

## Предисловие научного редактора

Специалистам в области технологий помехоустойчивого кодирования представляется давно ожидавшийся научно-техническим сообществом новый Справочник-2, написанный руководителем научной школы Оптимизационной Теории (ОТ) помехоустойчивого кодирования профессором ИКИ РАН, д-ром техн. наук В.В. Золотарёвым. Он подготовлен в соответствии с достижениями школы ОТ новейшего времени, согласно которым основные конкретные методы этой современной прикладной теории, решившей проблему Шеннона, действительно имеют минимальную возможную сложность и реально обеспечивают оптимальное декодирование используемых кодов даже при большом относительном уровне шума цифрового канала.

Представленные ниже справочные материалы высокого научного и детального технологического уровня одновременно выполняют и функцию хорошо проработанного Пособия с очень полезными учебно-методическими сведениями о самых последних важнейших результатах новой теории кодирования (ТК) в её главных прикладных областях, т. е. разработке декодеров, исправляющих ошибки в цифровых данных самой разнообразной природы. Справочник написан с учётом всех тех очень важных для прикладной теории кодирования достижений, которые в монографиях школы ОТ нынешнего тысячелетия описаны как конкретные итоги успешного полного решения главной и самой сложной проблемы цифрового мира, поставленной более 70 лет назад К. Шенноном: простого высокодостоверного декодирования цифровых данных вблизи пропускной способности шумящих цифровых каналов.

На основе самых недавних исследований научной школы ОТ в книге представлен целый ряд новых результатов для различных классов кодов и алгоритмов декодирования,

которые всегда очень легко реализуются для традиционных в ТК каналов связи программно, а после некоторой инженерной подготовки — и аппаратно. При этом особенно ценным является то обстоятельство, что в новом своём качестве Справочник-2 предлагает создание систем кодирования вовсе не методами прежней крайне математизированной теории кодирования. Теперь в нём все алгоритмы изложены на основе теории ОТ, которая на разных этапах проектирования методов декодирования использует никогда не применявшиеся ранее в прикладной ТК технологии поиска глобального экстремума функционалов в специфических условиях специальных дискретных пространств со свойствами самокоррекции. Но для этого в течение 50 лет разработки основных направлений ОТ пришлось создать и большое количество уникальных программных комплексов, которыми пока не обладают, видимо, никакие научные группы. Именно этот прочный союз теории ОТ и множества необходимых для экспериментов оптимизационных программных платформ преодолел в удобном и технологичном стиле все те неприступные для прежней прикладной теории кодирования сложности, что и обеспечило решение проблемы, сформулированной К. Шенноном.

При этом особенно важно, что сама задача декодирования осталась в рамках предлагаемых ОТ технологий очень простой и абсолютно доступной для всех специалистов. Все алгоритмы декодирования и принципы работы, что очень важно при обучении и усвоении новых методов, представленных в справочнике, — это, как и раньше, очень понятные и хорошо известные методы, базирующиеся на мажоритарных декодерах, предложенных известным американским специалистом Джеймсом Мессе, или давно и широко используемые в технике связи алгоритмы Витерби (АВ) в разных своих модификациях, также успешно освоенные нашими инженерами. Очень просто определены и все границы эффективности их характеристик, что также весьма ценно при проектировании систем кодирования и их настройке.

Таковыми столь важными качествами технологии ОТ обладают благодаря тому, что только усилиями автора этого справочника и сторонников его научной школы было своевре-

менно найдено очень удачное соотношение между тонкой философски сориентированной теорией и конкретными методами поиска глобальных экстремумов различных функционалов на цифровых массивах особой природы. А сами эти методы реализованы научной школой ОТ путём моделирования работы мажоритарных и ряда других декодеров в различных оригинальных оптимизационных режимах для всех классических каналов, анализируемых в исследованиях по корректирующим кодам. История очень долгой затяжной стагнации прежней теории кодирования, наступившей ещё в прошлом тысячелетии, однозначно показала, что других путей для создания простых и эффективных алгоритмов декодирования сейчас практически нет.

Проблема соотношения теории и эксперимента в науке обострилась в восьмидесятих годах прошлого века настолько, что эта тематика нашла своё отражение даже на портале РАН, где были представлены весьма важные публикации по этим вопросам. Но ещё примерно на 10 лет раньше появления этой проблемы автор настоящего Справочника-2 и его школа выбрали для теории и технологий кодирования очень хорошее соотношение теоретико-аналитических и экспериментально-оптимизационных методов изучения проблем различных кодов. Столь правильный стратегический прогноз для наилучшего стиля своих исследований на много лет вперёд позволил теперь школе ОТ полностью решить проблему Клода Шеннона, сформулированную для будущего цифрового мира более 70 лет назад.

Главенствующая роль обязательного всестороннего масштабного моделирования алгоритмов декодирования очень доступно для всех раскрыта именно в работах школы ОТ. Об этом ярко и наглядно свидетельствуют многочисленные программные платформы, совершенно свободно предлагаемые в справочнике для непосредственного опробования и использования. А основной причиной этого оказалась абсолютная невозможность получения никаких аналитических выражений для реальной сложности и итоговой достоверности любых декодеров при достаточно большом уровне шума цифрового канала. Именно это и доказал быстрый закат прежней

бесплодной ТК, адепты которой не смогли развивать теорию и эксперимент в достаточно сбалансированном единстве.

Такая ситуация не оставляет современным исследователям никаких иных способов достоверной оценки всех главных параметров проектируемых алгоритмов, кроме аппаратного или программного эксперимента. Но, разумеется, он абсолютно всегда должен быть очень аккуратно подготовлен с учётом всех положений применяемой для этого строгой содержательной теории. При этом для самой ОТ определение параметров эффективности и сложности — всего лишь уже давно решённая технологическая задача. В ОТ при использовании стандартных программных средств, разработанных с большим опережением для самых разнообразных нужд развития теоретических и экспериментальных исследований, все изучаемые параметры декодеров, принципиально всегда недоступные прежней ТК, определяются обычно в течение нескольких минут, т. е. фактически «мгновенно».

Полученные научной школой ОТ профессора В.В. Золотарёва важнейшие для цифрового мира решения проблемы Шеннона для всех стандартных в теории кодирования каналов являются отличным напоминанием всем специалистам о том, что действительно масштабные научно-технические проблемы практически никогда не имеют обозримых чисто аналитических итоговых решений. Будем надеяться, что осознание этого важнейшего для эффективной научной деятельности обстоятельства избавит очень многих «теоретиков» от крайне пренебрежительного отношения к экспериментальным методам исследований. И приходится ещё раз подчеркивать, что никаких иных путей оценки параметров разрабатываемых эффективных алгоритмов для работы вблизи границы Шеннона в ТК уже давно нет!

Мощной поддержкой для всех изучающих алгоритмы Оптимизационной Теории являются три совершенно уникальных двуязычных сетевых портала оригинальной научной школы ОТ: <https://decoders-zolotarev.ru>, [www.mtdbest.ru](http://www.mtdbest.ru) и [www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru). Они содержат теперь уже более 1000 блоков справочно-информационных и учебно-методических данных. А самое главное, на этих порталах действитель-

но размещено большое число доступных всем программных платформ, позволяющих оперативно оценивать возможности методов ОТ, а также тех различных кодов и алгоритмов, которые читатели книги будут рассматривать в предлагаемых им первых технологических опытах на основе специального ПО или найдут сами и затем захотят оперативно проверить в эксперименте. Их успешная реализация, как полагают сторонники школы ОТ, должна всегда приветствоваться и засчитываться как освоение новых самых передовых методик создания алгоритмов декодирования.

Напомним в связи с этим, что, как это уже давно предлагает научная школа ОТ, абсолютно все методы, которые предъявляются как новые перспективные алгоритмы декодирования корректирующих кодов, должны быть обязательно полностью промоделированы и предъявлены редакциям журналов, Оргкомитетам конференций, специализированным советам по защитам и всем специалистам по системам кодирования и моделированию алгоритмов в виде, позволяющем проверять реальность заявленных характеристик кодеков по триединому критерию качества алгоритмов ПДС  $\equiv$  «помехоустойчивость–достоверность–сложность», давно и с большой пользой применяемому при исследованиях в школе ОТ. Иначе говоря, алгоритмы, не представленные и как полноценные доступные специалистам программные модели, нигде не должны рассматриваться даже на предмет публикации. И пока что иных способов подтверждения успешности и даже просто реальности выполненных исследований в сфере прикладных задач теории кодирования вообще не существует. Хотелось бы надеяться, чтобы это важное пожелание автора справочника и его научной школы, продиктованное исключительно стремлением восстановить сильно подорванное сейчас доверие к прикладным исследованиям в области теории кодирования, будет услышано и с пониманием принято всеми редакциями журналов, вузами, руководителями НИИ, спецсоветами по защитам, а также ответственными организациями, ведомствами и нашим научно-техническим сообществом.

Все прикладные достижения ОТ, соответствующие решению проблемы Шеннона, относятся к теории и методам по-

иска глобальных экстремумов функционалов (ПГЭФ), которые обязательно всегда поддерживаются технологиями теории размножения ошибок (РО) при мажоритарном декодировании и фундаментальной для всей теории ОТ Основной Теоремой многопорогового декодирования (ОТМПД). Подчеркнём, что именно это уникальное сочетание технологий трёх новых прикладных теорий, фактически вообще никак не относящихся к методам покинувшей поля науки прежней ТК, смогло после многих десятилетий тяжёлого кризиса обеспечить полное решение всех проблем декодирования, в том числе и вблизи пропускной способности цифрового канала. Оптимизационная Теория, принципиально иная прикладная ТК, фактически полностью переписана научной школой профессора В.В. Золотарёва заново!

Здесь также важно отметить, что школа ОТ не предъявляет вообще никаких чрезмерных требований к каким-либо исследованиям в области методов кодирования. Наоборот, на портале [www.mtdbest.ru](http://www.mtdbest.ru) на странице «Обучение» и на соответствующей странице нового именованного портала <https://coders-zolotarev.ru> этой школой представлены созданные ею общедоступные специальные калибровочные программы многопорогового декодера (МПД), созданные на удобном для программирования различных алгоритмов декодирования языке C++. Эти программные средства с простыми инструкциями облегчают всем исследователям непосредственное сравнение на собственных рабочих компьютерах производительности любых своих новых алгоритмов декодирования с аналогичными декодерами, созданными на основе ОТ. Тем самым школа ОТ очень конкретно помогает создателям будущих новых эффективных декодеров проводить правильное сопоставление реальных скоростных характеристик методов коррекции ошибок между собой.

Новизна и ценность полученных российской научной школой ОТ результатов обеспечена десятками изобретений и открытий, которые специалисты этой школы сделали в процессе своих исследований. Как известно, наилучшие возможные характеристики достоверности коррекции ошибок могут быть достигнуты при использовании методов оптимального деко-

дирования тех или иных кодов. Однако обычно сложность таких методов оказывается крайне большой, пропорциональной экспоненте от длины этих кодов. Именно поэтому крайне ценно, что все методы МПД на базе ОТ имеют теоретически минимально возможную сложность, пропорциональную всего лишь длине кодов. Строго говоря, других сколько-нибудь эффективных методов с линейной сложностью сейчас просто нет.

Кстати, как хорошо известно, наиболее популярным и реально широко применяемым оптимальным декодером (ОД) с экспоненциальной по длине кода сложностью уже более 50 лет является алгоритм Витерби (АВ) для свёрточных кодов. Его технологичность и очень высокие характеристики достоверности декодирования нередко являются ориентиром при создании других методов, особенно при требованиях минимально возможной задержки принятия решений. Однако сложность этого переборного алгоритма, конечно, не позволяет использовать длинные коды, которые только и могут обеспечить максимально эффективную по энергетике передачу в очень дорогих цифровых каналах связи.

Но даже при всей ценности АВ для свёрточных кодов теперь большого внимания заслуживают уже и разнообразно запатентованные школой ОТ блочные версии алгоритма Витерби (БАВ) с такой же, как у классического свёрточного АВ, сложностью, а вовсе не с удвоенной её экспонентой, как умели это делать до недавнего времени наши теоретики, всё ещё агрессивно предлагающие совершенно неприемлемые для техники связи варианты этих особых блочных ОД даже для обучения студентов. Поэтому только отметим в качестве примера, что для вполне реальных ещё в конце прошлого тысячелетия параметров декодеров, реализованных NASA, созданные такими теоретиками блочные ОД были бы примерно в 16 000 раз более сложными, чем БАВ, уже запатентованные в своих разных вариантах школой ОТ.

Можно сказать, что теперь в своём очень удобном новом блочном технологичном формате АВ фактически переоткрыт школой ОТ заново. Так что вскоре после его достаточно полного освоения техническими специалистами ему, несомненно, предстоит пережить своё второе возрождение, свое-

образный Ренессанс, что существенно упростит решение всех задач декодирования в гауссовских каналах для коротких блоковых кодов, а также расширит его применение в каскадных и очень многих других схемах. Блоковые АВ школы ОТ также представлены во всей своей полноте в данном Справочнике-2.

Коллектив исследователей ОТ и алгоритмов МПД заслуженно удостоен премии Правительства РФ по науке и технике, а также Золотой медали Европейского союза (ЕС) «За исключительные достижения», которая присуждается учёным Европы только за особо высокие заслуги. ИКИ РАН награждён за патент школы ОТ Золотой медалью Международного салона изобретений и специальным Дипломом признания этого выдающегося достижения для космической связи и систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Свои результаты научная школа ОТ опубликовала также и в англоязычной монографии, изданной Международным союзом электросвязи (МСЭ/ITU) при ООН в юбилейном для МСЭ 2015 году его 150-летия после очень строгой экспертизы. Ещё две несколько различные по размерам новые книги по ОТ также находятся в свободном доступе для англоязычных читателей на порталах [www.mtdbest.ru](http://www.mtdbest.ru) и <https://decoders-zolotarev.ru> на страницах «Books/Наши книги».

Некоторые из представленных в этом справочнике результатов многие коллеги автора пособия, академики РАН, научные редакторы монографий по ОТ и ряд зарубежных соавторов публикаций по алгоритмам МПД вполне справедливо считают открытиями в области теории кодирования. К ним относятся чисто теоретические результаты для линейных кодов, в частности Основная Теорема многопорогового декодирования, символьные коды, принципы дивергентного декодирования и параллельное каскадирование. А среди наиболее важных прикладных достижений высокого уровня школы ОТ можно указать блоковые модификации АВ, необычные крайне простые декодеры для не двоичных кодов, алгоритмы высоконадёжного декодирования для флеш-памяти, а также целый ряд других разработок, на которые члены научной школы ОТ также получили множество патентов на изобретения в РФ и за рубежом.



Читатели справочника, безусловно, отметят и то, что в нём весьма мало формул. Однако, как и в самых новых монографиях по ОТ, абсолютно все необходимые для расчётов и оценок параметров декодеров выражения и формулы для всех типов каналов, рассматриваемых в справочнике, тоже есть. Это подчёркивает компактность теории ОТ и высокий уровень её совершенства.

Методы и алгоритмы, достаточно полно представленные в данном Справочнике-2, предлагаются для изучения и опробования во многих вариантах с использованием предоставляемого на порталах научной школы ОТ весьма обширного программного обеспечения. Автор совершенно правильно поступил, классифицируя этот справочник как продолжение уже давно изданного первого. Это освобождает его от повторения предварительных общих сведений о системах кодирования справочника «Помехоустойчивое кодирование», изданного под моей научной редакцией ещё в 2004 году. Очень удобно, что школа ОТ решила поместить и этот первый справочник на порталах [www.mtdbest.ru](http://www.mtdbest.ru) и <https://decoders-zolotarev.ru> на страницах «Наши книги».

Можно ожидать, что непосредственное знакомство специалистов по кодированию и всех заинтересованных в развитии этих принципиально новых методов студентов, аспирантов и инженеров позволит более целенаправленно развивать теорию кодирования в её прикладных аспектах, а также проектировать на её основе самую передовую цифровую технику. Это создаст условия как для дальнейшего снижения сложности и задержки решений алгоритмов, относящихся к ОТ, так и для продолжения успешного продвижения области эффективной работы МПД и других методов на их основе ещё ближе к границе Шеннона, что, собственно, и является конкретной целью всех разработок в области современной прикладной теории кодирования.

Следует безусловно приветствовать успешные результаты исследований отечественных специалистов в сложнейшей сфере обеспечения высокой достоверности цифровых потоков с использованием особо простых и технологичных в реализации алгоритмов этого Справочника-2. Абсолютное лидерство рос-

сийской науки в этой важнейшей отрасли исследований цифрового мира заслуживает дальнейшей поддержки её развития. Новые перспективные пути для таких исследований указывают работы специалистов научной школы ОТ и данный справочник, результаты которого позволят развивать цифровые методы для наземных коммуникаций, дальней космической и спутниковой связи, а также совершенствовать технологии дистанционного зондирования Земли. Теперь стало возможным использовать для этого новые сверхбыстрые алгоритмы декодирования научной школы ОТ, уже ни в какой степени не ограничивающие скорости сброса цифровых данных на Землю, что ещё недавно было почти неразрешимой проблемой. В настоящее время возможный рост скорости передачи данных с орбиты только благодаря алгоритмам ОТ может составить до 10 раз, а при выборе более быстрой элементной базы для ключевых узлов комплексов ДЗЗ вполне реален и ещё более существенный выигрыш.

Таким образом, прежняя «классическая» теория кодирования во всех своих прикладных и смежных аспектах полностью завершена. Дальнейшие задачи проектирования систем помехоустойчивого кодирования следует решать на основе созданных школой ОТ методов и технологий, которые уже давно всесторонне проверены и освоены. Конечно, возможны и такие требования к методам ОТ, АВ и МПД, которые будут сначала считаться слишком высокими. Они станут очередными задачами, которые будут успешно решаться последователями школы В.В. Золотарёва, а также на основе собственных теоретических и прикладных достижений новыми специалистами XXI века.

Теперь методами ОТ можно создавать декодеры, работающие практически непосредственно вблизи границы Шеннона для уже очень широкого набора кодовых кластеров. Ещё большие возможности алгоритмов ОТ смогут продемонстрировать специалисты, аспиранты и, конечно, недавние студенты, которые освоят очень простые, но иногда весьма необычные методы новой теории. Качество характеристик будущих алгоритмов в очень большой степени будет определяться уровнем развития программного обеспечения для ускоренно-

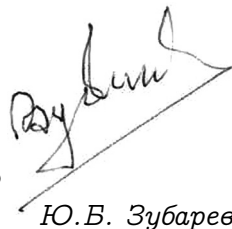
го прогресса ТК и технологий, а также для проектирования и тонкой оптимизации параметров декодеров на основе ОТ. Это самые естественные пути развития реальных, а не кабинетных наукоёмких технологий, которые и далее будут быстро эволюционировать в единстве научных теорий и экспериментальных моделей как программного, так и аппаратного типов.

После обсуждения с автором этого справочника, профессором В.В. Золотарёвым, мы приняли решение о том, что небольшая часть этого вводного текста к важнейшей методологической книге по прикладной ТК последних лет, относящаяся к её не совсем традиционной для справочных изданий обзорной части по прикладной ТК, как и некоторые другие интерактивные компоненты этой книги, переносятся на порталы <https://decoders-zolotarev.ru> и [www.mtddbtest.ru](http://www.mtddbtest.ru). Она будет находиться на страницах «Наши книги» в нижнем их сегменте, ниже области представления самого справочника в «Интерактивных Дополнениях Справочника-2» [85].

\* \* \*

Заявленная готовность научной школы ОТ к широкой поддержке разработок новых действительно эффективных алгоритмов декодирования, безусловно, также будет способствовать успешному быстрому освоению заинтересованными организациями и отдельными коллективами специалистов всех разнообразных возможностей теории ОТ, новой «квантовой механики» теории информации, полностью и успешно решившей проблему К. Шеннона о простой высокодостоверной передаче цифровых данных по шумящим каналам современных систем связи.

Член-корреспондент РАН  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ,  
лауреат Государственной премии РФ,  
дважды лауреат Премии Правительства РФ



Ю.В. Зубарев