

Обзор технологий школы Оптимизационной Теории: - цифровой мир после решения проблемы Шеннона

В.В. Золотарёв

(Москва)

Аннотация. Анализируются итоговые возможности и будущие линии развития методов и технологий Оптимизационной Теории (ОТ), обобщённых в основных этапных монографиях по ОТ и двух справочниках новейшего времени, в которых дано полное решение великой проблемы Шеннона: - простого высокодостоверного декодирования цифровых данных при передаче по традиционным для теории кодирования (ТК) каналам с большим относительным уровнем шума. Все они могут использоваться для решения главной задачи прикладной ТК – создания алгоритмов декодирования для шумящих каналов ещё более сложного типа, чем те, которые рассматривались до сих пор в ТК и в ОТ. Алгоритмы ОТ сравниваются с прочими направлениями ТК в классических цифровых каналах по триединому критерию ПДС \equiv «помехоустойчивость-достоверность-сложность». Отмечается особая ценность блоковых версий алгоритма Витерби (БВ) научной школы ОТ. Подчёркнута принципиальная невозможность получения расчётным путём каких-либо параметров критерия ПДС для декодеров при больших относительных уровнях шума, что приводит к необходимости проектирования высокоэффективных алгоритмов декодирования на основе методов оптимизационных теорий, реализуемых только на высокопроизводительных вычислительных системах. Указаны проблемы трудного прогресса современной ТК, которую в нашей стране уже длительное время представляет только ОТ. Сделан вывод о том, что других путей развития для ТК сейчас уже нет и, видимо, никогда не будет. Причина этого в том, что **прикладная ТК – вовсе не математическая задача!** Это – ансамбль разнообразных вычислительных (!) проблем, полностью и навсегда разрешившихся в теории и разработках российской научной школы Оптимизационной Теории помехоустойчивого кодирования.

Ключевые слова. Теория кодирования (ТК), Оптимизационная Теория (ОТ), многопороговые декодеры (МПД), алгоритм Витерби (ВВ), гауссовский канал (АБГШ), LDPC коды, самоортогональные коды (СОК), декодеры с прямым контролем метрики (ДПКМ), символные коды, полярные коды (ПК).

1. Введение.

Завершение в этом тысячелетии издания целого ряда монографий российской научной школы Оптимизационной Теории (ОТ) с полным изложением принципиально новой теории кодирования (ТК) [1-5], т. е. уже современной ОТ, а также давно ожидавшегося Справочника-2 [6] по кодированию для цифровой связи создало условия для переоценки текущего состояния прикладной ТК и анализа предпочтительных направлений её дальнейшей эволюции.

В ОТ разработаны совершенно особые, базирующиеся на компьютерных вычислительных и моделирующих методах, технологии исследований и проектирования высокоэффективных алгоритмов коррекции ошибок в шумящих цифровых каналах всех классических типов, традиционно анализировавшихся и в прежней ТК, и в современной ОТ.

Минимально возможная линейная от длины кодов n сложность декодирования алгоритмов ОТ и их оптимальная, наилучшая достижимая даже с точки зрения теории достоверность при использовании достаточно длинных кодов соответствуют полному решению проблемы Шеннона: - простейшей высокодостоверной передачи «цифры» почти во всей области кодовых скоростей R , меньших пропускной способности канала C . Тем самым прежняя излишне математизированная ТК полностью превращена усилиями научной школы ОТ в целый ряд удобных детально расписанных процедур оптимизационного типа для задач проектирования, исследования и настройки алгоритмов коррекции ошибок. Такие процедуры хорошо адаптируются к задачам исследований декодеров технологически доступных классов для всех рассматриваемых в ТК базовых типов каналов связи, что и позволило школе ОТ достичь действительно очень высоких результатов по сложности и эффективности среди всех алгоритмов коррекции ошибок, анализируемых в прикладной ТК.

Ниже рассмотрены состояние и возможности алгоритмов ОТ в сопоставлении с другими методами, а также другие важные проблемы, которых за полувековой период застоя этой важнейшей науки цифрового мира накопилось слишком много. Большинство ссылок на литературу к обзору согласно уже давней традиции школы ОТ сопровождается активными гиперссылками, что уже давно стало фактически обязательной традицией для всех публикаций школы ОТ. Тем самым всем читателям обзора предоставляется максимально удобный оперативный доступ ко многим упоминаемым в нём сведениям, существенно облегчая анализ результатов ОТ, **единственной на текущий момент современной полной прикладной (!) теории кодирования**, много лет успешно решающей задачи создания алгоритмов декодирования цифровых потоков и формирующей условия для решения новых технологических проблем обработки информации в условиях её передачи по сильно шумящим каналам связи.

Поскольку читателям обзора, как получается, сразу легко и оперативно доступен огромный объём публикаций школы ОТ, то позволим себе, как мы уже с пользой для дела неоднократно поступали, указать и на несколько популярных ссылок, которые удобны и очень полезны для первого чтения материалов ОТ, где мы указываем и **все главные графические результаты** по характеристикам декодеров ОТ [5-7,9, 11, 12, 15]. Отметим, что последняя ссылка относится к очень компактному изложению абсолютно полной теории ОТ на английском всего на пяти страницах и с графиками экспериментальных данных новейшего времени. А научно-популярный цветной буклет [8], написанный с участием членов РАН и с предисловием академика РАН Н.А. Кузнецова давно и с особым вниманием читается и сторонниками ОТ, и многими специалистами, наряду с новыми читателями внимательно отслеживающими развитие методов и технологий ОТ. Указанных выше ссылок вполне достаточно как

для первого знакомства с материалами ОТ, так и для её последующего изучения. Абсолютная доступность разнообразных программных ресурсов [5-7], - важнейших рабочих инструментов теории ОТ, - тоже всегда полезна на всех этапах знакомства или интенсивной работы с технологиями ОТ. Справочник-2 [6] продаётся в интернет-магазинах и издательством ГЛТ.

Отметим также, что для будущего, возможно, нескорого восстановления научного сотрудничества с зарубежьем наши новые монографии по ОТ сопровождаются их частично сокращёнными переведёнными на английский текстами в [7].

2. Сравнительные достоинства технологий ОТ.

Согласно основным результатам ОТ сложность N алгоритмов многопорогового декодирования (МПД), т. е. число простейших выполняемых ими операций, пропорциональна длине n используемых кодов: $N \sim n$. Другие эффективные декодеры много сложнее, чем методы ОТ, что очень существенно.

Далее, МПД декодеры и все версии алгоритма Витерби (АВ), в том числе его блочный вариант (БАВ), запатентованный школой ОТ, в процессе работы измеряют расстояние своих решений до принятого из канала вектора [4-7]. Это многократно упрощает декодирование и одновременно повышает достоверность итоговых решений до оптимальных. Среди прочих классов декодеров столь полезного свойства прямого контроля метрики (ДПКМ) ни у каких методов декодирования вообще нет.

Очень ценно и то, что МПД и АВ оперируют только с небольшими целыми числами, что особенно важно при реализации декодеров для быстрых каналов на высокоскоростных вычислительных средствах с сокращённым числом команд и на ПЛИС. А трудности реализации декодеров прочих классов по сравнению с алгоритмами ОТ оказываются по этой причине сразу во многие десятки раз большими, поскольку тем другим алгоритмам практически всегда приходится оперировать с действительными числами, что на быстрой элементной базе с небольшим числом доступных операций, например, на сигнальных процессорах, сделать гораздо сложнее [5,6]. Особая важность этого свойства декодеров ОТ демонстрируется одним из множества их сверхскоростных реализаций на ПЛИС ALTERA в ИКИ РАН [5-8]. Соответствующий МПД для спутникового канала со скоростью обработки информации (декодирования) более 1 Гбит/с, созданный по патенту школы ОТ, до сих пор не имеет аналогов среди прочих реальных разработок для космоса. За этот выдающийся успех в сфере проектов новых космических систем ИКИ РАН был удостоен единственной за всё время его участия в Международных салонах изобретений Золотой медали [4(с.148),5(с.173),6(с.118),7,8(с.24)].

3. Абсолютные преимущества декодеров ОТ.

Как уже много десятилетий хорошо известно, выполнить достаточно приемлемые по точности расчёты для параметров критерия ПДС \equiv «помехоустойчивость-достоверность-сложность» любых эффективных декодеров при большом относительном уровне шума цифрового канала очень трудно, фактически вообще невозможно. Именно это обстоятельство стало главной причиной полной самоликвидации прежней прикладной (!) теории кодирования (ТК) как математической задачи, т. к. компьютерным проектированием и моделированием своих алгоритмов, как пока получается, «теоретики» всего мира совершенно не владеют, а оценивать главные свойства декодеров по критерию ПДС при больших вероятностях искажения дискретных данных, т. е. при больших относительных уровнях шума в каналах связи эти «теоретики» никогда не смогут. В этих условиях чрезвычайно странно нередко видеть сведения о сложности и достоверности алгоритмов, которые авторами, как это всегда оказывается совершенно очевидным, не моделировались. Тем не менее, таких работ непозволительно много (см.[5-12,14,]). Многие странности в подобных результатах свидетельствуют о том, что детальное пошаговое логическое проектирование и моделирование алгоритмов с использованием собственного специального программного обеспечения (ПО) такие авторы вообще никогда не проводили. Но так как оценить никакие главные параметры декодеров аналитически невозможно, то развитие прежней ТК быстро, ещё в 70-х годах того тысячелетия просто остановилось. И это не могло быть иначе, поскольку математически решаемых проблем в прикладной ТК, т. е. при создании алгоритмов декодирования фактически никогда и не было [5,6,8]! Это верно даже для всех самых простых декодеров любых типов [5,6]. Понятным исключением из этого правила являются лишь алгоритмы для алгебраических кодов, которые, однако, всегда исправляют слишком малое число ошибок в принятых данных и, следовательно, малоэффективны, что для реальных систем связи давно не представляет никакого интереса.

В ОТ осознание того, что точно вычислить параметры декодеров почти никогда не получится, пришло очень давно, на рубеже 60-х. И компьютерное проектирование с последующим моделированием декодеров сразу стало мощным средством разработки, а также оценки и настройки параметров проектируемых и исследуемых алгоритмов, что современное программное обеспечение (ПО) школы ОТ позволяет реализовать фактически «мгновенно». Это многократно увеличивает скорость исследований, а также решительно снижает возможность появления серьёзных неудач и ошибок [8,16]. Однако надо всегда помнить, что

полноценное развитие теории и эксперимента возможно только при сохранении и активной поддержке их неразрывного глубокого единства.

Наконец, укажем на третье очень значимое преимущество всех алгоритмов ОТ. В МПД декодерах, действительно простейших устройствах или программах, единственное активное устройство - это пороговый элемент (ПЭ). Поскольку он работает только с небольшими целыми числами, его всегда можно спроектировать так, что, с учётом свойств используемых кодов, он будет выносить решения о декодируемых символах как бы мгновенно, что и было давно запатентовано школой ОТ [5-7]. А это сразу решило все проблемы реализации алгоритмов! Ведь, кроме того, что МПД декодеры имеют минимально возможную сложность $N \sim n$, оказывается, что для этих МПД ещё и коэффициент пропорциональности при n совсем небольшой. А прочие алгоритмы всегда реализуют несравненно более сложные вычисления. Так что МПД методы имеют исключительно большие преимущества и в физической скорости декодирования благодаря абсолютной простоте алгоритма, что давно демонстрируется тем ПО, которое интерактивно рекомендуется и может свободно применяться в [4-7]. Во многих таких примерах при моделировании работы МПД в шумящих каналах статистика декодирования объёмом $10^8 \div 10^{10}$ битов набирается на обычных пользовательских ноутбуках за ~ 1 час работы модели [6,8,9]. Воистину, куда уж проще и быстрее!

4. Об эффективности алгоритмов ОТ.

Отметим ещё раз, что вероятности ошибки декодирования в ОТ оказываются даже с точки зрения теории наилучшими для тех весьма длинных кодов, которые применяются в МПД декодерах. И это свойство сохраняется у алгоритмов ОТ вплоть до ближайших окрестностей границы Шеннона, т. е. почти до пропускной способности канала C .

В частности, для технических средств связи удалённость рабочей области для МПД декодеров от границы Шеннона порядка 1 дБ в двоичных гауссовских каналах абсолютно достаточна, т. к. это всего на 26% больше той энергетики, при которой никакого выигрыша по достоверности декодирования и по энергетике передачи при выбранной кодовой скорости R уже вообще не может быть даже теоретически. А реальные каналы характеризуются ещё и некоторым дрейфом параметров аппаратуры и эфира, что может составлять до 10%÷15% и более. Так что дальнейшее приближение границы области работы декодеров к пропускной способности каналов C для реальной аппаратуры вовсе не столь актуально, тем более, что это всегда требует ещё и крайне большого роста задержки принятия решения используемым в этом канале декодером.

Разумеется, эта научная задача сохраняется и решается, в том числе, для уникальнейших и часто крайне дорогих каналов дальней космической связи. Но для большинства технических приложений уже давно имеющиеся результаты ОТ для двоичных кодов вполне достаточны [4-8].

Далее, как показано в [4-8], в стирающих каналах преимущества методов ОТ очень велики. В прежней весьма формальной ТК сложность восстанавливающих стирания декодеров, как и в гауссовских каналах, обычно не менее $N \sim n^*(\ln n)$, что для этого гораздо более простого случая стёртых символов канала, как считает школа ОТ, сразу оказывается неоправданно сложной постановкой задачи, т. к. в этом случае позиции таких символов известны. И здесь тоже непонятно, как специалисты других направлений в ТК определяют параметры соответствующих декодеров, поскольку вычислить их и тут никак нельзя. Но моделированием эти авторы обычно не владеют. И стоит ли тогда доверять тем результатам?

А алгоритмы МПД напрямую пользуются фактом знания позиций стираний. И с учётом этого очевидного преимущества более естественной постановки задачи значение стёртого символа однозначно определяется декодером, выполняющим единственную операцию подстановки. А более ничего вычислять и не надо! Это определило успех ОТ и в этой сфере разработок декодеров. А граница рабочей области алгоритма по входной вероятности стёртых символов канала в этом случае отличается от той вероятности p_c , при которой $R=C$, всего на $\sim 2\%$. Значит, и в этих каналах у МПД нет вообще никаких конкурентов по критерию ПДС [5-8,15]. Снова подчеркнём, что, как и для других алгоритмов ОТ, тут тоже необходим весьма тщательный отбор кодов, используемых декодером, по критериям минимального группирования ошибок в самом декодере [4-6]. Но и эти технологии известны уже ~ 40 лет.

Наконец, для особых не двоичных кодов с мажоритарным декодированием, названных символьными, в школе ОТ изобрели и запатентовали особый простой алгоритм, также с линейной сложностью сходящийся к оптимальному решению. А открытые 60 лет назад коды Рида-Соломона (РС) имеют квадратичную сложность их алгоритмов декодирования $N \sim n^2$. Для реальных приложений коды РС обеспечивают только ограниченную достоверность из-за их небольшой длины при всех доступных вариантах реализации. При этом, методы коррекции ошибок для всех других типов не двоичных кодов крайне сложны или вообще принципиально нереализуемы по этой же причине [9]. Важно, что и алгоритм Витерби для не двоичных кодов с большим алфавитом всегда малоэффективен [5,6]. Это особенно выделяет мажоритарные не двоичные МПД алгоритмы, названные символьными и предложенные ещё до 1985г., среди всех прочих методов.

Представляется удивительным то, что при всей важности недвоичных кодов и слабости кодов РС применение символьных кодов, давно всесторонне рассмотренных в ОТ и полностью опубликованных, нигде за последние 35 лет не отмечено [5-9]. Причина этого, возможно, снова в том, что никто из «теоретиков» за это время не смог смоделировать недвоичные пороговые элементы (ПЭ), хотя они фактически столь же просты в реализации, как и двоичные. Однако уже 20 лет и сами программы моделирования «символики» от школы ОТ тоже общедоступны [4-7]. И при всём этом даже таких результатов моделирования уже давно опубликованных символьных кодов также ни у кого найти нельзя. Ничего нет!

Значит ли это, что наука давно достигла принципиально невосстанавливаемого уровня, на котором наступает полная некомпетентность её весьма обширных отраслей и обретающихся там «учёных»? Ведь в прикладной ТК все беды возникли и стали множиться просто оттого, что никто ничего не знает, не учит, не понимает и, следовательно, не хочет делать, в том числе и заниматься экспериментами. А вот бездельничать в «теории» - это всегда пожалуйста! Никто вас не обвинит в том, что какая-то формула в той или этой статье никому не нужна. У «математиков» такие комментарии недопустимы в принципе! Кстати, иногда это жаль. А конкретно в ТК эксперимент – это всегда моделирование средствами программирования. И тут ничего другого нет и не будет! Здесь нет ничего похожего на замену проводочков в катушках магнитометра, или на очистку оптики спиртом у физиков. Увы! Настоящее программирование при реальном хлопотном инновационном проектировании и последующем моделировании новых алгоритмов – это совершенно адский труд, по сравнению с которым галеры – курорт! Именно поэтому «теоретиков» такая судьба в течение 50 лет печального бытия «формульной» ТК вообще никогда не воодушевляла. А будут ли в таком случае у школы ОТ достойные продолжатели её теории и технологий, основанных на чётком и логичном базисе ОТ, которые, однако, требуют и обязательного дальнейшего создания масштабных программных средств проектирования высочайшего инновационного и обязательно оптимизационного уровня? - Увидим. Время покажет!

А пока прежняя крайне математизированная ТК и её адепты просто не могут моделировать, правильно проектировать алгоритмы декодирования, верно выбирать постановки очередных задач, а также гармонично развивать теорию и эксперимент [8-12,14-16]. Значит, надо что-то сильно менять. И – несомненно - многое. А что именно – тут мы кое-что выше указали. На самом же деле пока забот, проблем и только потом, возможно, каких-то заслуженных успехов, - море!

5. Ключевые свойства технологий ОТ

Ушедшая в небытие прежняя теория кодирования (ТК) жёстко доказала «теоретикам», что **ТК – вовсе не математическая задача**. Но - тогда какая?

Успех ОТ определяется тем, что она является очень компактной совершенной единой трёхкомпонентной теорией, состоящей из теорий поиска глобальных экстремумов функционалов (ПГЭФ), обобщений Основной Теоремы многопорогового декодирования (ОТМПД) и Теории Размножения Ошибок (ТРО). Этих трёх компонент ОТ вообще не было в прежней ТК, что и позволяет считать ОТ новой полной современной теорией помехоустойчивого кодирования, которая открывает для техники цифровой связи огромные возможности для ускоренного развития. И все три компоненты новой ОТ скрепляются воедино общим программным обеспечением (ПО), которое успешно решает все те задачи ОТ, которые не имеют простых конечных формульных выражений в рамках прежней ТК. Именно с появлением ОТ, совершенно отличной от старой ТК, созданные ею декодеры по всем параметрам критерия ПДС \equiv «помехоустойчивость-достоверность-сложность» стали наилучшими даже и теоретически. А это и есть полное решение великой проблемы Шеннона о простой высоко-достоверной связи по цифровым каналам с большим относительным уровнем шума, с чем согласен ряд наших коллег, в том числе в РАН, считающих комплекс научных и прикладных результатов школы ОТ выдающимся нобелевским достижением российской науки [5,7,8,17,18].

Подчеркнём здесь ещё раз, что успех и лидерство научной школы ОТ, далеко опередившей в теории, в своих методах и технологиях весь остальной цифровой мир на ~25 лет, определило то программное обеспечение (ПО), которое эта школа интенсивно создавала в течение 50 лет на базе своих тонких оценок параметров кодов и алгоритмов с использованием всех возможностей составляющих её трёх теорий.

Напомним, что вечная конкуренция теории и эксперимента в исследованиях особенно обострилась в 80-х годах того века настолько, что ряд весьма значимых публикаций на эту тему был представлен даже на портале РАН [16]. А школа ОТ ещё на самой заре своего становления осознала, что почти все задачи в ТК, как и вообще масштабные проблемы оптимизационного типа, никогда не имеют аналитически представляемых итоговых формульных решений. Многие такие заведомо не формулируемые аналитически проблемы прикладной ТК инновационное ПО школы ОТ успешно решает также, как и те задачи теории ОТ, даже к выбору которых никакие научные группы нашего цифрового мира ещё и не приступали.

6. О развитии образования по тематике ОТ.

Теоретические исследования в области ОТ были завершены ещё до 1985г., а её всесторонние проверки экспериментального плана оказались оконченными к 1995г. Издание научной школой ОТ своих 16 книг, а также двух справочников, позволяющих опробовать и сразу непосредственно применять компьютерные средства проектирования, настройки и испытаний алгоритмов декодирования нашей школы, создают все условия для изучения с необходимой степенью детализации и глубины всех типов алгоритмов МПД, а также всех модификаций алгоритма Витерби, включая запатентованные школой экономные по памяти его двухпараметрические блоковые версии (БАВ) [4-8].

Вместе с тем после 1986г. никакие публикации по тематике ОТ не принимаются редакцией журнала ППИ, что определяется стандартными ответами их рецензентов авторам статей по ОТ, согласно которым «...вероятностные характеристики декодирования получаются только моделированием...» (каково!)или «...автор не знаком с современными работами по помехоустойчивому декодированию...» (да?) и далее в таком же духе [19]. Но уровень демонстрируемого в ИППИ «формульного фетишизма» давно стал безграничным. Именно поэтому у традиционных авторов ППИ из ИППИ РАН и через 20 лет после этого запредельно некачественного отзыва на безусловно революционное достижение школы ОТ уже почти сорокалетней давности в недвоичных кодах так и нет ничего нового по этой тематике, хоть отчасти приближающегося к уровню той непринятой ими публикации, где описывался алгоритм с линейной сложностью и оптимальным декодированием недвоичных кодов. В мире тогда не было никаких подобных результатов вообще! Их нет для недвоичных кодов и сейчас! А новейшие результаты школы ОТ по этим символьным алгоритмам стали ещё более впечатляющими [4,5,8,20,21]. Подчеркнём, кстати, что и за рубежом по недвоичным кодам с линейной сложностью и оптимальным декодированием тоже вообще никаких работ нет [9]. Они также ничего не читают? Отчасти, да, это верно. Не прочли внимательно сотни наших работ на английском, включая три наших фундаментальных монографии по кодированию (см. об этом [5-9]). Это потому, что наши результаты не очень высоко ценятся. Однако ж Евросоюз лишь нескольких российских учёных наградил Золотой медалью "For exceptional achievements/За исключительные достижения" в науке. Наша – именно за теорию ОТ. А одну из наших монографий издал Международный союз электросвязи (МСЭ/ITU), организация под эгидой ООН.

Но, возвращаясь к теме, на портале www.mathnet.ru целый ряд статей авторов «школы ИППИ» продемонстрировали крайне низкую помехоустойчивость и очень большую сложность их алгоритмов, причём

стиль публикаций и этих результатов не позволяет понять, как там определяются параметры критерия ПДС, поскольку вычислить их принципиально нельзя. А моделированием те авторы, как мы знаем, тоже не владеют в принципе. Некоторые новые опубликованные декодеры «школы ИППИ» примерно на 2 порядка слабее по входной вероятности ошибки (!), чем экспериментальные результаты школы ОТ на этом же портале, уже опубликованные в ППИ на 30 лет раньше (см. об этом [6]).

В текущей ситуации, однако, все защиты диссертаций по ТК до сих пор одобряются исключительно в ИППИ РАН, все «к.т.н/д.т.н.» по разрешённой этой «цитаделью науки» тематике проповедуют в своих учебных курсах по ТК в ВУЗах методы декодирования 30÷40-летней давности, что вообще полностью остановило в РФ развитие технологий ТК и собственно всё цифровое вузовское образование. Обучать будущих специалистов технологиям ОТ по-прежнему просто некому, что совсем закрыло доступ к новым технологиям и на предприятиях ВПК, для которых наука была до недавнего времени не столь актуальна, поскольку вся аппаратура цифровой связи многие десятилетия приобреталась только за рубежом. Но из-за этого, видимо, наш ВПК находится сейчас вообще вне цифрового мира.

Отметим кратко и самые не в меру «широко известные достижения» в сфере «образования» в ВУЗах, применения и использования которых следует избегать всегда и везде. Одним из наиболее опасных в этом смысле, несомненно, является пособие «Основы теории кодирования» [13], в котором рассмотрены алгоритмы почти оптимального декодирования для кодов средней длины со сложностью, превышающей, число атомов во Вселенной (см. об этом: [6-8])!

Но, кроме того, для изучения студентами там же предлагаются ещё и блочные версии оптимальных декодеров (ОД) на базе известных структур со свёрточными кодами, для которых экспонента сложности декодирования вдвое больше, чем даже у соответствующего также экспоненциально сложного классического алгоритма Витерби (АВ) для свёрточных кодов.

И тут очень важно, что блочная версия АВ (БАВ), запатентованная школой ОТ [4-7], имеет такую же сложность, что и у исходного свёрточного АВ. Для ряда конкретных известных реализаций свёрточного АВ аналогичный ему ОД на базе БАВ школы ОТ был бы до $10^4 \div 10^6$ раз проще, чем ОД, предлагаемый студентам в [13]. Более ничего содержательного в том пособии совсем нет. Тем не менее, уже много лет эта книга агрессивно предлагается для изучения студентами ВУЗов. И других пособий для специалистов и студентов в РФ, кроме справочников школы ОТ [1,6] и её новых монографий [3-5] с детальными методами, программными платформами и конкретными технологиями проектирования, моделирования и настройки всех типов систем кодирования, вообще нет. Но материалы школы ОТ не используют нигде.

Полное отсутствие читаемых курсов по ОТ где-либо в ВУЗах РФ крайне опасно для техники связи, всех смежных цифровых областей, а также для дальнейшего развития и поддержания безопасности нашей страны, которая остаётся вне мира технологий цифровой связи.

7. О прочей деятельности в ТК

Абсолютное отсутствие, как это и ранее отмечала школа ОТ, у автора пособия [13] хоть каких-либо знаний об ОТ в очередной подтвердилось в результате его совершенно необдуманного участия в написании «обзора» по кодированию для одного уважаемого журнала по тематике телекоммуникаций. Из-за исключительно вредного для непрофильных специалистов опубликованного там текста от автора [13] (тут уже - и с соавторами!) одному из руководителей школы ОТ пришлось отложить все свои дела и написать на тот «обзор» свой крайне отрицательный комментарий [22], основной вывод которого в том, что матчасть в теории кодирования надо учить и знать очень хорошо!

Большое число авторов из Ульяновска преуспело в издании немалого числа «книг по ТК», основой методов которых является рукотворное ухудшение качества канала (!?) путём стирания наиболее ненадёжных символов (см.: [8,14]). На какие-либо конкретные ошибки этого «творческого коллектива» невозможно вообще указать потому, что даже хотя бы исходных правильных содержательных формулировок задач, относящихся к ТК, у них просто совсем нет. Студенты Университета на Волге по вине этих околонуучных «фантазёров», как мы полагаем, теперь уже навсегда (!?!) полностью лишены своей «профессурой» понимания каких-либо задач из области ТК.

Опубликованные книги по быстрым «новым» алгоритмам декодирования различных авторов также абсолютно не являются таковыми (см. об этом: [8,14]). Число подобных «откровений» увеличивается. Но в прикладной ТК вообще всё уже очень давно, ещё до 1985г., сделано школой ОТ, улучшить результаты которой по критерию ПДС практически уже и просто невозможно.

Наконец, непонятно как совсем недавно защищённые при активном участии ИППИ РАН «диссертации» по полярным кодам тоже невозможно охарактеризовать в терминах критерия ПДС, т. к. сложность исключительно вольно описанных там «полярных процедур» ориентировочно в $\sim 10^4 \div 10^6$ раз больше, чем у аналогичных декодеров школы ОТ для символьных (недвоичных) кодов, полностью опубликованных уже почти 40 лет назад. И, более того, все оценки алгоритмов у российских «адептов полярной тематики» выполнены совершенно непонятными методами, а результаты экспериментальной проверки характеристик заявленных алгоритмов, как

пока получается, до сих пор нигде и ни в каком виде ими так и не предьявлены. Видимо, их никогда и не будет. Подчеркнём, что многие их «смелые фантазии», ошибки и откровенный обман были детально зафиксированы прямо на защите одного их «лидеров российских полярников» оппонентами и другими участниками того крайне странного «процесса». Вопрос о причинах положительного голосования спецсовета ИППИ РАН по итогам этого крайне прискорбного во всех смыслах «мероприятия» также заслуживает очень строгого разбора.

Однако весьма опасные попытки рекламы и распространения «полярных методов» уже неоднократно имели место. Все эти деяния, разрушающие хрупкое тело очень слабой пока науки о кодах, нужно срочно и резко прекратить с соответствующими строгими оргвыводами по кадрам, программам исследований и методам управления.

8. Заключение.

В условиях глубокого кризиса науки и технологий научной школой ОТ после выполнения несколькими поколениями сторонников этой школы грандиозного объёма научных, методических и технологических работ завершён важный этап создания обширного полного набора средств проектирования, настройки и испытаний различных типов декодеров школы ОТ для всех классов каналов, рассматриваемых в теории кодирования (ТК). Поскольку по критерию ПДС алгоритмы ОТ имеют наилучшие даже согласно теории параметры, появление столь же простых и эффективных декодеров совершенно другого типа пока представляется весьма маловероятным.

Многолетний кризис в технологиях кодирования завершён в связи с тем, что прикладная ТК, вроде бы сориентированная на создание хороших декодеров для цифровых потоков в сильно шумящих каналах была вовсе не математической задачей, что и доказала та прежняя до предела формализованная ТК. Реальная успешно работающая ОТ оказалась совокупностью совсем других очень разнообразных технологий для решения задач поиска глобальных экстремумов специальных функционалов, определяемых на дискретных множествах с потенциальными свойствами самокоррекции. Эти экстремумы всегда достигаются особым образом настроенными алгоритмами оптимизации, реализуемыми в процессе проектирования декодеров исключительно инновационными компьютерными методами школы ОТ на базе созданного за 50 лет уникального инновационного ПО. Никаких формульных компактных выражений такие очень большие проблемы цифрового мира, как прикладные задачи ТК, не могут иметь в принципе. Именно масштабная разработка такого ПО для разных каналов и кодов и определила безусловное лидерство теории ОТ, которая обеспечила точные постановки задач, решаемых созданным ею

ПО, а также весьма непростую интерпретацию большого множества итоговых результатов применения уникального ПО школы ОТ, которое действительно обеспечило развитие прорывных технологий в прикладной теории кодирования, в её полностью обновлённой теории ОТ.

Чрезвычайная важность полученного научного и прикладного результата: - полного успешного и в реальности очень непростого решения величайшей проблемы цифрового мира, сформулированной в 1948г. великим К. Шенноном и до сих пор не решённой где-либо ещё в мире, кроме научной школы ОТ, завершившей работу над этим действительно нобелевским достижением после 50 лет грандиозных усилий, - эта важность состоит в том, что итоговые действительно наилучшие по критерию ПДС алгоритмы школы ОТ остались безусловно крайне простыми, понятными и абсолютно доступными для всей огромной армии учёных, специалистов, аспирантов и инженеров, поскольку они относятся к простейшим общеизвестным методам мажоритарного декодирования и крайне популярному алгоритму Витерби, которые, однако, получили теперь в теории ОТ обширные возможности в сфере особых тонких настроек своих параметров. Оба этих класса методов давно и хорошо знакомы российским специалистам, а также разработчикам цифровых систем всего технологически продвинутого мира. А что касается особенностей проектирования и обязательного итогового моделирования новых изобретаемых алгоритмов уже на основе принципиально новых масштабных средств и технологий именно той вычислительной техники, для развития которой системы декодирования как раз и создаются, - это настолько естественное, более, чем своевременное и обязательное преобразование системы исследований в теории кодирования, в нашей ОТ, что гармоничности нового состояния всей теории помехоустойчивого кодирования могут, как нам кажется, позавидовать многие другие отрасли нашей сверхкризисной науки.

Но поводов для абсолютной радости и восторгов пока немного. Чиновники, много десятилетий разрушавшие российскую теорию кодирования, до сих пор не получили по заслугам. Более того, безбедно и вольготно существующие бесполезные в ТК группы, сохранившие иллюзии о «математичности» ТК и в прикладном своём аспекте, так и не получили за последние ~40 лет каких-либо значимых для проектирования алгоритмов декодирования результатов. Этим определяются и все странные пируэты со многими явно тупиковыми направлениями поиска разными «уполномоченными» от ИППИ «к.т.н./д.т.н.» совсем необычных и провальных решений для алгоритмов декодирования, наиболее яркими и абсолютно катастрофичными среди которых оказались, конечно, полярные коды (см. специальную страницу о «полярах» [23] на наших порталах). Однако, как уже неоднократно удивлялись сторонники школы ОТ, полная неспособность крайне необразованных и абсолютно неадекватных

«теоретиков» проверить свои «мыслеформы о полярах» в экспериментах, которые можно было бы сопоставить с широко представленными результатами в ОТ, полностью закрыло всё пространство развития и для «полярнов». Никто из этой очень шумной российской «рок-группы про коды» никаких результатов не предъявил, а те отдельные их данные о сложности и прочих свойствах декодеров для полярных кодов, которые были, скажем так, по неосторожности указаны отечественными «диссерделателями», по непонятным причинам успешно защитившимися в ИППИ РАН, оказались абсолютно неприемлемыми для каких-либо серьёзных обсуждений. Ведь нельзя же хоть как-то без улыбки обсуждать их «откровения» о том, что «... в полярных кодах все задачи были решены гораздо раньше, чем в теории ОТ...» (см.: [24, стр.10]). Но теория ОТ уже очень давно ликвидировала вообще все реальные технологические проблемы декодирования «цифры», а что решила и чего достигла та «теория от российских полярщиков» - этого у нас до сих пор никто вообще не знает, т.к. они ни разу не доложили об этом нашей науке. А самое забавное тут то, что первая очень слабая во всех смыслах статья о полярных кодах была опубликована лишь **в 2009г.**, тогда как вся теория ОТ была полностью и успешно вместе со всеми прикладными проблемами ТК завершена на 25 лет раньше, ещё **до 1985г.** Так что пока очевидно только то, что российская «полярная компания» четверть века до своих «защит диссертаций» не видела теорию ОТ с её 11 монографиями под научной редакцией и с участием членов и академиков РАН и два её справочника, но смело бросилась писать свои невероятные «фантазии» на чрезвычайно странную и крайне нелогичную «полярную» тему. Можно ли считать российских индивидов, ведущих себя и до своих «защит» и, конечно, после них безумными деградантами – нам это совершенно неинтересно. Но факты полной неуправляемости российской науки в своих важнейших аспектах и отраслях вопиюще свидетельствуют о необходимости быстрой и жёсткой реакции на все проявления разрушительной деятельности и крайней деградации отдельных её чиновников и прикрываемых ими функционеров. Исходя из этого, участие в этих процессах ИППИ РАН заслуживает совершенно самостоятельного строгого расследования и соответствующих выводов.

А более в реальности ничего нового в этом тысячелетии в плане реального прогресса в создании алгоритмов декодирования так и не появилось. Да, в общем, и не должно. Ведь характеристики алгоритмов ОТ по триединому критерию ПДС лежат фактически на наилучших даже в теоретическом смысле границах. Проблема Шеннона действительно полностью решена на высочайшем научном и технологическом уровне. Так что теперь надо далее ускорять развитие технологий ОТ уже для новых гораздо более сложных систем сигналов и сетей телекоммуникаций, что также уже давно начала постепенно делать и школа ОТ [2,3,20,21].

Снова подчеркнём, что наше уникальнейшее единственное в мире ПО для создания эффективных простых декодеров, как и вся строгая компактная и сбалансированная теория, изложенная в наших монографиях и справочниках, свободно доступны и готовы к применению в мире цифровой связи будущего гуманного информационного сообщества нашей планеты, которое, конечно же, совсем не быстро, но будет обязательно построено.

Приглашаем всех к сотрудничеству!

Список литературы

1. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник. Под научной редакцией члена-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева // М., Горячая линия — Телеком, 2004, 126 с.
https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2020/11/mtd_handbook1.pdf.
2. Золотарёв В.В. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования. Под научн. ред. члена-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева // М.: Радио и связь, Горячая линия — Телеком, 2006; 224 с., второе издание - 2014.
<https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2020/11/teoriya-i-algoritmy-2006.pdf>.
3. Золотарёв В.В., Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В. Многопороговые декодеры и оптимизационная теория кодирования. Под ред. академика РАН В.К.Левина. // М.: Горячая линия — Телеком, 2012, 238 с.
https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2020/11/zolotarev_ok2012.pdf.
4. В.В. Золотарев. Теория кодирования как задача поиска глобального экстремума. Под научной редакцией академика РАН Н.А. Кузнецова. // М., "Горячая линия - Телеком", 2018, 221 с.
[Портал РФФИ \(rfbr.ru\)](https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2021/10/kniga-2018-pro-globalnyj-poisk.pdf) ,
<https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2021/10/kniga-2018-pro-globalnyj-poisk.pdf>
5. В.В. Золотарёв. Оптимальные алгоритмы декодирования Золотарёва. Под научн. ред. члена-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева // М.: Горячая линия-Телеком, 2021, 262 с.,
<https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2021/02/optimalnye-algoritmy-dekodirovaniya-zolotareva.pdf>.
6. В.В. Золотарёв. Кодирование для цифровой связи и систем памяти. *Справочник-2*. Под научной редакцией члена-корреспондента РАН Ю.Б. Зубарева. // М., «Горячая Линия – Телеком», 2022, 178 с.
<https://decoders-zolotarev.ru/nashi-knigi/>.
- 7.. Сетевые ресурсы ОТ: <https://decoders-zolotarev.ru> , www.decmtdzol.ru , www.mtdbest.ru и www.mtdbest.iki.rssi.ru .

- 8.. Кузнецов Н.А., Золотарёв В.В., Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В., Назиров Р.Р., Аверин С.В. Проблемы и открытия Оптимизационной Теории помехоустойчивого кодирования. (ОТ в иллюстрациях). — М.: Горячая линия — Телеком, 2020. — 36 с.
<http://www.mtdbest.ru/articles/comics.pdf> .
- 9.. Кузнецов Н.А., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Недвоичные многопороговые декодеры и другие методы коррекции ошибок в символьной информации // М., Радиотехника, 2010, №6, Вып.141, с.4–9.
https://mtdbest.ru/articles/radiotech_2010.pdf .
- 10.. Зубарев Ю.Б., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Итоги 25-летнего развития оптимизационной теории кодирования. // М., Научно-технические технологии. 2016, Т.17, с.26–32.
- 11.. Зубарев Ю.Б., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Новые технологии и парадигмы помехоустойчивого кодирования: после решения проблемы Шеннона // М., Электросвязь. 2019, №9, с. 56–61.
<https://mtdbest.ru/articles/elsv2020.pdf> .
- 12.. Кузнецов Н.А., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Назиров Р.Р., Сатыбалдина Д.Ж., Омирбаев Е.Д. Обзор проблем полярных кодов с позиции технологий Оптимизационной Теории помехоустойчивого кодирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020, Т. 17, №4, с.9–24,
<http://jr.rse.cosmos.ru/default.aspx?id=96> , (?),
<https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2021/01/zolotaryov-antipolyary-2020.pdf> .
- 13.. Кудряшов Б.Д. Основы теории кодирования: учебное пособие для вузов. // СПб.: БХВ-Петербург, 2016, 393 с.
- 14.. Золотарёв В.В., Зубарев Ю.Б., Смагин М.С. Преодоление системного кризиса в теории информации // Вестник связи. 2020, №8, с.25–35.
https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2021/01/vestnik-svyazi-vs_08_20_-1.pdf .
- 15.. Zolotarev V.V., Ovechkin G.V., Zung Ch. T. The Prospects of Optimization Theory Application for Solving Shannon Problem // Conference: 2022 24th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). March 2022. Moscow, Russian Federation. DOI:[10.1109/DSPA53304.2022.9790742](https://doi.org/10.1109/DSPA53304.2022.9790742) .
https://decmtdzol.ru/articles/OT_Application.pdf .
- 16.. Магаршак Ю. Число, возведённое в абсолют // Независимая газета, 09.09.2009.
https://mtdbest.ru/articles/theory_model.pdf .
- 17.. А.Н. Пылькин. К выходу в свет книги профессора В.В. Золотарёва.
https://decmtdzol.ru/articles/about_book2021.pdf .

- 18.. Kuznetsov N.A., Zolotarev V.V., Zubarev Yu.B., Ovechkin G.V., Nazirov R.R. Averin S.V. Problems and Discoveries of the Optimization Theory for Coding near Shannon's Bound (OT in illustrations) // Moscow: Hot Line - Telecom, 2020, 45P.
URL: <https://mtdbest.ru/articles/e-comics.pdf> .
- 19.. Отзыв рецензента ППИ на статью В.В. Золотарёва «Обобщение алгоритма МПД на недвоичные коды».
https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2020/11/qmpd07_second_reference_1.pdf .
- 20.. Овечкин П.В. Разработка алгоритмов повышения эффективности недвоичных многопороговых декодеров в системах передачи и хранения больших объёмов информации. // Дисс. канд. техн. наук, Рязань. РГРТУ, 2009.
- 21.. Овечкин Г.В. Теория каскадного декодирования линейных кодов для цифровых радиоканалов на основе многопороговых алгоритмов // Дисс. ... доктора тех. наук. — Рязань: РГРТУ, 2011, 301 с.
- 22.. В.В. Золотарёв. Комментарий о полярных кодах.
<https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2022/01/t8nfbn-comments2022.pdf> .
- 23.. Страница по тематике полярных кодов
<https://decoders-zolotarev.ru/antipolyary/> .
- 24.. Ответ критикам Оптимизационной Теории.
<https://decoders-zolotarev.ru/wp-content/uploads/2021/06/pismo-19-rabota-08-06-era.pdf> .