Сокращённый вариант статьи на английском языке, опубликованной в журнале
"Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017, Т. 14, № 1, С. 217–232", Москва.

В.В. Золотарёв, И.В. Чулков, Г.В. Овечкин, С.В. Аверин, П.В. Овечкин, Д.Ж. Сатибалдина, В..Т. Као

Прикладные достижения оптимизационной теории для спутниковых каналов ДЗЗ: 25 лет развития

(ИКИ РАН, РГРТУ, ООО ОРТ, РГРТУ, Казахстан, Вьетнам)

Представлены результаты двадцатипятилетнего развития оптимизационной теории (ОТ) помехоустойчивого кодирования и методов многопорогового декодирования (МПД), созданных на её основе. Рассматриваются результаты для гауссовских и других каналов. Обсуждаются достижение алгоритмами МПД теоретически предельного аппаратного быстродействия. Указаны направления дальнейшего развития МПД совместно с алгоритмом Витерби (АВ). Обсуждается методологический базис ОТ и новые парадигмы для успешных исследований в теории и прикладных вопросах помехоустойчивого кодирования.

Ключевые слова: помехоустойчивость, многопороговое декодирование, символьные коды, самоортогональные коды, предельное аппаратное быстродействие, высокодостоверное хранение данных, оптические каналы связи, флеш-память, коды с прямым контролем метрики, дивергентное кодирование.

1. История вопроса

В 2015 году исполняется 25 лет со дня защиты диссертации [1], в которой для очень простых по сегодняшним меркам кодов были доказаны многие основные результаты, которые позднее были систематизированы и представлены в полном объеме в Оптимизационной Теории кодирования [2,4,6-9,12,14,18-21,28]. На основе развития идей мажоритарного декодирования [5] Оптимизационная Теория позволила совершенно иначе взглянуть на проблему итеративной коррекции ошибок декодирования, исходные методы которой были запатентованы ещё в 1972 г. [11].

В настоящее время все основные этапы проектирования и исследования МПД методов проводятся на основе специальных мощных оптимизационных процедур, эффективность и сложность которых быстро растут. При этом сложность самого метода МПД остаётся минимальной, растущей всего лишь линейно с длиной кода. Но с увеличением числа итераций коррекции ошибок характеристики МПД непрерывно улучшаются и при весьма небольшой сложности по сравнению с другими методами практически во всём диапазоне интересных для техники связи параметров уже стали лучше, чем у прочих алгоритмов. Оптимизация ведётся по сотням и тысячам критериев при построении кодов с малым размножением ошибок (РО), которые используются в МПД, при настройке параметров МПД (порогов, весов проверок, разностей кодовых полиномов и т.д.), а также при собственно моделировании работы МПД в различных каналах. Это и позволяет считать Оптимизационную Теорию (ОТ) основой методов МПД и всех алгоритмов на их основе.

Ниже предлагается обзор основных результатов по эффективности и быстродействию алгоритмов многопорогового декодирования (МПД), разработанных в соответствии с парадигмами ОТ, которые сравниваются с другими известными методами коррекции ошибок в гауссовских, стирающих и недвоичных каналах связи. В конце статьи сделаются общие выводы по ситуации. сложившейся в теории и в прикладных исследованиях в области помехоустойчивого кодирования.

2. Гауссовские каналы

Рассмотрим характеристики основных алгоритмов декодирования в гауссовском канале при кодовой скорости R=1/2, представленные на рис.1. На нем показаны зависимости вероятности ошибки на бит $P_b(e)$ различных алгоритмов декодирования в традиционном виде как функции от E_b/N_0, -уровня битовой энергетики канала. Вертикаль C=1/2 отмечает уровень шума, при котором пропускная способность канала C равна кодовой скорости C=R=1/2. Пунктир P_0 показывает вероятность ошибки при отсутствии кодирования. Граница AT указывает на предельные пока возможности турбо кодов, которые, однако, сих пор очень трудно воплотить в аппаратуре из-за сложности алгоритмов этого класса. Кривая VA:K7 отражает возможности повсеместно применяемого алгоритма Витерби (АВ) для свёрточных кодов с длиной кодирующего регистра K=7. График CC:VA*RS соответствует каскадной схеме на основе АВ и кода Рида-Соломона [23]. Кривая LDPC приведена для min-sum декодера LDPC кода стандарта DVB-S2 длиной 64800 битов, реализованного в 2012 году в НИИР. График TR представляет реальные возможности декодера для турбо кода длиной 3060 битов стандарта CDMA2000.

Рассмотрим далее возможности многопороговых алгоритмов [14,18-21,23,28]. График MTD1 показывает новые достижения алгоритма, который оптимально декодирует длинный код при очень низкой энергетике гауссовского канала 1,3 дБ, когда до его пропускной способности оказывается всего 1,1 дБ. Для работы декодера требуется не более I=160 итераций. Величина задержки декодирования при свёрточном кодировании составляет менее 6 Мбитов. Снижение допустимого уровня шума канала всего на несколько десятых децибела, естественно, сильно упрощает МПД алгоритм. Так, график MTD2 показывает возможности этого метода уже всего при I=60 итерациях и задержке решения свёрточного декодера менее 1 Мбита. А последний декодер, представленный на графике MTD3, обладает ещё и тем важным свойством, что его возможности в самом обычном некаскадном формате свёрточного декодирования оказываются лучше, чем у весьма мощной каскадной схемы (АВ*РС). Этот декодер реализует 40 итераций и имеет задержку всего лишь втрое большую, чем у сравниваемой с ним гораздо более сложной последовательной каскадной схемы.

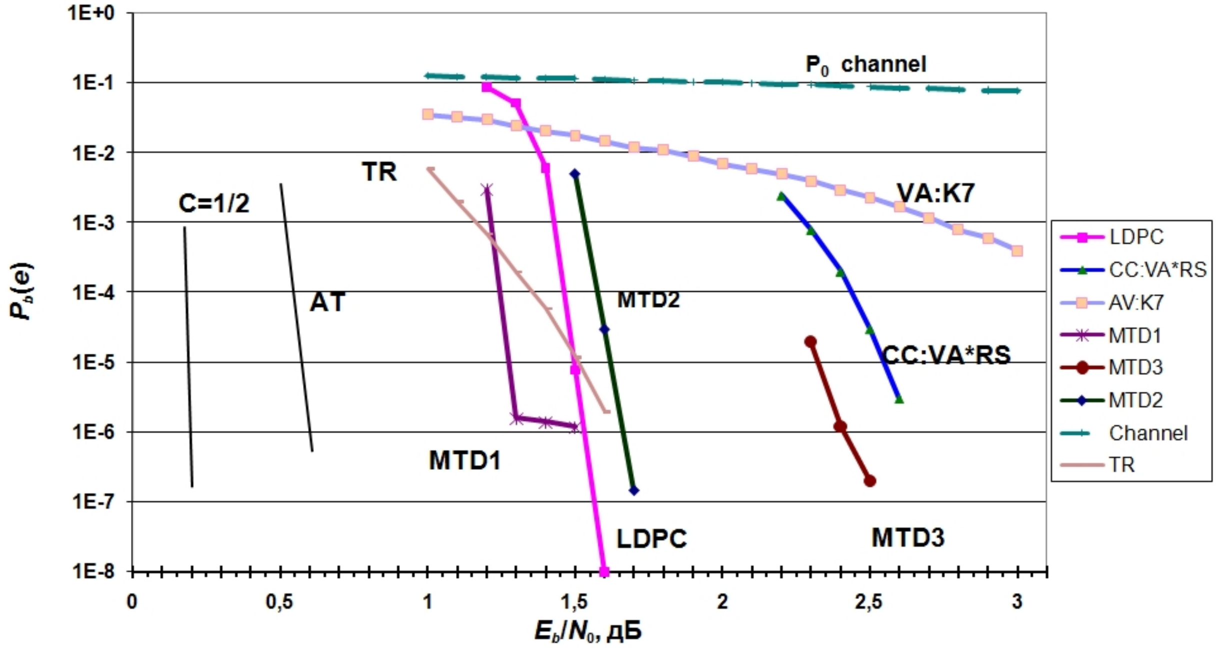

Рис. 1. Характеристики современных методов коррекции ошибок

Укажем на основные преимущества всех представленных методов МПД перед прочими алгоритмами. АВ не является для МПД конкурентом в области столь высокого уровня шума канала. Каскадная схема с АВ и кодами РС тоже находится на границе рисунка и также не участвует в конкурсе методов. Возможности первого **МПД по эффективности декодирования** при большом уровне шума **уже являются недостижимыми** для всех известных на текущий момент алгоритмов для гауссовских каналов. Но опыт разработки МПД свидетельствует, что есть ещё некоторая возможность улучшения его характеристик. Для дальнейшего существенного продвижения в сторону предела Шеннона R=C=1/2 или для других кодовых скоростей, конечно, потребуется дальнейшая модернизация МПД, которая уже проводится. Добавим далее, что при равном числе итераций для МПД это гораздо более простая процедура, чем, например, для LDPC декодера. Кроме того, структура связей между ячейками в аппаратном МПД декодере много проще, чем у прочих алгоритмов. МПД более, чем на 99% состоит из памяти на регистрах сдвига, что дополнительно облегчает его создание и отладку. И, наконец, укажем на то, что, согласно [13], все МПД алгоритмы могут быть реализованы аппаратно так, что они становятся как бы однотактной решающей схемой мгновенного действия. А это приводит к тому, что, как и все алгоритмы, МПД декодеры создают задержку решения, но они совершенно не снижают скорость работы любого устройства, в котором они работают. Конечно, при этом должен использоваться свёрточный код. Такое свойство свёрточного **МПД** естественно назвать **максимальной аппаратной теоретической производительностью.**

Простота и высокая скорость работы МПД алгоритмов хорошо иллюстрируется демопрограммами на ресурсах [14]. Например, МПД на ПК с процессором Core i7 **декодирует свёрточный код** при большом шуме гауссовского канала **со скоростью более 15 Мбит/с.** Ко всем демопрограммам приложены детальные инструкции. Специалисты могут посмотреть характеристики эффективности и быстродействия демопрограмм, а также проанализировать на основе новых версий таких демопрограмм с возможностью выбора различных кодовых полиномов корректирующую способность других кодов в декодерах типа МПД.

3. Символьные коды

В высшей степени ценным для теории кодирования и различных прикладных цифровых систем стало открытие и к настоящему времени уже полное исследование нашей научной школой символьных кодов [2-4,6-8, 14,20,23,28], реализация многопорогового декодирования которых также чрезвычайно проста, как и в случае двоичных их аналогов. К настоящему времени для них получены все основные оценки характеристик декодирования, проведён большой объём моделирования и детально проработана общая теория как для блоковых, так и для свёрточных вариантов реализации.

Строго говоря, J. Massey рассматривал эти коды, которые относятся к классу мажоритарно декодируемых недвоичных кодов, и доказал теоремы 1 ÷ 4 для них в [5]. Но он очень негативно оценил возможности таких кодов в разделах 1.2, 6.2, 6.5, 6.6 и 8.2 этой же книги и больше не занимался этой темой. При этом нам неизвестны другие сколько-нибудь содержательные работы по мажоритарному декодированию недвоичных кодов, а тем более, публикации по итеративным алгоритмам для них.

.**Символьные коды,** для которых сейчас уже проведён полный цикл исследований характеристик и разработок [6-8,14,23,28], давно и полностью **решили все проблемы** высоконадёжной передачи и хранения **многобайтовых цифровых данных** на много лет вперёд. Они могут заменить коды Рида-Соломона во всех возможных приложениях, выигрывая у них и у других потенциальных конкурентов все конкурсы по достоверности и быстродействию [6-8,14]. Причиной этого преимущества являются возможность выбора любой длины этих символьных кодов, которая не зависит от алфавита выбранного кода q. И самое главное, они допускаю фактически оптимальное декодирование (эквивалентное переборному!) при использовании простейших мажоритарных методов даже при достаточно большом уровне шума. При этом сложность символьного МПД (QМПД), как и в двоичном случае, оказывается теоретически минимальной, линейной от длины кода.

Рассмотрим возможности недвоичных кодов. На рис.2 представлены характеристики декодеров кодов Рида-Соломона (РС) и QМПД при кодовой скорости R=1/2. По горизонтальной оси отложены вероятности ошибки на символ при различных алфавитах q, q=2^8=256 и q=2^16=65536. По вертикальной оси откладываются вероятности ошибки декодера на символ $P_D(s)$ для любых q. График P_0 показывает вероятность ошибки в симметричном недвоичном канале qСК. Кривая RS2^8 даёт представление о возможностях кода РС с (n,k,d) параметрами (255,128,128), в котором размер символа соответствует одному байту. Далее пунктир RS-Su2^8 соответствует нижней оценке возможностей сложного декодера для этого же кода, предложенного Суданом [22]. Он исправляет немного большее число ошибок в кодовом блоке, чем половина от величины минимального кодового расстояния кода d, но требует примерно в n раз большего объёма вычислений, чем обычные методы декодирования кодов РС.

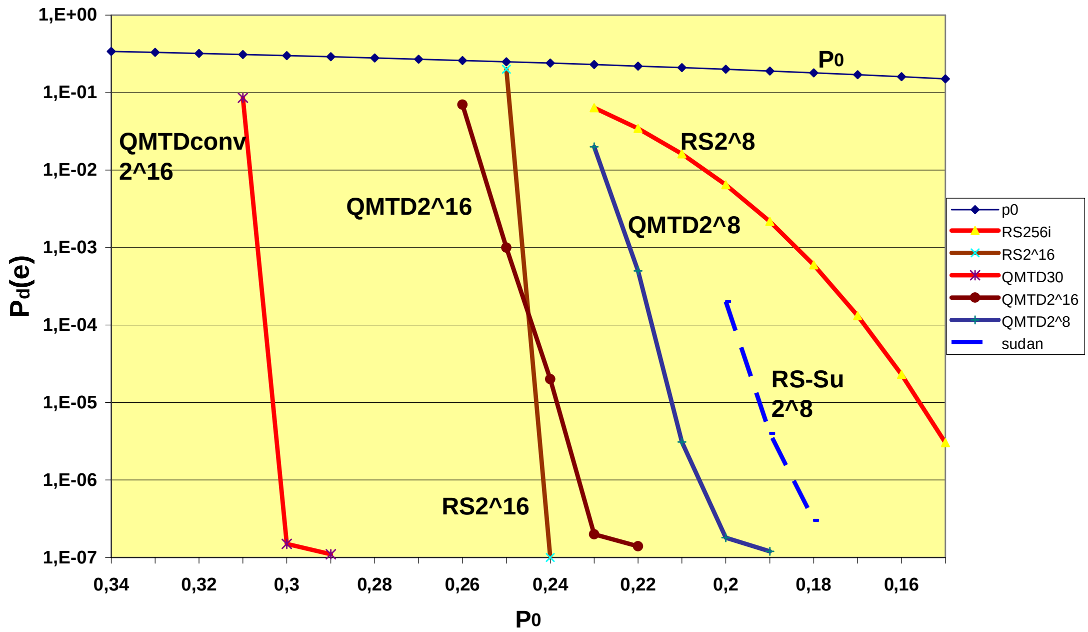

Рис.2. Характеристики декодеров кодов РС и МПД алгоритмов

Очень длинный код РС с символами размером 16 битов и длины n=65535 имеет характеристики, представленные графиком RS2^16. Декодер для него чрезвычайно сложен и, очевидно, он не будет предметом реализации в ближайшее время, хотя программные демо алгоритмы и для такого кода РС тоже могут быть переписаны с наших ресурсов [14], запущены на вашем ПК, а затем проанализированы.

Рассмотрим далее возможности символьных МПД. Достаточно простой декодер символьного блокового кода с (n,k,d)- параметрами (8000,4000,15) для q=256 и I=20 итерациями имеет характеристики, отмеченные как QMTD2^8 . Этот алгоритм для того же кода с q=2^16 обеспечивает характеристики, представленные кривой QMTD2^16. Последний график QMTDconv2^16 приведён для свёрточного кода с I<45 итерациями, минимальным кодовым расстоянием d=17, длиной кодового ограничения n_A=174000 кодовых символов при задержке решения L= 420000 кодовых символов. Высокие возможности символьных МПД определяются тем, что, согласно оптимизационной теории, его решения, как и в двоичном случае, стремятся к решению оптимального переборного алгоритма и обычно даже при весьма высоком уровне шума он достигает решения оптимального декодера, хотя QМПД тоже не является ОД. **Характеристики всех QМПД** на рис.2 в нижней части графиков при $P_d(s)<10^{-6}$ **соответствуют уровню ОД** для используемых кодов.

Не лишне особо напомнить, что для недвоичных (и символьных!) кодов фактически невозможно построить декодер Витерби из-за его чрезмерной сложности уже при длине кода ~ K=4 ÷ 5 символов, особенно при больших значениях q. Это ещё более повышает высочайшую ценность крайне простых и весьма эффективных символьных МПД.

Отметим далее, что хорошие характеристики QМПД при высоком уровне шума достижимые только при использовании очень длинных кодов. В частности, первый из рассмотренных символьный блоковый код для QМПД длины n=8000 символов при q=256 не может быть существенно короче указанной его длины. А при переходе к большим значения q, как во втором декодере этого же кода, достоверность декодирования вырастает ещё в большей степени даже при увеличении уровня шума. При выполнении этих условий QМПД быстро достигает решения оптимального декодера (ОД), как это показывают графики для всех трёх декодеров QМПД. Отметим далее, что третий декодер обеспечивает практически оптимальное декодирование для кода с R=1/2 при $P_0 \lesssim 0{,}3$. Это достигнуто на основе свёрточного кода, которые всегда имеют более высокие характеристики, чем блоковые, но при большой задержке решения. Кроме того, был выбран код с меньшим уровнем размножения ошибок, что также обеспечивает улучшение сходимости к оптимальному решению при более высоком уровне шума. Поэтому задержка решений третьего свёрточного декодера оказывается весьма значительной, но для выбранных очень высоких уровней шума вполне приемлемой. Аналогичные по эффективности результаты для других недвоичных кодов неизвестны.

Перейдём к важнейшему вопросу сложности декодирования. Для кода РС длины n=255 моделирование декодера показало, что ПК с процессором Core i7 декодирует его со скоростью около 130 Ксимволов в секунду (Кс/с). Поскольку сложность алгоритма Судана примерно в ~n раз больше обычного декодера для кода РС, то, исходя из графика для его весьма заниженной оценки $P_d(s)$ получаем, что этот метод обеспечивает лишь небольшое улучшение достоверности, но сложность его уже весьма велика. Далее второй двухбайтовый код РС ($q=2^{16}$) с n=65535 обеспечивает высокую достоверность при $P_0<0{,}24$. Но для столь длинного кода сложность его декодирования, растущая как $\sim n^2$, оказывается чрезмерной: ~ 400с/с. Поскольку для декодирования использовался весьма производительный процессор, вполне ожидаемо оказывается, что такой эффективный по уровню шума декодер весьма сложен и слишком нетороплив.

Перейдём к символьным МПД. Первый из них при q=256 эффективнее короткого кода РС декодера Судана [22]. Но сложность программной версии QМПД (для того же процессора) определяется скоростью декодирования, равной ~ 300Кс/с, которая, конечно, огромна. Менее чем за 1 час набирается статистика на более чем миллиард символов, что может составить до 3*10^10 битов. Таким образом, МПД алгоритмы имеют действительно очень малую сложность даже при большом уровне шума, как это и демонстрируют многие публикации по МПД, в том числе по символьным МПД [1-4,6-8]. Демопрограммы для QМПД и декодеров кодов РС могут быть переписаны с ресурсов [14]. Далее второй МПД декодер с $q=2^{16}$ имеет такую же сложность, как и первый, так как алгоритмы работы и используемые коды у обоих декодеров совершенно одинаковы. Они отличаются только алфавитом. Значит, и быстродействие алгоритмов одинаково. Но второй декодер работает при более высоком уровне шума канала.

Рассмотрим третий декодер свёрточного кода с особенно малым уровнем размножения ошибок. Он также выполняет большее число итераций декодирования, $I \le 45$, чем два предыдущих QМПД для блоковых кодов. Модель этого декодера показала производительность 84 Кс/с. Это и сама по себе высокая производительность, но она особенно значима в свете высокой достоверности и рекордного уровня шума, при котором работает этот QМПД. К этому можно добавить, что в сильно шумящем канале на обычном ПК при работе с типичными четырехбайтовыми символами скорость декодера достигает величины 32*84=> ~2,7 Мбит/с. Ещё раз также обратим внимание на то, что программная модель нереализуемого на практике декодера длинного кода РС при существенно меньшем шуме работала в 200 раз медленнее (~400с/с). А по сравнению с сопоставимым по эффективности вторым блоковым QМПД этот декодер длинного кода РС оказывается уже в ~750 раз менее быстрым. При этом важно, что структура декодера кода РС очень сложна, а все виды аппаратных МПД декодеров на 99% состоят из обычной памяти и, как было показано выше, выполняют только простейшие операции.

В настоящее время не существует никаких алгоритмов для недвоичных кодов, которые хотя бы могут приблизиться к возможностям этого свёрточного QМПД по эффективности и быстродействию. На ресурсе [14] можно найти демо программу для символьного МПД при R=19/20. **Он работает на скорости более 40 Мбит/с.** Вопросы дальнейшего ускорения работы символьных МПД рассматривались и были успешно разрешены в [6,7], что позволило дополнительно повысить их скорость работы в 3-5 раз.

Символьные коды до сих пор неизвестны за рубежом. Опубликованные впервые более 30 лет назад символьные коды [2,4,6-8,14,24,25] пока не имеют ни одной развивающей их далее публикации в России или за рубежом. Мы полагаем, что среди множества причин этого может быть совершенно особая идеология и весьма новая математика оптимизационной теории, ранее не существовавшая в работах зарубежных и российских специалистов по кодированию. Новые важнейшие результаты по символьным кодам изложены в [2,6,7,14,18-21]. Эта тематика продолжает активно развиваться и сейчас.

4. Стирающие каналы

Обратимся ещё к одной области теории кодирования, которая является уникально простой и удобной для исследований и получения содержательных результатов. Однако до применения к ней методов МПД - мы имеем в виду стирающие каналы - результаты в этой области были крайне скромны у всех методов [2,5,14-16]. Основной причиной этого было, конечно, гораздо большее внимание специалистов именно к каналам с ошибками. Собственно поэтому исследования декодеров для стирающих каналов были как бы в тени, а их характеристики далеки от допускаемых теорией пределов эффективной работы этих алгоритмов. Ограничимся только кратким рассмотрением тех характеристик МПД, которые получены недавно и представлены на рис.3.

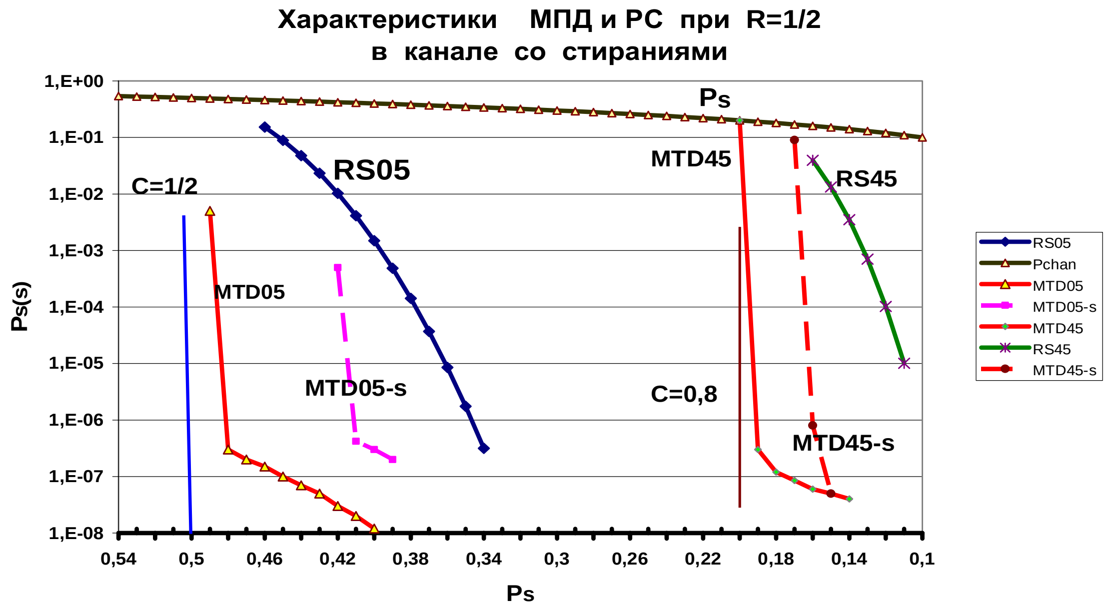

Рис.3. Характеристики МПД и декодеров кодов РС в стирающих каналах

Для сравнения на нём приведены также графики возможностей по восстановлению стираний для кодов РС длины n=256 символов при R=1/2 (RS05) и R=4/5 (RS45).

Для восстановления стираний методами МПД [2,14-16,37] при R=1/2 был построен код с особенно малым группированием ошибок и стираний после декодирования с минимальным кодовым расстоянием d=21. Задержка принятия решения равна ~70000 информационных символов, длина кодового ограничения n_A=136000 кодовых символов, а число итераций восстановления стираний не превышает i=90. Этот МПД, как следует из графика его эффективности MTD05, восстанавливает поток стёртых символов канала с вероятностью стираний 0,48 до уровня вероятности невосстановленных символов $P_s(s)$~$3*10^{-7}$. Как известно, для каналов с независимыми стираниями пропускная способность C=1-Ps , где Ps - вероятности стирания в канале. Таким образом, МПД алгоритм демонстрирует свою успешную работу при отношении R/C~0,96, что является уникальным достижением для алгоритмов восстановления стираний. При этом скорость работы МПД равна 95Кс/с.

Отметим, что код РС при столь высоком уровне искажений канала, как это видно из графика RS05 для этого кода при R=1/2, совершенно неработоспособен, что не требует обсуждения скорости работы декодера для этого кода РС. Отметим, что даже небольшое улучшение качества канала, как и при исправлении ошибок, сильно уменьшает размеры МПД и повышает его и так достаточно высокое быстродействие. В частности, МПД свёрточного кода для $P_s \lesssim 0{,}4$, отмеченный на рис.3 как MTD05-s, оказывается уже в 7 раз более быстрым, чем первый декодер, потому что ему требуется почти в 5 раз меньшее число итераций, а его задержка - в 9 раз меньшая. Подчеркнём, что остаточная доля невосстановленных символов у второго гораздо более простого МПД также на много десятичных порядков меньше, чем у кода РС.

Рассмотрим возможности методов исправления стираний для высокоскоростных кодов при R=4/5, которые представлены на правой части рис.3. Кривая RS45 соответствует коду РС, а вертикаль C=0,8 показывает значение пропускной способности при P_s=0,2. Рассмотрим возможности МПД декодера, обозначенного как MTD45. Он восстанавливает исходный цифровой поток с долей стёртых символов $P_s \lesssim 0{,}19$ до уровня оставшихся невосстановленных символов $P_d(s)<5*10^{-7}$ при i=180 итерациях декодирования с задержкой ~2 Мс (миллионов символов). Самое главное, что для этого декодера **справедливо отношение R/C=0,8/0,81≈0,988**, что абсолютно не доступно для других алгоритмов, в том числе и представленного на рис.3 кода РС, график RS45. Очевидно, что столь непосредственная близость параметров R и C неизбежно влечёт для этого кода его большую длину, что и было указано выше. При этом **МПД имеет очень высокую скорость, около 300Кс/с**. А если размер стёртых символов меняется, то алгоритм МПД, не меняющий скорость работы демо программы на обычных ПК, при изменении размера алфавита в пределах до 4 байтов увеличивает скорость декодирования до 32*300Кс/с= =9600Кб/с≈9,6Мб/с. При этом сложно указать какие-либо другие методы, которые будут работать при столь большом уровне шума так же быстро.

График MTD45-s показывает возможности МПД алгоритмов при R=4/5 и весьма небольшом снижении уровне шума. Как и в случае этого же алгоритма при R=1/2, оказывается, что вносимая задержка декодирования и число итераций коррекции ошибок уменьшаются в 5 - 7 раз, а скорость работы увеличивается не менее, чем в 3 - 4 раза. И это тоже на несколько десятичных порядков по итоговой достоверности лучше, чем у кодов РС.

Основной вывод по этому разделу состоит в том, что и в стирающих каналах алгоритмы **МПД тоже не имеют равных** по простоте реализации и эффективности декодирования.

5. Высокоскоростные коды

Укажем далее, что разработки МПД к настоящему времени выполнены для уже достаточно широкого диапазона кодовых скоростей. В частности, все свойства МПД и их соотношение с возможностями других алгоритмов, сохраняются и в области кодовых скоростей порядка R~4/5. Это позволяет рекомендовать методы МПД для самого широкого применения. Например, в [3,20-21,28] рассмотрены методы высокоскоростного МПД декодирования при R=4/5 для оптических каналов, полученные нашей научной школой и зарубежными авторами, которых мы консультировали. Результаты российских исследователей были существенно лучше по энергетической эффективности и простоте реализации МПД алгоритмов.

Приведенные выше сведения по символьным кодам и стирающим каналам также хорошо подтверждают высокие характеристики МПД при R≈0,75 и выше.

6. Декодеры для флеш памяти

Наконец, укажем, что нами успешно завершена разработка методов декодирования для ненадёжной флеш памяти. Специфика этой проблемы состоит в том, что вероятность ошибки на бит для таких систем должна быть не хуже $P_b(e)\sim10^{-15}$, в то время как вероятность ненадёжного хранения символов может быть на уровне 10^{-3} и даже существенно большем. Найденные нами технические решения на основе МПД алгоритмов позволили довольно просто решить эту проблему [17,20]. При этом использовался код с МПД декодированием при R=3/4, который гарантированно позволял обеспечить требуемые уровни достоверности при вероятности ненадёжного хранения $\sim10^{-2}$. Столь же простые и одновременно эффективные результаты по сверхдостоверному декодированию у других разработчиков нам неизвестны.

7. Об эволюции современной теории кодирования

Вышеизложенные результаты и сопоставление основных методов декодирования помехоустойчивых кодов позволяют прийти к выводу, что современная нам теория кодирования последние десятилетия находилась в кризисной стадии, аналогичной завершению основного периода развития классической физики в конце XIX века. К этому времени неразрешимые на основе методов "старой физики" проблемы излучения абсолютно чёрного тела, фотоэлектронной эмиссии, а также особенностей описания многих других явлений стали серьёзными препятствиями для развития физики, поскольку они показывали наличие важного несоответствия взглядов науки на физику нашей части Вселенной и её реальных свойств. Великие физики начала XX века ввели ряд постулатов и открыли новые уравнения, описывающие наш мир. Многие из них за эти работы стали нобелевскими лауреатами.

Теория кодирования прошлого века предложила ~30 лет назад последнюю **хорошую каскадную схему с АВ и кодами РС**. Но затем даже технологические революции в элементной базе не помогли указать достаточно устойчивые и реально перспективные направления дальнейшего развития техники кодирования. Турбо коды, как оказалось, были сложны и нетехнологичны, а низкоплотностные коды (LDPC) дают неплохие результаты, но трудно реализуемы на больших скоростях. Кроме того, заметные трудности у этих методов возникают при их использовании со свёрточными кодами. Ещё больший **уровень кризисности характеризует тематику недвоичных кодов,** для которых за 50 лет развития ничего лучше коротких кодов РС вообще создано не было.

7. Роль ОТ в исследованиях и разработках теории кодирования

Оптимизационная теория и её Основная Теорема МПД [1,2,12,28], а также символьные коды, теория размножения ошибок и другие ключевые результаты нашей научной школы полностью **преобразили всю идеологию и технологию декодирования** для каналов спутниковой связи, систем ДЗЗ и других проектов. Эти новые подходы на несколько десятичных порядков снизили сложность открытых теорией итеративных мажоритарных алгоритмов по сравнению с другими и повысили их энергетическую эффективность до оптимального уровня, ранее доступного только переборным методам. **Строгое стремление** (приближение!) алгоритма МПД на всех шагах коррекции символов **к оптимальному решению** при линейной от длины кодов сложностью реализации, гарантируемое Основной Теоремой, правильная коррекция ошибок далеко за половиной кодового расстояния в символьных кодах и другие важнейшие принципы разработок этих алгоритмов выполнили для теории кодирования такую же роль, как и **новые постулаты квантовой механики.** Это позволяет считать, что усилиями российской научной школы по теории кодирования преодолён долговременный кризис этой теории, а на основе масштабной идеологической революции, сменившей значительную часть основных парадигм "старой" теории кодирования, созданы условия для её развития на совершенно новых принципах. Можно сказать, что **в теории кодирования сформирована своя "квантовая механика".** Она тоже пока что довольно сложна для восприятия и развития, но при этом и крайне плодотворна, о чём свидетельствуют её результаты, частично представленные также и в предыдущих разделах нашей статьи. Других путей успешного развития теории кодирования пока нет.

8. Поддержка оптимизационной теорией новых технологий кодирования

Новый уровень развития теории МПД алгоритмов и ОТ позволяет охарактеризовать текущую ситуации в теории информации как переход теории помехоустойчивого кодирования и её технологий разработки новых методов декодирования в новую более совершенную фазу эволюции развития на основе оптимизационной теории. Как показывает наш опыт, она уже сейчас обеспечивает достижение новых высот в столь трудной для исследований и важной для техники связи сфере. Её применение уже позволило обратить внимание специалистов на новые возможности методов кодирования, обеспечивающие эффективную работу декодеров с линейной от длины кодов сложностью в каналах с большим уровнем шума, обеспечивая при этом эффективность коррекции ошибок, соответствующую оптимальному (переборному!) декодированию. В первую очередь к важнейшим новым методам следует отнести **использование принципов дивергентного кодирования** [26,27]. Он состоит в некаскадном постепенном увеличении кодового расстояния применяемых кодов.

Другое новое масштабное направление в прикладной теории кодирования создано совместным применением двоичных и символьных МПД совместно с АВ алгоритмом, в том числе и блоковой модификации (БАВ) [35,36], которые образуют небольшую, но чрезвычайно эффективную **группу методов с прямым контролем метрики**. Как известно, только эти алгоритмы характеризуются тем, что они точно измеряют расстояние своих решений до принятого сообщения. Именно этим их свойством и определяется высочайшая эффективность указанных методов в каналах с большим уровнем шума. Все прочие известные методы или вообще не оценивают этот главный параметр декодирования (алгебраические алгоритмы), или вычисляют только некоторые относительно полезные функции от этих расстояний, что весьма усложняет их работу и уменьшает эффективность (турбо, LDPC и др.). Именно это обстоятельство определяет важность группы методов прямого контроля метрики, у которых есть большие перспективы развития, в том числе и при совместном применении.

Некоторые из этих новых подходов к разработкам алгоритмов декодирования уже были использованы при получении результатов. изложенных в предыдущих разделах этой статьи.

9. О научном обмене и образовательном процессе

Авторы понимают свою ответственность как мировых лидеров за разработку эффективных методов кодирования и продолжат свои усилия по дальнейшему развитию порталов ***www.mtdbest.ru*** и ***www.mtdbest.iki.rssi.ru***, содержащих более 300 блоков данных каждый, включающих полезные научные, методические и учебные материалы. На них представлено также и множество демопрограмм всех популярных в настоящее время алгоритмов коррекции ошибок почти десятка типов. Эту трудную работу в образовательной деятельности не ведёт пока ни один тематический научный коллектив. Несомненно, что указанные большие двуязычные порталы будут и дальше способствовать быстрому развитию оптимизационной теории и техники кодирования в нашей стране и за рубежом.

Крайне значимым критерием признания оптимизационной теории во всём научном мире является статистика посещений наших порталов читателями. Ежегодно их просматривают около 100'000 пользователей сети из более, чем 90 стран мира. Появляются и зарубежные статьи по этой тематики, но их число пока невелико.

Мы как лидеры оказываем поддержку некоторым своим коллегам, но зарубежье слишком сильно погрузилось в разработку тупиковых направлений техники декодирования, относящихся к "старой физике". Поэтому теоретическое освоение и получение прикладных результатов на основе оптимизационной теории у зарубежных коллег отстаёт от российских достижений, возможно, на 10-15 лет, хотя большинство наших публикаций переводится или изначально печатается на английском. Более того, некоторые наши результаты, опубликованные более 30 лет назад, в частности, как отмечалось выше, по символьным кодам, до сих пор не имеют вообще никакого отклика из зарубежья, хотя касаются принципиальных научных и актуальнейших прикладных проблем теории кодирования, которые там решают очень сложными методами.

10. Наши благодарности и выводы

Принципы ОТ позволил создавать МПД декодеры, которые на три и более порядков повышают достоверность результатов декодирования при одновременно примерно на столько же более высокой скорости работы по сравнению с другими алгоритмами коррекции ошибок. Парадигмы ОТ расширяют возможности алгоритмов декодирования, повышают быстродействие и эффективность методов МПД и других алгоритмов, применяемых вместе с ними в дивергентных и иных новых схемах кодирования для каналов с большим уровнем шума.

Таким образом, представленные выше результаты позволяют сделать вывод об успешном вполне реализуемом технологическом решении сложнейшей проблемы достоверной связи при уровне шума, соответствующем непосредственной близости к пропускной способности канала С, которая была поставлена 70 лет назад великим Клодом Шенноном.

Исследования в области Оптимизационной Теории кодирования за истекшие 40 лет её развития поддерживали: МФТИ, ИППИ РАН, концерн "Созвездие", Совет по кибернетике АН СССР, ОНИТ РАН, РГРТУ, НИИ Радио, МНИТИ, ИКИ РАН. Методы МПД тестировали ООО "ОРТ", НПО им. С.А. Лавочкина, а также ряд организаций и предприятий отрасли связи. Ценность финансовой поддержки разработки методов МПД со стороны РФФИ также была исключительно велика (гранты 14-07-00859, 14-07-00824, 08-07-00078 и 05-07-00024). Мы полагаем, что число наших последователей и сторонников, как и раньше, будет быстро расти, а новые сферы исследований и разработок с использованием парадигм "квантовой теории кодирования" и технологий декодирования будет стремительно расширяться.

Многие ссылки по статье можно найти на ресурсе **www.mtdbest.ru** [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. В.В. Золотарёв. Субоптимальные алгоритмы многопорогового декодирования. // Докторская диссертация. М.,1990, 278 с.

2.. В.В. Золотарёв, Ю.Б. Зубарев, Г.В. Овечкин. Многопороговые декодеры и оптимизационная теория кодирования. // Под редакцией академика РАН В.К. Левина. М., «Горячая линия – Телеком», 2012, 238 с.

3. В.В. Золотарёв. Г.В. Овечкин. Применение многопороговых методов декодирования помехоустойчивых кодов в высокоскоростных системах передачи данных. - // "Электросвязь, М., 2014, №12, с.10-14.

4. Кузнецов Н.А., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Недвоичные многопороговые декодеры и другие методы коррекции ошибок в символьной информации // Радиотехника, №6, вып. 141, 2010, с. 4–9.

5. Месси Дж. Пороговое декодирование // Пер. с англ. Ю.Л. Сагаловича под ред. Э.Л. Блоха – М.: Мир, 1966. 208 с.

6. Овечкин Г.В. Теория каскадного декодирования линейных кодов для цифровых радиоканалов на основе многопороговых алгоритмов. Докторская диссертация. Рязань, 2011. 301 с.

7. Овечкин П.В. Разработка алгоритмов повышения эффективности недвоичных многопороговых декодеров в системах передачи и хранения больших объемов информации. Кандидатская диссертация. Рязань, 2009,131 с.

8. Zolotarev V.V., Averin S.V. Non-Binary Multithreshold Decoders with Almost Optimal Performance – 9-th ISCTA’07, July, UK, Ambleside, 2007.

9 Averin S.V., Ovechkin G.V., Zolotarev V.V. Algorithm of Multithreshold Decoding for Self-Orthogonal Codes over Gaussian Channels – 11-th ISCTA’09, July, UK, Ambleside, 2009.

10. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Дивергентное кодирование свёрточных кодов // Материалы 18-й Международной научно-технической конференции "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций", 2015, с. 27–32.

11. А.с СССР № 492878.

12. Самойленко С.И., Давыдов А.А., Золотарёв В.В., Третьякова Е.Л. Вычислительные сети. М., «Наука», 1981, 278 с.

13. Патент РФ №2377722.

14. Ресурсы ***www.mtdbest.ru*** и ***www.mtdbest.iki.rssi.ru*** .

15. Золотарёв В.В. Многопороговое декодирование в стирающих каналах. - Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ, вып. 10, 1983, с.67-70.

16. Гринченко Н.Н., Золотарёв 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.

17. Овечкин Г.В., Золотарев В.В., Федиов В.С. Повышение достоверности хранения цифровых данных на флеш памяти // Материалы 6-й Международной научно-технической конференции «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». – Рязань, 2013. с. 201–203.

18.. Овечкин Г. В., Као В. Т. Многопороговые декодеры для гауссовских каналов // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании. Материалы 19-й Всероссийской научно-техн. конф. – Рязань: РГРТУ, 2014. С. 121 – 122.

19. Гринченко Н.Н., Као В.Т., Овечкин Г.В. Повышение эффективности многопорогового декодера // Материалы 17-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2015», Москва, 2015.

20. Zolotarev V., Ovechkin G., Satybaldina D., Tashatov N., Adamova A., Mishin V. Effective multithreshold decoder for optical and other data transmission systems. // Latest trends on Communications: Proceedings of the 18th International Conference on Communications (part of CSCC'14). – Santorini Island, Greece, 2014, pp. 152-156.

21. Zolotarev V., Ovechkin G., Satybaldina D., Tashatov N., Adamova A., Mishin V. Efficiency multithreshold decoders for self-orthogonal block codes for optical channels. // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing – 2014, Vol.8. pp.487–495.

1. Sudan M. Decoding of Reed Solomon codes beyond the error-correction bound // Journal of Complexity, 1997, vol.13, pp.180–193.

23. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник. М., «Горячая линия – Телеком», 2004, 126 с.

24. Золотарёв В.В. Многопороговое декодирование в недвоичных каналах. - Вопросы радиоэлектроники, серия ЭВТ, вып.12, 1984, с.73-76.

25. Золотарёв В.В. Алгоритмы коррекции символьных данных в вычислительных сетях. - В сб.: "Вопросы кибернетики", ВК-105, АН СССР, Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика», М., 1985, с.54-62.

Дополнительная литература

26. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Дивергентное кодирование свёрточных кодов // Материалы 18-й Международной научно-технической конференции "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций", 2015, с. 27–32.

27. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Ташатов Н.Н. Применение принципа дивергенции при декодировании свёрточных кодов. // В сб.: III Международная научно-практическая конференция «Информационная безопасность в свете Стратегии Казахстан-2050»(РК), 2015, с.158-164.

28. V.V. Zolotarev, Y.b. Zubarev, G.V. Ovechkin. Optimization Coding Theory and Multithreshold Algorithms. // Geneva, ITU, 2015, 159.
(ссылка на e-book: http://www.itu.int/pub/S-GEN-OCTMA-2015)

29.. Zolotarev V., Ovechkin G., Satybaldina D., Tashatov N., Adamova A., Mishin V. Efficiency multithreshold decoders for self-orthogonal block codes for optical channels. // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing – 2014. Vol.8. pp.487–495.

30. В.В. Золотарёв, Р.Р. Назиров. Блоковая модификация алгоритма Витерби // Одиннадцатая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", тезисы докладов, ИКИ РАН, М., 2013.

31. В.В. Золотарёв, И.В. Чулков. Малоизбыточное кодирование для высокоскоростных каналов // Одиннадцатая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", тезисы докладов, ИКИ РАН, М., 2013.

32. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Назиров Р.Р., Овечкин П.В., Чулков И.В. Эффективное недвоичное многопороговое декодирование помехоустойчивых кодов для систем дистанционного зондирования Земли // «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Сборник статей, ИКИ РАН, 2010, Том. 7, №2, с. 269–274.

33. Золотарёв В.В., Назиров Р.Р., Никифоров А.В., Чулков И.В. Новые возможности многопорогового декодирования по высокодостоверной передаче данных ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. Сборник научных статей. Выпуск 6. Том I. Москва, ООО «Азбука-2000», 2009, с.167–173.

34. Золотарёв В.В., Назиров Р.Р., Чулков И.В., Овечкин Г.В. Алгоритмы МПД // Российский космос. №1, 2009. с. 60–63.

35. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Характеристики блоковых реализаций алгоритма Витерби. // Вестник РГРТУ, 2017, №1, с.34-39.

36. В.В. Золотарёв, П.В. Овечкин. Способ кодирования и декодирования блокового кода с использованием алгоритма Витерби. // Патент РФ №2608872 от 25.01.2017 г.

37. В.В. Золотарёв. Способ обнаружения и исправления стираний при приёме дискретной информации. Патент РФ №2611235 от21.02.2017 г.