

Введение

Быстрое развитие методов помехоустойчивого кодирования требует от специалистов по цифровым технологиям интенсивного освоения всё более эффективных алгоритмов декодирования, обеспечивающих наиболее простое достижение высокой достоверности передачи и хранения информации при большом уровне шума, что всегда и нужно для реализации максимального к.п.д. дорогих каналов связи в различных системах и цифровых сетях.

За два десятилетия после издания первого в нашей стране справочника по кодированию [1] в технологиях исправления ошибок произошли теперь уже очень глубокие принципиальные изменения. За это время сначала были неплохо изучены турбо коды, а затем и обновлённые алгоритмы для низкоплотностных (LDPC) кодов. Их главным достоинством стала демонстрация уже реальной возможности работы новых декодеров при большом относительном уровне шума канала связи. Но всё же реализация и этих кодовых систем оказалась слишком сложной. Обо всём этом можно прочесть в наших обзорах по теории и технологиям кодирования в ведущих журналах отрасли связи России, материалах конференций ДСПА и в архивах публикаций на наших сетевых порталах <https://decoders-zolotarev.ru>, www.mtdbest.ru и www.mtdbest.iki.rssi.ru.

Для улучшения доступности материалов по Оптимизационной Теории (ОТ) в этом Справочнике-2 мы указали в «Списке литературы» максимально возможное число гиперссылок, которые позволяют сразу увидеть многие из тех статей, обзорных докладов и монографий, про которые есть упоминания в тексте. Мы вскоре дадим на странице «Наши книги» именного сетевого портала <https://decoders-zolotarev.ru> и, наверное, www.mtdbest.ru в её нижней части вместе с другими материалами некоторые фрагменты и полный список литературы данного Справочника-2, что обеспечит простой и вполне удобный доступ к его гиперссылкам непосредственно с компьютеров читателей.

Мы предлагаем сразу определиться и в том, что далее в этом справочнике вообще не обсуждаются никакие коммерческие разработки высокотехнологичных фирм, выпускающих аппаратуру помехоустойчивого кодирования. Мир производителей цифровой техники живёт по своим особым строгим законам.

Что же касается исследований и разработок перспективного научно-технического и технологического плана, то и в период временной увлечённости специалистов указанными выше, а также некоторыми другими методами кодирования, научной школой Оптимизационной Теории (ОТ) помехоустойчивого кодирования было продолжено создание всё более эффективных алгоритмов с простейшей реализацией и наилучшими возможными параметрами итоговой достоверности при большом уровне шума. Их можно найти в первом справочнике и монографиях [1-9], свободно доступных на наших сетевых порталах.

Самое первое ознакомление с ОТ вполне возможно по нашему совсем небольшому цветному буклету [21] с предисловием академика РАН

Н.А. Кузнецова. В нём кратко изложены идеи и технологии ОТ, позволяющие далее успешно читать и другие публикации по ОТ. Свободный стиль изложения этого буклета подкрепляется большим списком серьёзных монографий и статей, многие из которых сразу доступны по гиперссылкам. Однако необходимость аккуратного изучения простой, но очень необычной ОТ, требует сосредоточенного внимания к её первоисточникам и ко всему весьма необычному по своей тональности опыту нашей научной школы ОТ, заменившему теперь всю предыдущую теорию кодирования (ТК).

Процедуры МПД уже в течение ~40 лет являются самыми простыми из всех методов декодирования, поскольку сложность N этих мажоритарных итеративных алгоритмов растёт лишь пропорционально длине применяемых кодов n : $N \sim n$, причём, в абсолютном большинстве случаев такие МПД декодеры достигают оптимальных решений используемых достаточно длинных кодов, которые ранее были доступны только алгоритмам с полным экспоненциально сложным от длины кода перебором. Другие методы с таким теоретически минимально возможным объёмом вычислений при уровне достоверности оптимальных декодеров (ОД) в ТК неизвестны. Более того, эти свойства наши методы сохраняют даже вблизи пропускной способности классических каналов связи, рассматриваемых теорией кодирования.

Столь важные особенности наших алгоритмов являются главными причинами и в том отношении, что в литературных ссылках в конце этого Справочника-2 достаточно мало авторов, не относящихся к школе ОТ. Появление новых хороших алгоритмов, созданных другими научными группами, несомненно, будет отличным поводом для включения ссылок на публикации таких авторов и групп в последующие переиздания новых справочников, а также в наши обзоры, регулярно публикуемые научной школой ОТ. Другие полезные ссылки общего плана можно найти в [1]. Мы будем приветствовать и обзорные публикации любых авторов, которые сумеют сохранить в своих обзорах одобрительное отношение к реальным полезным достижениям других коллективов специалистов, как мы будем надеяться при этом, - и к нашим.

Ещё одним неоправданно редко упоминаемым достоинством ОТ является то, что все разрабатываемые в рамках этой теории алгоритмы выполняют только вычисления с фиксированной запятой, т. е. с небольшими целыми числами, чего не могут себе позволить многие другие методы декодирования. Как показывают оценки, а также опыт создания и сопоставления разных методов, все остальные достаточно эффективные алгоритмы реализуются только при обязательном использовании и вычислений с действительными числами. Но они в этом случае оказываются ещё до 20÷30 раз более трудной задачей при создании таких декодеров на ПЛИС и некоторых других быстродействующих аппаратных платформах [39]. Конечно, такие алгоритмы можно упрощать. Но это ведёт к ухудшению их характеристик декодирования, существенно увеличивая при этом и без того уже немалое преимущество перед ними декодеров ОТ и МПД. Однако какие-либо данные по этому вопросу в научной периодике обычно не публикуются.

Подчеркнём снова, что МПД декодеры, кроме минимально возможной сложности, обеспечивают ещё и очень малые вероятности ошибки на выходе, которые близки или просто совпадают с наилучшими возможными переборными оптимальными декодерами (ОД). Но, оказывается, для этого нужно выбирать только очень особые мажоритарно декодируемые коды, которые на самом деле позволяют достигать именно таких оптимальных решений даже при весьма высоких относительных уровнях шума канала. Не следует также забывать, что для этого ещё необходима и очень аккуратная настройка, оптимизация параметров целого ряда элементов МПД, что, однако, совершенно не увеличивает сложности самих декодеров, т. е. числа выполняемых ими операций. Как показано в [3-9], совокупность параметров триединого критерия ПДС $\equiv$ «помехоустойчивость-достоверность-скорость» для алгоритмов МПД в настоящее время стала такой, что их уровень для уже очень многих кодовых кластеров (совокупности типичных наборов параметров кодов, декодеров и каналов) соответствует успешному решению главной проблемы, поставленной более 70 лет назад К. Шенноном: - высокодостоверному оптимальному декодированию с минимальной сложностью в непосредственной окрестности пропускной способности канала связи. Таким образом, новая вторая часть справочника школы ОТ, т. е. данный Справочник-2 теперь рассматривает уже конкретные методы и технологии, на основе которых в ОТ полностью решена указанная выше великая проблема Шеннона.

Из указанных выше публикаций следует, что ещё в 1984-85 гг., когда, наконец, была создана полная теория символьных недвоичных кодов и тем самым окончательно завершена вся формально-теоретическая компонента ОТ, уже фактически тогда ушедшая с полей науки прежняя классическая алгебраическая теория кодирования с несколькими её смежными направлениями превратилась в историческом аспекте в подготовительный этап к реальному технологически доступному решению на единых общих принципах проблемы декодирования вблизи пропускной способности для четырёх главных классов цифровых каналов, рассматривавшихся в течение всех предшествующих лет той малоуспешной теорией кодирования.

Все эти обстоятельства и явились основанием для подготовки данного Справочника-2, фактически второй части справочника [1], его современного продолжения. По мере предъявления тех или иных характеристик МПД алгоритмов мы будем для удобного сравнения разных методов показывать также и возможности некоторых других алгоритмов, в частности, открытого и запатентованного нами блочного алгоритма Витерби (БАВ). Вместе с тем, в связи с очень ограниченным размером данного справочника (в отличие от других четырехсотстраничных пособий по теории кодирования для ВУЗов, которые не дают вообще никаких конкретных схем, алгоритмов и параметров декодеров по критерию ПДС, см. [13]) многие вероятностные и прочие характеристики различных известных методов кодирования читатели Справочника-2 могут проверить и по первому вполне содержательному справочнику [1], по нашим свободно доступным монографиям [3-9], а также

по сведениям об ОТ на наших порталах <https://decoders-zolotarev.ru> , www.mtdbest.ru и www.mtdbest.iki.rssi.ru [20]. Кроме множества книг, статей и технологий, там представлен ещё и широкий спектр программных макетов различных методов коррекции ошибок, как созданных на основе ОТ, так и не относящихся (!!!) к нашим алгоритмам. Весь софт за 50 лет развития ОТ написан нами в своём итоговом формате под ОС Windows на C++.

Из-за краткости содержания всех разделов данного пособия читателям также будет очень полезно ознакомиться с первоначальными главами хотя бы одной из книг [3-6], так как изложение исключительно простых, но до некоторой степени всё же не совсем привычных идей Оптимизационной Теории весьма сильно отличается от бывшего как бы "классического" стиля описания систем коррекции ошибок в «предыдущей» ТК, чрезвычайно переполненной математикой. Понимание оригинальности многих принципов теории ОТ, которая подтверждается десятками патентов нашей научной школы, многими поколениями аппаратуры кодирования [4(с.200)], макетами декодеров [5(с.148),6(с.173),21(с.24)] и рядом основных диссертаций [17,19,42,72] по этой тематике, будет очень полезным при рассмотрении свойств конкретных крайне простых и высокоэффективных схем, которые анализируются далее. Но для этого нужно будет всё же приложить определённые усилия и проявить настойчивость в правильной оценке новизны ОТ, что затем обязательно окупится сторицей.

Отдельно отметим, что мы нигде не рассматриваем задач декодирования списком. Такая постановка характерна для слабых кодов и плохих неэффективных алгоритмов. Наши методы, обычно не уступающие по достоверности оптимальным декодерам (ОД), не требуют использования списков, изначально полностью разрушающих классическую постановку задачи о декодировании с малой вероятностью ошибки. Эта проблема детально обсуждается в наших разных обзорах, в частности, в [25].

Популярные при анализе очень слабых алгоритмов контрольные суммы размером до $2 \div 4$ байтов, как хорошо известно, относятся к методам каскадирования и действительно несколько улучшают характеристики декодирования, что и свойственно всегда каскадированию во всех его видах [15,42,72]. Но довольно часто этот эффект разными авторами как бы скрывается и преподносится как достоинства именно самих новых кодов и декодеров. Эти ситуации «скрытой» поддержки слабых кодов средствами каскадирования следует отличать от реальной эффективности самого какого-то нового базового метода. Мы не будем далее останавливаться на этом вопросе.

У нас пока не сформировалось отношение к ранговым кодам [90]. Возможно, они скоро станут самостоятельным направлением. Время покажет.

Коллектив сторонников ОТ удостоен премии Правительства РФ по науке и технике, Золотой медали Европейского союза (ЕС) "За исключительные достижения", которая присуждается учёным Европы только за очень особые заслуги. ИКИ РАН награждён за патент нашей школы Золотой медалью Международного салона изобретений. Школа ОТ опубликовала англоязычную

монографию, изданную Международным союзом электросвязи (МСЭ/ITU) (организация под эгидой ООН!) после её строгой экспертизы в юбилейном для МСЭ 2015 году [7]. Ещё две несколько различных по размерам книги по ОТ, также подготовлены для англоязычных читателей на порталах www.mtdbest.ru и <https://decoders-zolotarev.ru> на страницах «Books/Наши книги» [8,9].

В 1 Главе Справочника-2 сначала изложены основы метода порогового декодирования (ПД) на примере двоичного симметричного канала без памяти (ДСК) при использовании линейных кодов, как это предложил автор пороговых декодеров крупнейший американский учёный Дж. Мессе [14]. Затем описаны методы порогового декодирования для недвоичных кодов с мажоритарным декодированием, которые названы нами символьными. Эти методы почему-то совершенно неизвестны среди других групп исследователей прикладных проблем теории кодирования. Там же кратко изложены простые методы исправления стираний.

Далее во второй главе представлены методы собственно многопорогового декодирования (МПД) для ДСК, которые характеризуются уникальным свойством стремления их результатов к решению оптимального (переборного!) декодера (ОД), но при собственной всего лишь линейной от длины кода сложности. Эффективность таких декодеров весьма сильно зависит от свойств используемых кодов, которые должны быть отобраны по весьма жёстким, но очень понятным критериям минимальной подверженности эффекту размножения ошибок (РО) [2-4,5(с.95),6(с.104),7,8,20,21]. Будут рассмотрены также МПД алгоритмы для гауссовских, недвоичных (символьных) и стирающих каналов. Для декодеров МПД во многих случаях будут указываться их скоростные характеристики на конкретных ноутбуках и прокомментированы методы, улучшающие их возможности.

В третьей главе рассмотрен эффект размножения ошибок (РО) и способы построения кодов с малым уровнем подверженности этому эффекту. Подчеркнём, что без успешного разрешения проблем РО характеристики алгоритмов МПД вообще никогда не смогли бы соответствовать тем жёстким требованиям критерия ПДС, которые сейчас реально позволили решить проблему Шеннона в полном объёме. Там же представлена демопрограмма конструирования соответствующих кодов с малым уровнем подверженности влиянию РО, а также программная платформа для моделирования работы алгоритмов МПД с такими специальными кодами!

В главе 4 рассмотрены главные парадигмы Оптимизационной Теории: параллельное каскадирование, символьные и каскадные коды, дивергентные схемы, методы коррекции ошибок во флеш памяти и другие уже давно успешно решённые задачи и средства, используемые в технологиях ОТ.

В главе 5 представлены свёрточный и блочный алгоритмы Витерби (БВ), показаны их существенно расширившиеся возможности при работе в АБГШ и ДСК каналах. Их характеристики можно проанализировать с помощью соответствующих демонстрационных программных платформ.

В главе 6 анализируются итоговые системные вопросы ТК. Там есть рекомендации и требования к сфере разработок в области ТК, а также наше понимание проблем очень трудного выживания этой важнейшей и очень сложной науки цифрового мира.

Краткое заключение выражает надежду школы ОТ на успешное использование материалов справочника и прогресс теории ОТ в будущем.

Небольшая подборка полезных справочных сведений в приложениях помогает процессам решения типичных задач создания конкретных декодеров.

Материал всех глав Справочника-2 поддерживается программным обеспечением (ПО) школы ОТ, которое можно переписывать на свои компьютеры и осваивать в свободном режиме самостоятельно или обращаясь к нашим сетевым порталам, а также к другим сторонникам научной школы ОТ. Подчеркнём уже в который раз, что без понимания роли программного обеспечения (ПО) и без умения моделировать в ТК делать совершенно нечего.

В различных разделах этого справочника, особенно в 6 главе, постоянно обсуждаются требования к ПО, создание которого необходимо для дальнейших работ в сфере проектирования реальных методов декодирования при большом уровне шума. Все эти требования и программы их реализации достаточно непросты. Написание и отладка таких комплексов, обслуживающих теорию ОТ и её прикладные разработки, могут занимать многие месяцы даже у опытных программистов, понимающих задачи теории кодирования. Но это является следствием того, что реальные проблемы прикладной теории кодирования, как мы уже многократно отмечали, не имеют никакого отношения к математически решаемым задачам и, следовательно, к каким-либо формульным аналитическим представлениям конечных результатов разработок в ТК для большого уровня шума. Задача определения параметров любых созданных алгоритмов декодирования решается лишь на основе хорошо поставленных полномасштабных экспериментальных моделей программного или аппаратного типа.

Это несколько жёсткое отношение к проблемам декодирования и моделям алгоритмов абсолютно невозможно отспорить, поскольку даже простейшая задача вычисления вероятности ошибки декодирования кодового блока для самого обычного порогового декодера Мессе в ДСК не имеет аналитического формульного представления. А для случая больших вероятностей ошибки в ДСК невозможно дать для выходной вероятности ошибки такого декодера даже приблизительных оценок. И таких обозримых формул для сложности и вероятности ошибки декодирования достаточно эффективных алгоритмов, как мы это уже давно понимаем, не будет никогда! Это надо было очень давно принять как аксиому.

О соотношении самых общих свойств алгоритмов для блочных и свёрточных кодов можно прочесть в [3-9], а также в [10,11,23-26,28,53-57]. Там же даны и ссылки на другие фундаментальные публикации по этой тематике. Но при использовании алгоритмов ОТ важно понимать, что большинство общетеоретических результатов ОТ даже не различает свёрточные и блочные коды. Однако некоторые конкретные технологии и приёмы декодирования в

рамках ОТ могут быть полезны для них в разной степени. Решение вопросов о том, какой из вариантов непрерывного или блочного кодирования данных надо применять в конкретных проектах, должно быть оставлено за конкретными разработчиками систем кодирования.

Отметим также, что использование оптимизационных методов для правильной адаптации параметров элементов МПД декодеров и некоторых других процедур к условиям работы потребовало создания особых способов настройки таких элементов. Но из этого следует, что после различных успешных "примерок" каких-либо алгоритмов ОТ из большого набора программных платформ на порталах <https://decoders-zolotarev.ru> и www.mtdbest.ru необходимость разработки или приобретения собственных программных средств для проектирования, исследований и моделирования работы декодеров МПД становится для всех разработчиков декодеров абсолютно очевидной. Без достаточно совершенного ПО создавать новые современные алгоритмы класса ОТ невозможно! Это отношение к прикладным работам по ОТ оказывается единственно правильным, поскольку алгоритмы МПД реализуют методы с действительно наилучшими возможными характеристиками, но при этом сами по себе эти алгоритмы не относятся к оптимальным и требуют весьма аккуратной настройки. Таков исключительно хороший компромисс науки о кодах с Природой, плата за высокие характеристики декодирования при минимально возможной сложности, которые разработчик алгоритмов получает вместо экспоненциального по длине кода перебора из почти бесконечного списка возможных решений.

Повторим снова про необходимость чёткого понимания, что параметры триединого критерия ПДС абсолютно всех алгоритмов декодирования, в том числе ОТ и МПД, никогда нельзя с достаточной точностью вычислить для большого относительного уровня шума канала. Вполне возможно, что этого нельзя будет сделать вообще никогда принципиально, как это фактически и «доказала» прежняя ушедшая ТК. Такова классическая ситуация для очень многих наукоёмких масштабных исследований и технологий. Компьютерная оптимизация всех параметров декодеров под конкретные условия применения требует высокого уровня развития как специализированных программных комплексов, так и других средств разработки достаточно широкого профиля, что с ещё более общих позиций баланса теории и эксперимента в науке было очень наглядно показано в [27]. Аналогичные выводы были сделаны абсолютно независимо в [21].

Понятно, что конечные результаты таких оптимизационных процедур никогда не могут быть представлены в виде обозримых аналитических выражений. Адепты прежней теории так и не смогли этого пережить вообще. А школа ОТ всегда будет готова поддерживать технологически специалистов и энтузиастов, начинающих новые сложные, но очень интересные направления исследований в сфере кодирования. Однако при этом обязательно нужно помнить, что все компьютерные проекты, включая задачи оптимизации, следует развивать только в тесном взаимодействии с серьёзными теоретическими наработками. Суровый многолетний опыт работы школы ОТ

однозначно показывает, что все без исключения программистские фокусы в сфере ТК, не одобренные строгой логичной теорией, всегда заканчиваются просто ничем или даже катастрофой. Эффективная прикладная теория кодирования, которую теперь представляет только ОТ, здесь тоже не является исключением, особенно учитывая очевидный факт, что все более или менее простые решения в этой новой ОТ уже давно найдены, опубликованы, запатентованы и реализованы. И - главное - все они успешно работают!

Нелишне также вновь подчеркнуть, что чрезвычайная простота идей и принципов работы большинства алгоритмов ОТ, в частности, МПД декодеров всех типов, воистину уникальна, понятна и, вследствие этого, абсолютно доступна для усвоения и дальнейшего использования, как и для творческого развития. На программирование единственного активного элемента МПД - порогового элемента (ПЭ) - на C++ достаточно менее десяти строк команд этого очень удобного для моделирования языка, обладающего и некоторыми свойствами языков программирования более высокого уровня. Специалиста или аспиранта, успешно выполнившего этот самый главный (пусть и не единственный!) шаг на пути к масштабному и абсолютно обязательному моделированию работы алгоритмов АВ и декодеров МПД, будут ждать действительно интереснейшие исследования и открытия в сфере ОТ, которые даже при теоретически минимальной сложности обеспечивают максимальную, наилучшую возможную достоверность декодирования, в том числе во многих случаях и непосредственно вблизи границы Шеннона.

Напомним ещё раз, что школа ОТ поместила свой первый справочник 2004 года по кодированию на наших порталах <https://decoders-zolotarev.ru> и www.mtdbest.ru на страницах "Наши книги".

Издание нашего Справочника-2, полезного, как мы полагаем, и в качестве пособия для исследователей и разработчиков программных и аппаратных средств обеспечения высокой достоверности передачи и хранения данных, поможет специалистам хорошо ориентироваться в современной проблематике построения систем кодирования. Он покажет новым поколениям учёных и инженеров в области цифровых систем единые и в то же время весьма разнообразные пути дальнейшего повышения эффективности алгоритмов помехоустойчивого кодирования.

В связи с особо важной возможностью широкого непосредственного изучения и освоения большого числа демопрограмм и программных платформ, которые можно использовать при усвоении методов, изложенных далее, представляется очень полезным значительное облегчение доступа читателей нашего Справочника-2 ко всему тому ПО, которое можно попробовать применить, оценить и развивать далее. Для этого все программные средства, используемые в справочнике, помещены в библиотеку **List-22-prog**, которая упакована в zip-файл **complex22.zip** и помещена на порталах <https://decoders-zolotarev.ru> и, как мы планируем, www.mtdbest.ru справа в самом нижнем углу страницы "Обучение" после программ калибровки. После перезаписи и распаковки в компьютере читателя будет библиотека **List-22-prog**, в которой окажутся все папки с номерами от 1 до 22, содержащие необходимые

программные средства и простые описания способов их использования при изучении различных разделов Справочника-2. Список папок программных средств в распакованной библиотеке **List-22-prog** приведён ниже. Справа от них указаны те разделы, где они используются.

1. **1-multmtd** , -2.1,
2. **2-convdec2** , -2.2, 4.8,
3. **3-erasureprog**, - 2.3, 4.8,
4. **4-quickQmtd**, - 2.5, 4.3, 4.6,
5. **5-demoQface**, - 2.5,
6. **6-RS**, - 2.5,
7. **7-Qmtdbl**, - 2.5, 4.2, 4.6,
8. **8-err-prop** , - 3.4,
9. **9-decMTD**, - 3.5, 4.1, 4.4,
10. **10-mtdblock**, - 3.5, 4.5,
11. **11-VA**, 5.1,
12. **12-BVA**, 5.2,
13. **13-new-quick-RF** , - 4.9,
14. **14-turbo-demo** - 4.12 .

Особо отметим специальные подобранные дополнительные функционирующие программные средства для высокоэффективной итоговой подготовки наиболее квалифицированных специалистов, которые после их анализа и опытного использования смогут разрабатывать алгоритмы класса ОТ для каналов любого типа, рассматривавшихся в теории ОТ. Эти средства подобраны так, что они показывают характеристики систем кодирования, каждая из которых является одной из самых лучших в своём классе. Представлены также полные программные функционирующие системы кодирования/декодирования под VC++ 6.0 с достаточно подробными комментариями, которые можно сразу развивать далее в совершенно различных направлениях. Многие программные средства снабжены инструментами измерения времени работы и, следовательно, скорости декодирования. Эти материалы после длительного обсуждения и подготовки были помещены в раздел 6.4.

Программно-информационные блоки, содержащие краткие инструкции по использованию дополнительного прилагаемого ПО и сами программы, имеют номера:

15. **15-mtdbsc**,
16. **16-00erase-05**,
17. **17-D104NB**,
18. **18-0Q7conv**, - все - раздел 6.4.
19. **19-D42** ,
20. **20-QMTD20**,
21. **21-Qkkdec12** .

Выбор требуемых программ из этого списка делается по номеру или просто по названию папки, которая будет указана в тексте справочника при

изучении очередной темы. Это облегчает процесс получения доступа к ПО для всех его читателей.

На самом деле в упаковке программ есть и ещё один ресурсный пакет **№22**. Это три лабораторные работы для студентов и курсов повышения квалификации.

Вполне возможно, что там же ниже упаковки **complex22.zip** мы поместим позже упаковку дополнительных папок **complex22-add.zip**, в которой будут новые программные платформы, развивающие методы ОТ. Но, видимо, это вопрос будущего развития темы.

Отдельно укажем, что все демопрограммы и платформы с образовательных страниц обоих порталов, часть из которых попала в вышеприведённый список, как и программы калибровки, мы также рекомендуем читателям сразу переписать на свои компьютеры и затем рассмотреть их возможности в тех весьма разнообразных условиях коррекции ошибок, которые будут для них интересны. Разумеется, все программы содержат в своих папках простые инструкции по их использованию.

Автор и помощники-составители этого справочника полагают, что вклад ОТ, нашей новой "квантовой механики" теории информации, в развитие современной прикладной теории кодирования на теперь уже принципиально новом уровне её состояния окажется очень важным для новых поколений разработчиков цифровых систем будущего.

Повторим в конце введения к столь совершенно необычной книге по прикладным вопросам ТК, что именно эта невозможная для прежней теории кодирования комбинация даже в чём-то немного мистических теоретических и уникальнейших экспериментальных инструментов исследования проблемы Шеннона позволила школе ОТ существенно опередить результаты других, возможно, тысяч конкурирующих исследовательских групп всего мира. При этом исключительно важная роль программного обеспечения (ПО) в решении проблемы Шеннона методами различных оптимизационных теорий и с этих позиций также свидетельствует о том, что ТК в своих прикладных аспектах вовсе не является математической задачей. Проблема Шеннона решена, а прежняя прикладная теория кодирования как наука завершена благодаря взаимодействию очень необычной и неожиданной тонкой теории с различными технологиями поиска глобальных экстремумов функционалов (ПГЭФ), в том числе и на специальных массивах с потенциальными свойствами самокоррекции, т. е. на кодовых структурах. Именно возникшее при этом синергетическое ускорение исследований, обусловленное взаимоподдержкой теории и эксперимента, обеспечило все безусловные приоритеты и воистину настоящий водопад открытий и изобретений научной школы ОТ.

Полезно напомнить также, что теория кодирования имеет дело не только с помехоустойчивым кодированием данных в шумящих каналах. Другой очень плодотворный раздел информатики составляет теория кодирования источника, различные приложения которой играют очень важную роль в цифровых технологиях. Кроме методов сжатия данных и их последующего безошибочного восстановления, широко применяются и технологии сжатия и

восстановления с некоторыми заданными критериями качества такого сжатия. Их общая главная функция состоит в том, чтобы передавать необходимую информацию в особом более компактном виде, что повышает эффективность, т. е. скорость реальной передачи данных в различных системах.

Но отсюда непосредственно следует, что одновременное кодирование источника и канала связи, подверженного шумам и создающего ошибки при передаче, должно обеспечить особенно значительное повышение итоговых скоростей обмена данными во всех системах, в том числе и комплексах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). При достаточно высоких требованиях и к скорости сброса, и к итоговой достоверности данных, передаваемых таким образом с некоторых космических аппаратов (КА), общий суммарный выигрыш от применения всех средств кодирования на борту КА, как указывалось в [21], может достигать многих десятков раз и в отдельных случаях составлять даже $40 \div 80$ -кратный выигрыш. Иначе говоря, КА, применяющий все доступные технологии и средства теории информации для быстрой и надёжной передачи данных, окажется при равных энергетических возможностях эквивалентным по общей скорости сброса данных на Землю именно $40 \div 80$ таким же КА, но не использующим никаких возможностей кодирования на каких-либо этапах обработки и передачи данных. Этот пример, как мы полагаем, в ещё большей степени подчёркивает важность технологий, которые предлагает данный Справочник-2. Особенно полезно это учитывать и потому, что при типичных соотношениях характеристик всех устройств, особенностей оптики, типа изображений и свойств каналов связи комплексов ДЗЗ, именно технологии помехоустойчивого кодирования вносят более значительный вклад в суммарное повышение эффективности работы систем передачи цифрового потока на земную приёмную станцию.

Мы также полностью согласны с комментарием научного редактора о компактности теории ОТ и об абсолютном минимуме выводимых и используемых весьма простых формул, которых, однако, совершенно достаточно для описания характеристик кодов и декодеров для всех классических типов каналов, рассматриваемых в ТК. Это подчёркивает высокую степень совершенства ОТ, которая фактически является развёрнутым системно-философским трактатом в сфере цифровой информатики. Так и должно быть, т. к. философии никогда не был свойственен числовой фанатизм.

В методическом аспекте при изложении результатов ОТ для читателей будут важны разнообразные способы объяснения всё ещё не признаваемого теоретиками «прежней» теории теперь уже того безусловного факта, что, кроме экспериментальных аппаратных и программных методов, никаких иных способов определения реальных характеристик алгоритмов декодирования при большом уровне шума нет и, скорее всего, никогда уже и не будет. Найденные к текущему моменту в наших экспериментах несколько сотен успешных макетных решений великой проблемы Шеннона для всех классических традиционных в ТК каналов являются отличным напоминанием всем специалистам о том, что действительно масштабные научно-технические проблемы практически никогда не имеют чисто аналитических обозримых

решений. Можно надеяться, что осознание этого важнейшего для эффективной научной деятельности обстоятельства избавит очень многих записных «теоретиков» от весьма пренебрежительного отношения к экспериментальным аспектам исследований, обязательно выполняемым, конечно, на базе максимально точных и полных теоретических моделей изучаемых объектов и процессов. Некоторые важные особенности научных разработок, которые стали доступными только благодаря успехам вычислительной техники и технологиям моделирования, были очень аргументировано, наглядно и интересно описаны в [21,27].

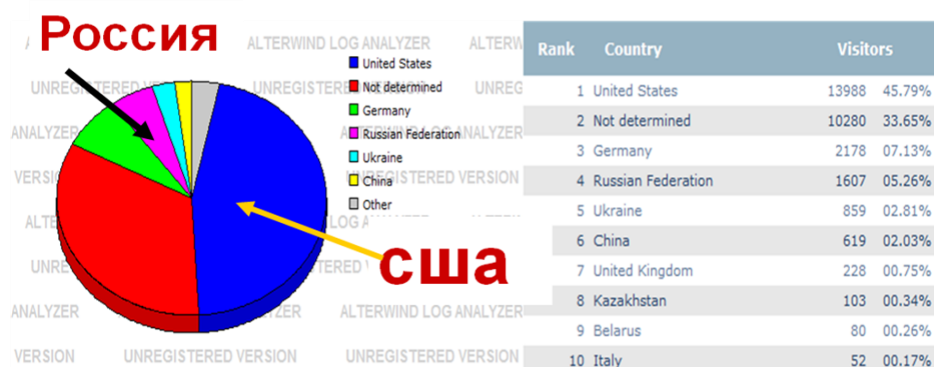
Материалы по ОТ на ресурсах [20], как видно по прилагаемому слайду из [21], уже много лет внимательно читает весь мир, что свидетельствует о большом и всё возрастающем авторитете российской научной школы ОТ.

Новые порталы по методам кодирования

www.mtdbest.ru

www.mtdbest.iki.rssi.ru

**За 2015 год - более 100 тыс. читателей
на наших порталах из 87 стран мира**



Автор с полным пониманием сложности развития науки выражает признательность научному редактору Справочника-2, который поддержал в этой книге наши достаточно жёсткие общие комментарии по поводу уровня прикладной ТК и некоторых её самых разрушительных деятелей в последние десятилетия и в настоящее время. Эти действительно трудные многолетние испытания в процессе своего развития научная школа ОТ прошла с достоинством и с уважением к той истинной науке, которой мы продолжаем служить и в меру наших весьма скромных сил защищать.

Следующая часть введения связана с нашим мнением о текущем уровне работ в ТК. Она тоже помещена отдельно на порталы www.decoders-zolotarev.ru и www.mtdbest.ru около презентации справочника в «Интерактивные Дополнения Справочника-2» [85].

* * * * *

Завершая наши вводные комментарии, мы также уверены, что наша позиция не затрагивать аналогичных проблем зарубежья абсолютно корректна и правильна. Там теория кодирования развивается своим особым образом.

Автор выражает самую глубокую истинную признательность научному редактору Справочника-2 члену-корреспонденту РАН Ю.Б. Зубареву и всем сторонникам научной школы Оптимизационной Теории, которые поддержали его усилия по изданию этого исключительно сложного и необычного по формату интерактивного ресурса, помогли подобрать и адаптировать некоторые тексты и программные платформы, а также приняли активное участие в редактировании материала.

Укажем также наше мнение о пользе новых знаний, которые даёт читателям наш Справочник-2. Самыми простейшими и, тем не менее, очень эффективными, конечно, оказались СтМПД, декодеры для стирающих каналов. Они очень легко обеспечивают эффективное восстановление данных даже вблизи границы Шеннона. Как и для других каналов, коды для этих декодеров должны быть обязательно выбраны по критериям минимизации РО.

Огромные преимущества символьных QМПД перед декодерами кодов Рида-Соломона (РС) делают повсеместный выбор именно наших алгоритмов неизбежным. Это вы увидите в процессе изучения возможностей методов, предлагаемых этим справочником. Причина: оптимальное декодирование при большом шуме и линейная сложность. И всё это можно будет сравнить между собой. Жаль, что их уже много десятилетий не замечают «теоретики». Но «символика» на много порядков по всем критериям лучше всего того, что есть в прежней ТК.

А наиболее часто создаваемые декодеры двоичных кодов для ДСК и гауссовских каналов характеризуются тем, что просто выбор хороших кодов для МПД обычно обеспечивает действительно несложное декодирование при уровнях шума, меньших вычислительной скорости R_c двоичных каналов. Дальнейшее снижение отношения сигнал/шум на ~ 1 дБ требует некоторого заметного усложнения МПД алгоритма и выбора более длинных кодов. Последующее снижение энергетики ещё на 0,5 дБ уже невозможно без аккуратного проектирования системы по всем параметрам. Указанные области применимости при крайне малой сложности и высокой эффективности, что вы сможете увидеть из численных данных этого справочника, свидетельствуют о целесообразности широкого применения методов ОТ, МПД и, как скоро будет всем понятно, всех версий АВ в большинстве систем повышения достоверности цифровых массивов и потоков.

А далее уже идёт область уровней относительного шума, которая меньше границы Шеннона примерно на 1 дБ. Именно в этом диапазоне параметров канала и декодера сейчас ведутся исследования школы ОТ. Декодеры для такой шумовой обстановки уже очень сложны и необходимо искать пути их значительного упрощения. Этими работами мы сейчас и заняты. Приглашаем возможных помощников и коллег присоединиться к нам.

Автор просит направлять ему все возникающие у читателей естественные и неизбежные вопросы по такой совершенно необычной книге и по

используемому в ней программному обеспечению по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, отдел 71, к.761, e-mail: zolotasd@yandex.ru .

По вопросам изучения характеристик программного обеспечения, предлагаемого для использования в этом Справочнике-2, и, в некоторых случаях, его применения в тех или иных условиях, можно также обращаться по адресу: annakalinova@gmail.com к Калиновой А.В.