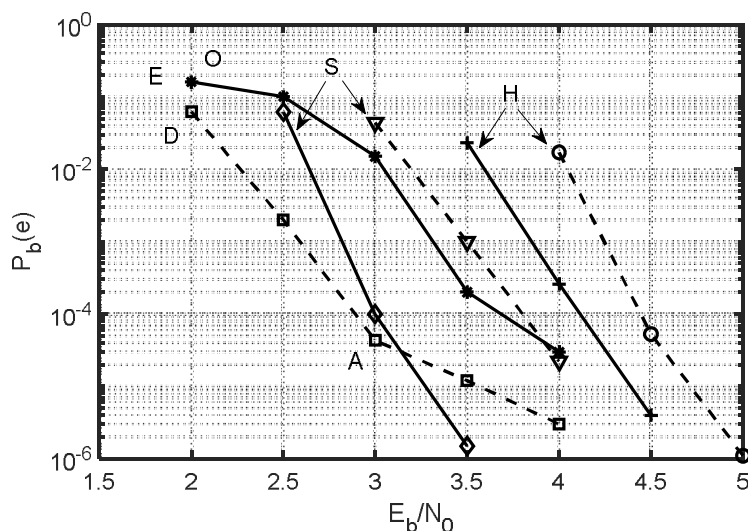


Рисунок 3 – Эффективность несистематических обычных и быстропросматриваемых кодов с $R=1/2$

Figure 3 – Performance of nonsystematic usual and quick look codes of rate 1/2

Правильность приведённого выше описания возможностей МПД для быстропросматриваемых кодов хорошо иллюстрируется экспериментальными кривыми группы Е на рисунке 3. Эти 2 графика относятся к другим более длинным кодам с $d = 9$, $R = 4/8$ и числом итераций $I = 30$. Изменение параметров системы декодирования было выполнено в соответствии с парадигмами справочника [5], что стало важным моментом проверки работоспособности рекомендаций теории ОТ при переходе к новым областям исследований. Существенно также и то, что в схеме декодера кодов этой группы учтён и принцип дивергенции, тоже предлагаемый в Справочнике [6] и новейших монографиях [3, 5]. Оригинальная «стартовая» сплошная кривая О в группе Е показывает возможности этого нового декодера быстропросматриваемого кода для гауссовского канала, сформированного по самым общим новейшим рекомендациям теории ОТ и Справочника [6]. Так, реализованный проектный экспромт следует признать очень успешным, поскольку этот график МПД для быстропросматриваемого кода с $d = 9$ сразу при первом же испытании имеет более высокую помехоустойчивость при большом относительном уровне шума, чем пункт S для МПД с быстропросматриваемым кодом с $d = 11$.

А далее пункт D для этого же кода с $I=30$ – результат применения важнейшего в технологиях ОТ этапа настроек параметров декодера по весам и порогам, что в итоге обеспечило и его более высокие характеристики помехоустойчивости, чем даже у классического МПД. Более того, точка А на изломе графика D отмечает границу той части графика правее этой граничной точки, которая уже соответствует оптимальному декодированию этого кода с $d = 9$, так как все моделирующие и оптимизирующие программы школы ОТ чётко указывают уровни, с которых результаты МПД совпадают с оптимальными. Тем самым и подтверждается практически с первых попыток создания МПД для быстропросматриваемого кода весьма технологичный уровень всех работающих в рамках теории ОТ конструктивных парадигм. Особо высокие возможности новых типов МПД доказывает и такой замечательный факт, что, например, в точке А плотность ошибок в восстановленной информационной последовательности, подаваемой на вход МПД быстропросматриваемого кода, превышает вероятность $p = 0,14$, что очень близко к пропускной способности $C = 1/2$ для гауссовского канала. Более того, в отдельно приведённом эксперименте в точке $E_b/N_0 = 2,75$ дБ, который мы не стали размечать дополнительно, начальная плотность ошибок в информационных гипотезах на входе декодера даже превышала уровень, при котором $C = 1/2$. Столь высокая эффектив-

ность МПД быстропросматриваемого кода является лучшим подтверждением абсолютной правильности уже самых первых наработок в сфере несистематических МПД алгоритмов.

Отмечая, что представленные результаты получены буквально «слёту», можно смело утверждать, что дальнейшие исследования этой принципиально новой области развития технологий помехоустойчивого кодирования с простейшей реализацией и сразу же с высокими результатами, безусловно, очень перспективны. Следует напомнить, что и МПД быстропросматриваемого кода допускает, как и классический МПД, реализацию запатентованных школой ОТ вариантов как бы «пролётного» декодера, вообще не тормозящего работу тех систем, в составе которых он работает [5, 6, 9, 10]. Это возможно благодаря наличию таких вариантов пороговых элементов, единственных активных узлов в МПД, в которых прямо в момент очередного сдвига данных в декодере уже есть своё решение о наличии или отсутствии ошибки в контролируемых информационных символах. Отметим, что таким свойством отсутствия «торможения» данных при их движении в декодере не обладают никакие другие достаточно эффективные алгоритмы [5, 6].

Алгоритмы для блоковых быстропросматриваемых кодов

Перенос методов проектирования свёрточных конструкций на блоковые быстропросматриваемые коды не создаёт никаких проблем. Об общих свойствах блоковых и свёрточных кодов можно посмотреть ссылки в [5, 6]. Основным их свойством, существенным для прикладных разработок, т.е. для создания декодеров, оказываются многократно бóльшие длины блоковых кодов по сравнению со свёрточными при всех прочих близких или сопоставимых параметрах. И при этом следует учитывать, что окончательные достаточно высокодостоверные решения возможны в свёрточных кодах при больших относительных уровнях шума только на расстояниях от места приёма новых кодовых символов, многократно превышающих длины кодового ограничения этих кодов. Это полностью подтвердилось в запатентованных школой ОТ разработках блоковых АВ (БАВ) [3..6]. Подобные же свойства кодов и декодеров ОТ демонстрируют и программные платформы для разных типов алгоритмов МПД, которые можно свободно переписать с порталов [11], а найти технологии и методики их применения в Справочнике [6]. Таким образом, нет необходимости дополнительно рассматривать блоковые МПД быстропросматриваемых кодов, характеристики которых из общетеоретических многократно проверенных и в эксперименте соображений будут всегда сопоставимы со свёрточными, если только длины блоковых версий декодеров МПД выбирать много бóльшими. Технологии и программное обеспечение школы ОТ давно созданы и для таких проектов.

Заключение

Быстропросматриваемые коды стали первой большой работой научной школы ОТ после выхода целой системно-философской серии её монографий и новейшего Справочника [2-6]. Собранные в них и последовательно изложенные технологии проектирования и исследований декодеров школы, к которым относятся многочисленные типы МПД декодеров и разнообразные модификации алгоритма Витерби, позволяют весьма просто создавать декодеры для всех основных шумящих цифровых каналов с весьма высокими характеристиками вплоть до ближайших к границе Шеннона областей их параметров. Тем самым школой ОТ уже много лет как успешно решена великая проблема Шеннона о простейшей высокодостоверной передаче данных по каналам с большим относительным уровнем шума.

Как показал пример использования теории ОТ для быстропросматриваемых кодов, представленные технологии ОТ успешно работают и в областях, ранее совсем неизвестных, что подчёркивает полноту и совершенство новой Оптимизационной Теории помехоустойчивого кодирования. Мы полагаем, что знакомство с новой теорией ОТ, полностью заменившей в прикладном аспекте прежнюю теорию кодирования, очень удобно начать с общедоступных четырёх сетевых порталов школы [11], а первые качественные впечатления можно получить от находящегося там же буклета [12], написанного сторонниками школы ОТ с участием чле-

на-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева и академика РАН Н.А. Кузнецова. В нём есть и десятки гиперссылок на наиболее серьёзные работы в области прикладной теории кодирования, которую в настоящее время, развивает в основном только научная школа ОТ. Буклет можно переписать с любых сетевых порталов школы [10] со страниц «Наши книги».

Напомним, что принципиальное, хотя и совершенно неожиданное отличие ОТ от прочих работ в прикладной теории кодирования состоит в том, что все разработки школы направлены на то, чтобы создаваемые ею алгоритмы по возможности быстрее стремились к конечному оптимальному (наилучшему!) решению, что теперь возможно только на путях создания декодеров с прямым контролем метрики, которые используются сейчас лишь в декодерах МПД и АВ. Эта парадигма в ОТ, как и теорема ОТМПД о стремлении к решению оптимального декодера, является ключевыми в наших исследованиях и служат быстрому прогрессу всей прикладной теории кодирования, которую сейчас долгие десятилетия представляют только технологии ОТ [3-6].

Библиографический список

1. **Золотарёв В. В., Овечкин Г. В.** Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник. М.: Горячая линия-Телеком, 2004. 126 с. https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2020/11/mtd_handbook1.pdf.
2. **Ullah M. A., Omura R., Sato T., Ogivara H.** Multi-Stage Threshold Decoding for High Rate Convolutional Codes for Optical Communications. AICT 2011: The Seventh Advanced international Conference on Telecommunications, pp. 87-93.
3. **Золотарёв В. В.** Теория кодирования как задача поиска глобального экстремума / Под научной ред. академика РАН Н. А. Кузнецова. М.: Горячая линия-Телеком, 2018. 220 с., <https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2021/10/kniga-2018-pro-globalnyj-poisk.pdf>.
4. **Золотарёв В. В., Овечкин Г. В., Овечкин П. В.** Эффективные многопороговые методы декодирования самоортогональных кодов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 60. С. 113-122. http://vestnik.rsreu.ru/images/archive/2017/2-60/4.3_.pdf.
5. **Золотарёв В. В.** Оптимальные алгоритмы декодирования Золотарёва. Под научн. ред. члена-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева. М.: Горячая линия-Телеком, 2021, 262 с., <https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2021/02/optimalnye-algoritmy-dekodirovaniya-zolotareva.pdf>.
6. **Золотарёв В. В.** Кодирование для цифровой связи и систем памяти. Справочник-2. Под научной редакцией члена-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева. М.: Горячая Линия-Телеком, 2022, 178 с. <https://decoders-zolotarev.ru/nashi-knigi/>.
7. **Золотарёв В. В.** Расширение возможностей применения блочных версий алгоритма Витерби // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 74. С. 34-41. http://vestnik.rsreu.ru/images/archive/2020/74/1.4_.pdf.
8. **Золотарёв В. В., Овечкин Г. В., Овечкин П. В.** Характеристики блочных реализаций алгоритма Витерби // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 59. С. 30-35. http://vestnik.rsreu.ru/images/archive/2017/1-59/5_.pdf.
9. **Helgert H.** Short Constraint Length Rate 1/2 «Quick-Look» Codes // in IEEE Transactions on Communications, vol. 23, no. 7, pp. 768-773, July 1975, doi: 10.1109/TCOM.1975.1092866.
10. **Овечкин Г. В.** Методы улучшения эффективности многопорогового декодера самоортогональных кодов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2004. № 14. С. 54-58.
11. Веб сайты: www.mtdbest.ru, <https://decoders-zolotarev.ru>, www.decmtdzol.ru и www.mtdbest.iki.rssi.ru.
12. **Кузнецов Н. А., Золотарёв В. В., Зубарев Ю. Б., Овечкин Г. В., Назиров Р. Р., Аверин С. В.** Проблемы и открытия Оптимизационной Теории помехоустойчивого кодирования (ОТ в иллюстрациях). М.: Горячая линия-Телеком, 2020. 36 с. <http://www.mtdbest.ru/articles/comics.pdf>.

UDC 519.72

QUICK LOOK CODES MAJORITY DECODING FOR ERROR CORRECTION IN COMMUNICATION CHANNELS

V. V. Zolotarev, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Lead Researcher, SRI RAS, Moscow, Russia;
orcid.org/0000-0002-0277-6211, e-mail: zolotasd@yandex.ru

G. V. Ovechkin, Dr. Sc. (Tech.), associate professor, Head of Computational and Applied Mathematics Department, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-6887-2217, e-mail: g_ovechkin@mail.ru

The problem of error correction in data transmission over noisy channels is considered, the effective solution of which is based on the use of error-correcting codes and decoding methods. The aim of the work is to obtain the characteristics of quick look non-systematic convolutional and block codes and analyze their capabilities when used in optimal Viterbi algorithms of various types, as well as in new majority-type schemes, in which they are characterized by very high efficiency. The capabilities of these algorithms in binary-symmetric channels and the channels with additive white Gaussian noise are described. Their parameters in block coding systems are discussed. The possibilities of this new direction in applied coding theory, also based on the best results and achievements of Optimization Coding Theory, are indicated.

Key words: optimization coding theory, quick look codes, Viterbi algorithm, multithreshold decoding algorithm, main theorem of multithreshold decoding, optimal decoder, codes with multiple rates, modeling.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-25-33

References

1. **Zolotaryov V. V., Ovechkin G. V.** *Pomekhoustojchivoe kodirovanie. Metody i algoritmy. Spravochnik.* Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2004. 126 p. (in Russian). https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2020/11/mtd_handbook1.pdf.
2. **Ullah M. A., Omura R., Sato T., Ogivara H.** Multi-Stage Threshold Decoding for High Rate Convolutional Codes for Optical Communications. *AICT 2011: The Seventh Advanced international Conference on Telecommunications*, pp. 87-93.
3. **Zolotaryov V. V.** *Teoriya kodirovaniya kak zadacha poiska global'nogo ekstremuma / Pod nauchnoj red. akademika RAN N. A. Kuznecova.* Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2018. 220 p. (in Russian). <https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2021/10/kniga-2018-pro-globalnyj-poisk.pdf>.
4. **Zolotaryov V. V., Ovechkin G. V., Ovechkin P. V.** Effektivnye mnogoporogovye metody dekodirovaniya samoortogonal'nyh kodov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2017, no. 60, pp.113-122. (in Russian). http://vestnik.rsreu.ru/images/archive/2017/2-60/4.3_.pdf.
5. **Zolotaryov V. V.** *Optimal'nye algoritmy dekodirovaniya Zolotaryova. Pod nauchn. red. chlena-korrespondenta RAN Yu. B. Zubareva.* Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2021, 262 p. (in Russian). <https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2021/02/optimalnye-algoritmy-dekodirovaniya-zolotareva.pdf>.
6. **Zolotaryov V. V.** *Kodirovanie dlya cifrovoj svyazi i sistem pamyati. Spravochnik-2. Pod nauchnoj redakciej chlena-korrespondenta RAN Yu. B. Zubareva.* Moscow: Goryachaya Liniya-Telekom, 2022, 178 p. (in Russian). <https://decoders-zolotarev.ru/nashi-knigi/>.
7. **Zolotaryov V. V.** Rasshiren timeraznozhnostej primeneniya blokovykh versij algoritma Viterbi. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2020, no. 74, pp. 34-41. (in Russian). http://vestnik.rsreu.ru/images/archive/2020/74/1.4_.pdf.
8. **Zolotaryov V. V., Ovechkin G. V., Ovechkin P. V.** Harakteristiki blokovykh realizacij algoritma Viterbi. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2017, no. 59, pp. 30-35. (in Russian). http://vestnik.rsreu.ru/images/archive/2017/1-59/5_.pdf.

9. **Helgert H.** Short Constraint Length Rate 1/2 «Quick-Look» Codes. *IEEE Transactions on Communications*, vol. 23, no. 7, pp. 768-773, July 1975, doi: 10.1109/TCOM.1975.1092866.
10. **Ovechkin G. V.** Metody uluchsheniya effektivnosti mnogoporogovogo dekodera samoortogonal'nyh kodov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2004, no. 14, pp. 54-58. (in Russian).
11. Veb sajty: www.mtdbest.ru, <https://decoders-zolotarev.ru>, www.decmtdzol.ru i www.mtdbest.iki.rssi.ru.
12. **Kuznecov N. A., Zolotaryov V. V., Zubarev Yu. B., Ovechkin G. V., Nazirov R. R., Averbach S. V.** *Problemy i otkrytiya Optimizacionnoj Teorii pomekhoustojchivogo kodirovaniya (OT v illyustratsiyah)*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2020. 36 p. (in Russian). <http://www.mtdbest.ru/articles/comics.pdf>.