ежемесячный научно-технический журнал по проводной и радиосвязи, телевидению, радиовещанию

09/2019 ISSN 0013-5771

ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ

Цифровое звуковое радиовещание

В НОМЕРЕ:

МОНИТОРИНГ
Подготовка ИКТ-специалистов

В ПРЕДДВЕРИИ ВКР-19
Главный вопрос: доступ к РЧС

ЮБИЛЕЙ
70 лет НИИ Радио

КВ-РАДИОСВЯЗЬ
Телематическая система для арктических регионов

АФУ
Дипольная антенна АДА-1М

СПУТНИКОВАЯ СВЯЗЬ
Стенды для тестирования АРБ КОСПАС-САРСАТ

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКА

ЦИФРОВОЕ РАДИОВЕЩАНИЕ

14 Дотолев В.Г., Лашкевич А.В.
Цифровое звуковое радиовещание. Состояние и перспективы

КВ-РАДИОСВЯЗЬ

22 Лучин Д.В., Гавлиевский С.Л., Маслов Е.Н.
Масштабируемая телематическая система для арктических регионов РФ с использованием КВ-радиосвязи

СПУТНИКОВАЯ СВЯЗЬ

32 Проценко М.Б., Громоздин В.В., Коваленко В.И., Е.А. Брусин, Загородский С.А., Лаюшка В.В., Михайлова Е.А.
КОСПАС–САРСАТ. Подготовка к испытаниям на одобрение типа АРБ (АРМ) 2-го поколения

СЕТИ СВЯЗИ 5G

37 Молчанов Д.А., Ковальчуков Р.Н., Ометов А.Я., Кучерявый Е.А., Самуйлов А.К., Самуйлов К.Е.
Оценка отношения сигнал/шум в беспроводных сетях доступа пятого поколения

УПРАВЛЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЧС

45 Кизима С.В., Девяткин Е.Е., Пальцин Д.А.
Показатели, критерии и меры оценки эффективности использования радиочастотного спектра

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА

53 Никитин Ю.А., Белов С.А., Чернявский С.Ю.
Измерительная активная дипольная антенна АДА-1М

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ

56 Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В., Овечкин Г.В.
Новые технологии и парадигмы помехоустойчивого кодирования: после решения проблемы Шеннона

62 Быховский М.А.
Повышение энергетической эффективности систем связи за счет демодуляции многомерных сигналов со стиранием «ненадежных» символов

ЭКОНОМИКА СВЯЗИ

68 Григорьев В.А., Харин В.Н., Бондарева И.И., Мьинт М.
Анализ возможностей предоставления услуг IoT в узкополосных беспроводных сетях LPWAN

CONTENTS

14 DOTOLEV V.G., LASHKEVICH A.V.
Digital audio radio broadcasting. Status and prospects

22 LUCHIN D.V., GAVLIEVSKIY S.L., MASLOV E.N.
Scalable telematics system with HF radio for the Arctic regions of the Russian Federation

32 PROTSENKO M.B., GROMOZDIN V.V., KOVALENKO V.I., BRUSIN E.A., ZAGORODSKIY S.A., LAYUSHKA V.V., MIKHAILOVA E.A.
COSPAS-SARSAT. Preparation for type approval tests for second-generation emergency radio beacons

37 MOLTCHANOV D.A., KOVALCHUKOV R.N., OMETOV A.Ya., KOUCHERYAVY Y.A., SAMUYLOV A.K., SAMUYLOV K.E.
Evaluation of the signal-to-noise ratio in 5G wireless access networks

45 KIZIMA S.V., DEVYATKIN E.E., PALTSYN D.A.
Indicators, criteria, and measures of assessment of the effectiveness of radiofrequency spectrum use

53 NIKITIN Yu.A., BELOV S.A., CHERNYAVSKIY S.Yu.
Measuring active dipole antenna ADA-1M

56 ZUBAREV Yu.B., ZOLOTAREV V.V., OVECHKIN G.V.
New technologies and paradigms of error-correcting coding: after solving the Shannon's problem

62 BYKHOVSKIY M.A.
Increase of energy efficiency of communication systems by demodulation of multidimensional signals with the erasure of «unreliable» symbols

68 GRIGOREV V.A., KHARIN V.N., BONDAREVA I.I., MYINT M.
Analysis of the availability of IoT services in narrowband LPWAN wireless networks

75 Abstracts

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ПО ПРОВОДНОЙ И РАДИОСВЯЗИ, ТЕЛЕВИДЕНИЮ, РАДИОВЕЩАНИЮ. ОСНОВАН В 1933 ГОДУ

ISSN 0013-5771.
ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ. 2019, № 9. 1-76.

Главный редактор В.В. Бутенко, д.т.н.

Редакционная коллегия:
Арт.С. Аджемов, д.т.н.
В.А. Андреев, д.т.н.
А.С. Багдасарян, д.т.н.
С.В. Бачевский, д.т.н.
М.А. Быховский, д.т.н.
В.Н. Васильев, чл.-корр. РАН
В.В. Витязев, д.т.н.
Е.Е. Володина, д.э.н.
В.А. Григорьев, д.т.н. (шеф-редактор)
Ю.А. Громаков, д.т.н.
В.А. Ефимушкин, к.ф.-м.н.
Ю.Б. Зубарев, чл.-корр. РАН
О.А. Иванов, к.в.н.
С.В. Кизима, д.т.н.
А.Е. Крупнов, к.т.н.
К.И. Кукк, д.т.н.
А.Е. Кучерявый, д.т.н.
Н.В. Лемешко, д.т.н.
В.Н. Лившиц, д.э.н.
С.Л. Мишенков, д.т.н.
А.Р. Мкртчян, д.ф.-м.н.
Н.Н. Мухитдинов, к.э.н.
А.П. Ситис, к.э.н.
Н.П. Резникова, д.э.н.
Ю.М. Сподобаев, д.т.н.
К.А. Степаненко
В.А. Стрелец, к.т.н.
М.М. Ступницкий, к.т.н.
В.О. Тихвинский, д.э.н.
Р.В. Шередин, к.т.н.

Генеральный директор Анатолий Н. Гатилов
Ведущий редактор Наталия Ефимова
Над номером также работали: Ирина Богородицкая, Евгения Волынкина, Елена Беленькая, Максим Шибаев
Дизайн и верстка Екатерина Горожанкина

В соответствии с решением Президиума ВАК Минобрнауки России журнал «Электросвязь» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук (https://vak.minobrnauki.gov.ru)

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-45919 от 22.07.2011

Фото на обложке SCHUTTERSTOCK.COM

Адрес редакции: 105064, Москва, Казакова, 16
Тел.: +7 (495) 647-17-65.
E-mail: elsv@garnet.ru. **Сайт:** www.elsv.ru

Учредители: Региональное содружество в области связи, Международная академия связи, Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, ООО «Инфо-Электросвязь»

Сдано в набор 09.08.2019. Подписано в печать 28.08.2019
Печать офсетная. Формат 60x90x9. Изд. № 62.
Усл. кр.-отт. 14,12. Уч.-изд. л. 19,6. Усл. печ. л. 9.

Отпечатано в типографии: ООО «МЕДИАКОЛОР».
127273, Москва, Сигнальный проезд, д. № 19, стр. 1
тел./факс: +7 (499) 903-69-52, +7 (499) 903-69-53

Тираж 3000 экз.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.
© ООО «Инфо-Электросвязь»

Подписные индексы по каталогам:
«Роспечать» – 71107, «Пресса России» – 41411,
«Урал-Пресс» – 71107

фото: МТУСИ

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ

Новые технологии и парадигмы помехоустойчивого кодирования: после решения проблемы Шеннона

Ю.Б. Зубарев, советник генерального директора ЗАО «МНИТИ», член-корр. РАН, д.т.н.; osa@mniti.ru
В.В. Золотарев, ведущий научный сотрудник Института космических исследований РАН, д.т.н.; zolotasd@yandex.ru
Г.В. Овечкин, профессор Рязанского государственного радиотехнического университета, д.т.н.; g_ovechkin@mail.ru

УДК 621.391.15

Аннотация. *Анализируется ситуация, сложившаяся в прикладных исследованиях теории кодирования в результате решения проблемы Шеннона оптимизационной теорией помехоустойчивого кодирования. Обсуждаются нерешенные проблемы классической (алгебраической) теории. Рассматриваются результаты для основных кластеров алгоритмов декодирования, построенных на основе оптимизационной теории (ОТ). Намечены очередные задачи развития ОТ и предлагаются методы их решения. Отмечаются широкие возможности новых версий алгоритма Витерби (АВ). Показаны преимущества основных парадигм ОТ, в том числе достоинства символьных кодов и дивергентного кодирования. Выделена особая группа алгоритмов декодирования с прямым контролем метрики (ДПКМ). Названы основные пути развития теории кодирования на ближайшие годы и на перспективу.*

Ключевые слова: *цифровые системы связи, системы хранения данных, помехоустойчивое кодирование, блоковый алгоритм Витерби, компьютерное моделирование, символьные коды, каскадные коды, многопороговые декодеры (МПД), дивергентное кодирование, быстрые декодеры.*

ВВЕДЕНИЕ

Успешное решение в России прикладных и теоретических проблем в области создания простых и в то же время высокоэффективных алгоритмов помехоустойчивого кодирования цифровых данных в каналах с шумами свидетельствует о высоком потенциале российской информатики в данной отрасли знаний. Более 600 блоков справочно-методических данных на сетевых ресурсах ИКИ РАН и РГРТУ [1] отражают высокую динамику исследований научной школы оптимизационной теории (ОТ) кодирования: на эту тему опубликовано более 400 работ [2–7]. Выход в свет новой монографии по ОТ [7] потребовал детального анализа состояния классической теории кодирования, что должно способствовать выбору направления дальнейшего развития ОТ. Конкретные характеристики декодеров разных типов, здесь не представленные по причине их большого объема, приведены в [1–7].

СОСТОЯНИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ КОДИРОВАНИЯ

Через 70 лет после публикации исторической статьи К. Шеннона [8], поставившей перед наукой задачу обеспечения высокодостоверной цифровой связи по каналам с шумами, успехи теории кодирования, призванной решать эту проблему, можно считать одновременно и значимыми, и весьма ограниченными. Ее важнейшие результаты в области алгебраических кодов, полученные 60 лет назад, стали этапными достижениями для двоичных симметричных каналов (ДСК) без памяти, хотя и оказались весьма далеки от возможностей кодирования, предсказанных Шенноном. Поэтому неудивительно, что при сложности декодирования этих кодов N, которая даже меньше, чем $N{\sim}n^2$, где n – длина используемого кода (а сложность сразу стала одним из главных критериев применимости методов, исправляющих ошибки!), затем наступил период повсеместного применения алгоритма Витерби (АВ), сложность которого росла экспоненциально с длиной кодера K, но помехоустойчивость даже с короткими сверточными кодами в гауссовских каналах была несравнимо выше, чем у алгебраических кодов.

После появления недвоичных кодов Рида-Соломона (РС), которые быстро доказали свою полезность во многих технических приложениях, в следующие 60 лет не было предложено каких-либо других недвоичных кодов с простым декодированием и хорошей корректирующей способностью. В реальности до сих пор можно использовать лишь весьма короткие коды РС, из-за чего они неэффективны и работают лишь при весьма малом входном уровне шума. Но сложность их декодеров тоже весьма значительна: ~n^2. Лучшим примером практического применения алгебраических кодов сейчас, наверное, является каскадная схема АВ с кодом РС. Но ее достоинства определяются главным образом используемым сверточным кодом и декодером АВ.

Что касается алгебраической теории, то двоичные коды этого класса не смогли работать в гауссовских каналах столь же легко, как АВ, и не исправляли ошибок за пределами половины минимального кодового расстояния d. Более того, не нашлось даже способов их обработки (декодирования), сложность которых росла бы с увеличением длины кодов лишь линейно, т.е. имела бы порядок $N{\sim}n$. Причем все алгебраические коды работали только в области вероятностей ошибок канала, которые были весьма малы относительно значений, допускаемых теорией. Это дает нам основания заявлять о конце прикладной алгебраической теории кодирования.

ПРЕОДОЛЕНИЕ ПЕРВОГО КРИЗИСА

Высокие характеристики достоверности АВ в двоичных каналах быстро вывели технику декодирования на уровень, вполне достаточный для развития различных цифровых систем в течение нескольких десятилетий. Но он оказался крайне сложным из-за того, что должен помнить все возможные решения, число которых растет с увеличением длины кода экспоненциально. Напомним, что АВ как оптимальный декодер (ОД) минимизирует вероятность ошибки своих решений, сравнивая расстояния между принятым сообщением до всех потенциальных решений и выбирая затем самое близкое из них. Это требует большого объема памяти.

Первая успешная попытка преодоления длительного масштабного кризиса в теории кодирования заключалась в том, чтобы ориентироваться на эффективность АВ, но не хранить все решения в декодере, а сначала выбрать определенным образом некоторую исходную гипотезу-решение для нового алгоритма. Затем было предложено последовательно находить только более близкие к принятому вектору решения, которые, возможно, иногда будут приводить к решениям ОД. Отметим, что после публикации полвека назад этой привлекательной идеи, позволяющей уменьшить сложность таких декодеров сразу до линейной, пропорциональной $N{\sim}n$, т.е. до минимально возможной, ее реализовала только научная школа ОТ.

Эти новые алгоритмы для двоичных каналов были названы многопороговыми декодерами (МПД). Все варианты МПД для блоковых и сверточных кодов мало отличались друг от друга. Они еще 40 лет назад сразу показали лишь при линейной сложности высочайшую достоверность и фактически оптимальность своих решений при уровнях шума, совершенно недоступных для алгебраических методов. Затем были созданы методы поиска таких кодов, использование которых позволило довести достоверность решений МПД до уровня ОД даже при кодовых скоростях, очень близких к границе Шеннона.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ НЕДВОИЧНЫХ И ДРУГИХ КОДОВ

После открытия и патентования двоичных МПД для осознания проблемы простого декодирования недвоичных кодов потребовалось еще восемь лет, прежде чем специальные коды, названные символьными, представители научной школы ОТ научились оптимально декодировать с минимально возможной, т.е. с линейной от длины кодов, сложностью. Результаты оказались столь необычными, что, как и для двоичных кодов, для ОТ было признано полезным оформить ряд патентов на символьные декодеры [7]. Длины кодов n и размер алфавита q для символьных кодов, в отличие от кодов РС, абсолютно независимы, что тоже весьма удобно для многих технических приложений. Совпадение решений символьных декодеров с результатами для оптимальных декодеров даже при большом уровне шума, а также линейная сложность символьных МПД утвердили лидерство этих новых алгоритмов среди недвоичных методов. И более 30 лет у них конкурентов нет.

Еще один, крайне проблемный, аспект теории кодирования заключается в том, что для недвоичных кодов создать АВ вообще невозможно. Даже для простейшего однобайтового, очень короткого и поэтому малоэффективного кода с длиной кодера $K = 5$, у которого размер алфавита $q = 256$, сложность недвоичного АВ будет порядка $N{\sim}q^K = 10^{12}$, что, конечно, реализовать нельзя. Таким образом, исключительная важность полного решения проблемы оптимального декодирования недвоичных кодов на основе символьных МПД, к тому же с линейной сложностью, становится, по мнению авторов статьи, абсолютно очевидна.

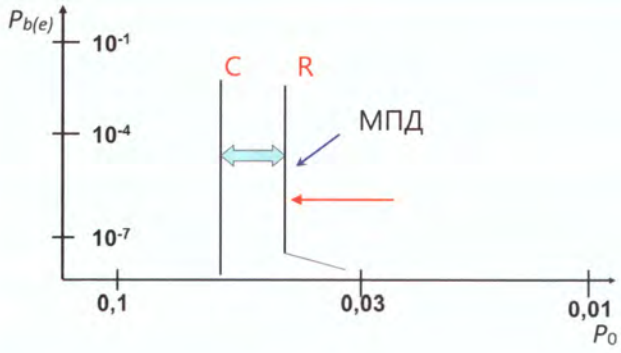
Отметим, что результаты ОТ давно опубликованы, в том числе и на английском языке, однако до сих пор нет информации о том, чтобы кто-то хотя бы повторил их. Пока еще полная недоступность достижения результатов ОТ для других групп исследователей (рис. 1) объясняется тем, что для изучения МПД и других алгоритмов использовалось высокоинтеллектуальное программное обеспечение (ПО) системного стиля и высочайшего уровня, что характерно для школы ОТ. Кроме того, школой ОТ запатентован простейший декодер для стирающих каналов с минимальной сложностью, восстанавливающий стертые символы непосредственно вблизи пропускной способности канала [1, 7].

Следует заметить, что методы ОТ, в отличие от турбо- и низкоплотностных (Low Density Parity Check, LDPC) кодов, не используют вычислений с действительными числами. Это еще более оттеняет технологичность и эффективность алгоритмов МПД, что особенно важно при аппаратной реализации декодеров. Но работа только с фиксированной точкой, т.е. с небольшими целыми числами, заметно ускоряет и работу алгоритмов, реализованных программно.

Наконец, еще одно значимое достижение ОТ – создание и патентование особой версии АВ для блоковых кодов (БАВ) с такой же сложностью N, как и у самого знаменитого в мире классического сверточного АВ, т.е. с $N{\sim}2^K$, где K – длина кодирующего регистра, тогда как до последнего времени представители теоретической шко-

Рисунок 1
Лидерство школы ОТ

Рисунок 2
Стремление к границе Шеннона



лы предлагали БАВ с $N{\sim}2^{2K}$ [9]. Для сравнения можно указать, что, как известно [7], для одного из проектов NASA использовался АВ с K=15. Наш БАВ был бы для этого кода в ~16000 раз проще, чем предлагаемый в [9] аналогичный ОД для обучения студентов.

ГЛАВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОТ

Краеугольным камнем школы ОТ является Основная Теорема многопорогового декодирования (ОТМПД) – простейшая по форме, но наполненная глубоким системно-философским смыслом [1–3, 7]. Согласно этой теореме, при линейной сложности алгоритма декодирования решения МПД стремятся к решениям ОД. При этом в ОТ сразу указывается, что МПД – это не ОД, и после некоторого процесса улучшения своих решений алгоритм может остановиться раньше, чем достигнет оптимального решения. Школа ОТ в течение десятилетий создала много методов, позволяющих строить коды, при использовании которых МПД разных типов, даже при большом уровне шума для всех основных классических моделей каналов связи, достигают именно решений ОД. Общее количество таких кодовых кластеров (типичных сочетаний параметров кодов и каналов) к настоящему времени приблизилось к 100. Их число постоянно растет.

Все основные результаты ОТ базируются на решении оптимизационных задач различных типов. Отметим, что граница Шеннона принципиально недостижима, поскольку является, как и скорость света для материальных тел, абсолютно упругой. А это приводит к тому, что между пропускной способностью каналов и рабочей областью МПД всегда есть некоторый промежуток, который, как показывает опыт, усилиями участников школы ОТ постоянно сокращается. Ситуация с улучшением характеристик МПД (рис. 2) свидетельствует о стремлении рабочих характеристик МПД к границе Шеннона, определяющей в данном случае предельный уровень шума, при котором теоретически еще возможна сколько угодно надежная передача данных при заданных параметрах кодера и канала. Эта работа будет продолжена.

Изложенные свойства МПД подтверждаются результатами [1, 6, 7].

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТ

Развитие прикладных методов кодирования позволило решить проблему Шеннона и перевести задачу из чисто научной в технологии на базе теорий глобального поиска. Оно определяется главной теоремой ОТМПД, доказанной в ОТ для всех классических каналов, которые рассматривались ранее в теории кодирования, а также уже достаточно совершенной теорией размножения ошибок в мажоритарных декодерах. ОТ создала мощные технологии построения таких мажоритарных кодов, которые позволили алгоритмам МПД успешно работать вблизи границы Шеннона.

Но для получения действительно высокой достоверности решений при теоретически минимально возможной сложности МПД и непосредственной близости кодовой скорости R к пропускной способности цифрового канала C, т.е. при $R \lesssim C$, в ОТ созданы и успешно использованы десятки способов, которые были запатентованы, а также реализованы в аппаратном виде или программно [7]. Они образовали совокупность множества простых методик, обеспечивших реальное решение проблемы Шеннона. Перечислим эти способы:

- дивергентное кодирование, позволяющее некаскадными методами последовательно увеличивать кодовое расстояние применяемых кодов;
- выделение группы декодеров с прямым контролем метрики (ДПКМ), тоже значительно продвинувших характеристики лучших алгоритмов в сторону еще большего уровня шума;
- параллельное каскадирование, первооткрывателем которого является школа ОТ [10];
- новые подходы к традиционным схемам последовательного каскадирования, поскольку характеристики МПД с оптимальным декодированием принципиально меняют вклад в общую эффективность от обоих кодов, входящих в систему каскадирования [1, 5–7].

Существует множество оптимизационных программных платформ на сетевых порталах ОТ [1], формирующих облик различных МПД и создающих пространство настраиваемых параметров, которые оптимизируют эксперименты по декодированию и ускоряют их проведение в десятки раз. Именно формирование принципиально нового интеллектуального пространства ОТ на основе специализированного ПО системного уровня создало условия для развития ОТ и алгоритмов, которые заметно отличаются от других методов. Следует подчеркнуть, что разработка этого ПО велась в точном соответствии с рекомендациями, которые формулировала и развивала ОТ.

СООТНОШЕНИЕ РЕАЛЬНОГО И ИДЕАЛЬНОГО В НАУКЕ

Проблема соотношения возможностей теории и эксперимента обострилась в 1980-е годы в связи с бурным развитием вычислительной техники. Публикации на эту тему были представлены и на портале РАН. Приведем одну лишь цитату: «....противостояние компьютерного моделирования и теории, основанной на математических методах, – болезнь века» [11]. Такой диагноз можно поставить и классической теории кодирования.

Теоретики 1960-х годов вполне обходились простыми формулами, например, биномиального распределения, которые характеризовали достоверность довольно малоэффективных алгебраических алгоритмов декодирования. Но характеристики АВ и других методов, в том числе МПД, уже нельзя было посчитать точно. Ими занялись другие специалисты, активно использующие компьютерное моделирование. Теоретики же остались «внутри» алгебраической теории, где можно было многое «просчитать в уме» или аналитически. Когда появились программы моделирования для студентов, которые позволяли проводить самые простые эксперименты в области теории кодирования, ощущения необходимости широкого использования полномасштабного моделирования на компьютерах всех алгоритмов декодирования у них не возникало. Они вполне обходились «ансамблями кодов», для которых выполняли весьма мудреные оценки. В результате процесс остановился, новые достоверные проверяемые алгоритмы перестали появляться.

Но именно осознание приверженцами оптимизационной теории кодирования еще в 1975 г. единства теории и эксперимента позволило этой научной школе создать ряд специализированных программных систем для исследований прикладных проблем теории кодирования. Они применялись для моделирования различных цифровых систем с развитыми методами обработки и настройки параметров кодов и декодеров. Такой подход создал мощный синергетический эффект ускорения исследований. Теория без эксперимента слаба, а оторванный от теории эксперимент почти бесполезен и нередко ошибочен. Как показано в [11], у теоретиков весьма велика доля ошибок. В школе ОТ используется много способов управления экспериментами на основе порой даже несколько экзотической, но одновременно и очень логичной теории. Подобная взаимопроверка продуктивна и полезна как для моделирования, так и для теории.

Таким образом, внимание школы ОТ к технологиям программирования на правильно выбранном для этих целей языке C++ и высокий уровень компетенций ее участников как программистов – все это позволило создать оригинальные программные системы проектирования кодеков.

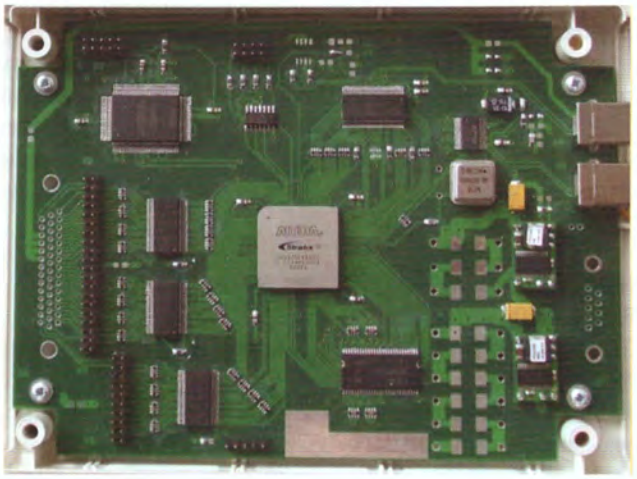
ТЕКУЩИЙ УРОВЕНЬ РАЗВИТИЯ ДРУГИХ НАПРАВЛЕНИЙ ТЕОРИИ КОДИРОВАНИЯ

Следует отметить, что большой группе представителей теоретической школы, не использующих моделирование и не владеющих современными методами программирования, трудно создавать полноценные модели декодеров и точно оценивать их достоверность, помехоустойчивость и сложность. Работа в «чистой» теории кодирования, по мнению авторов данной статьи, за последние десятилетия не дала ни одного конкретного декодера. Жаль, что лозунг «Программирование – это вторая грамотность» уже очень давно не актуален. Алгоритмы для сотен «ансамблей кодов», успешно защищенных в качестве докторских диссертаций еще в 1990-е гг., являются фикцией, так как декодеры можно создавать только для конкретных кодов.

Сегодня во многих докторских диссертациях, защищаемых в научных советах Москвы и С.-Петербурга, делаются заявления о весомых результатах для совершенно неэффективных, с нашей точки зрения, и весьма непростых (сложность $N{\sim}n^2$) декодеров, тогда как еще в 1981 г. были опубликованы данные о МПД-алгоритмах со сложностью $N{\sim}n$ и с характеристиками ОД [12, 13], 15 лет назад приведенные уже и в соответствующем справочнике по кодированию [6]. В целом ряде докторских диссертаций главным достижением за последние 30 лет было объявлено снижение в 3–10 раз (по сравнению с полным перебором) экспоненты сложности декодирования неких кодов. Но это практически всегда соответствует, даже для не очень длинных кодов, например с $n{\sim}10^4$, сложности декодера N, превышающей число атомов во Вселенной [9]. Удивительно, но упоминавшийся выше БАВ с удвоенной экспонентой сложности [9] тоже до сих пор предлагается в пособиях для обучения студентов.

Полярные коды (см. рис. 1), мы убеждены, тоже не помогли классической теории кодирования выйти из кризиса [14]. За десятилетие не было предъявлено ни одного полного комплекта реальных характеристик таких декодеров. Например, в докторской диссертации по этой тематике [15] большинство упомянутых алгоритмов имеют сложность $N{\sim}n^2$, а в кандидатской работе [16] для этих кодов обсуждаются декодеры со сложностью более $N{\sim}n^3$. В названных диссертационных работах от-

Рисунок 3
Многопороговый декодер для флеш-памяти, космических и оптических каналов, повышающий их КПД в 3–10 раз



сутствуют полноценные сведения хотя бы об одном из рассмотренных там алгоритмов. Соискатели не продемонстрировали знание ОТ и практически оптимальных МПД с линейной сложностью, а также не проводили какие-либо сравнения с алгоритмами ОТ, что мы считаем недопустимым для нормального развития науки.

Наконец, отметим, что студентов во всех вузах РФ, включая самые престижные, через 30 лет после публикации полной теории ОТ и, повторим, издания общедоступного справочника [6] обучают в основном по алгебраическим книжкам и программам курсов, в которых иногда нет даже алгоритма Витерби. Это тоже необходимо срочно исправить.

ОБЩАЯ СИТУАЦИЯ В ТЕОРИИ КОДИРОВАНИЯ

К настоящему времени в прикладной ОТ рассмотрены все основные методы кодирования, пригодные для самого широкого использования. Они работают в непосредственной близости от границы Шеннона при линейной сложности алгоритмов МПД, достигающих решений оптимальных декодеров. Теоретически МПД демонстрируют максимально возможные скорости аппаратного декодирования, как, например, разработанный в ИКИ РАН на базе ПЛИС ALTERA МПД-декодер для сверточного кода (рис. 3) – скорость более 1 Гбит/с [2, 3, 7]. Программные версии МПД работают на скоростях от десятков килобит в секунду до мегабит в секунду [1, 7]. Понятно, что задержки решений алгоритмов, которые действительно работают непосредственно вблизи границы Шеннона, весьма велики, как и должно быть при использовании длинных кодов.

Кроме того, на основе ОТ построены быстрые декодеры для оптических линий, не имеющие аналогов [1]. Разработаны также несколько очень простых алгоритмов декодирования с характеристиками ОД для флеш-памяти, что потребовало повысить достоверность результатов декодирования на несколько порядков [1, 3, 7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографиях [2, 3, 7] и на ресурсах [1] в различных форматах широко представлена оптимизационная теория, которая, в чем авторы абсолютно убеждены, полностью решила проблему Шеннона – задачу простого высокодостоверного декодирования вблизи пропускной способности цифровых каналов. Других алгоритмов декодирования с подтвержденными признанными характеристиками, сопоставимых с полученными методами ОТ, по всей совокупности параметров достоверность–помехоустойчивость–сложность пока нет.

Материалы по ОТ, опубликованные на ресурсах [1] (рис. 4, таблица), пользуются вниманием специалистов всего мира. Например, в 2015 г. к ним обратилось более 100 тыс. читателей из 87 стран, что свидетельствует об авторитете российской научной школы ОТ.

Рисунок 4
Популярность порталов по методам кодирования www.mtdbest.iki.rssi.ru и www.mtdbest.ru

Статистика посещаемости ресурсов www.mtdbest.iki.rssi.ru и www.mtdbest.ru

Место	Страна	Число посетителей	Доля, %
1	United States	13988	45,79
2	Not determined	10280	33,65
3	Germany	2178	7,13
4	Russian Federation	1607	5,26
5	Ukraine	859	2,81
6	China	619	2,03
7	United Kingdom	228	0,75
8	Kazakhstan	103	0,34
9	Belarus	80	0,26
10	Italy	52	0,17

Дальнейший прогресс ОТ будет связан с различными системами многопозиционных сигналов [2, 4, 7], а также с более сложноорганизованными системами и сетями связи. Научная школа ОТ готова всесторонне поддержать перспективные разработки других организаций и инициативных специалистов, которые будут развивать простые, высокоэффективные алгоритмы декодирования различных классов и решать другие важные прикладные задачи в смежных направлениях.

Издание монографий [2, 6, 7] осуществлялось при поддержке РФФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сетевые ресурсы ИКИ РАН и РГГТУ. – URL: www.mtdbest.iki.rssi.ru, www.mtdbest.ru.

2. Зубарев, Ю.Б. Многопороговые декодеры и оптимизационная теория кодирования / Ю.Б. Зубарев, В.В. Золотарев, Г.В. Овечкин; под ред. В.К. Левина. – М.: Горячая линия–Телеком, 2012. – 238 с.

3. Zolotarev V. Optimization Coding Theory and Multithreshold Algorithms / V. Zolotarev, Y. Zubarev, G. Ovechkin. – Geneva, ITU, 2015. – 159 p.; e-book reference: http://www.itu.int/pub/S-GEN-OCTMA-2015.

4. Зубарев, Ю.Б. Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных / Ю.Б. Зубарев, Г.В. Овечкин // Электросвязь. – 2008. – № 12. – С. 58-61.

5. Золотарев, В.В. Применение многопороговых методов декодирования помехоустойчивых кодов в высокоскоростных системах передачи данных / В.В. Золотарев, Г.В. Овечкин // Электросвязь. – 2014. – № 12. – С. 10-14.

6. Золотарев, В.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы / В.В. Золотарев, Г.В. Овечкин: справочник; под ред. Ю.Б. Зубарева. – М.: Горячая линия–Телеком, 2004. – 126 с.

7. Золотарев, В.В. Теория кодирования как задача поиска глобального экстремума; под ред. Н.А. Кузнецова // М.: Горячая линия–Телеком, 2018. – 220 с.

8. Shannon, C. A Mathematical Theory of Communication / C. Shannon // Bell System Technical Journal; vol. 27 (July and October, 1948). – P. 379-423, 623-656; Шеннон, К.Э. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Иностранная литература, 1963.

9. Кудряшов, Б.Д. Основы теории кодирования / Б.Д. Кудряшов // СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2016. – 393 с.

10. Золотарев, В.В. Параллельное кодирование в каналах СПД // Вопросы кибернетики (ВК-120). – М., 1986. – С. 33-37.

11. Магаршак, Ю. Число, возведенное в абсолют / Ю. Магаршак // Независимая газета, 09.09.2009. – URL: http://www.ng.ru/science/2009-09-09/11_maths.html.

12. Самойленко, С.И. Вычислительные сети / С.И. Самойленко, А.А. Давыдов, В.В. Золотарев и др. // М.: Наука, 1981. – 278 с.

13. Золотарев, В.В. Эффективные многопороговые алгоритмы декодирования / В.В. Золотарев: препринт. – М., 1981. – 76 с.

14. Золотарев, В.В. О сопоставлении новых методов помехоустойчивого кодирования / В.В. Золотарев, Г.В. Овечкин // Докл. 18-й Междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение»; т. 1. – М., 2016. – С. 59-64.

15. Трифонов, П.В. Методы построения и декодирования многочленных кодов: дис. ... докт. техн. наук: 03.23.18 / Трифонов Петр Владимирович. – СПб., 2018.

16. Милославская, В.Д. Методы построения и декодирования полярных кодов: дис. ... канд. тех. наук: 03.02.15 / Милославская Вера Дмитриевна. – СПб., 2015.

Получено 25.03.19

РАСШИРЕНИЕ ИТ-СОТРУДНИЧЕСТВА СТРАН БРИКС

По предложению России перечень сфер, в которых страны БРИКС будут развивать совместные инициативы, дополнен четырьмя новыми направлениями. Они были зафиксированы в Декларации пятой встречи министров связи стран БРИКС. Российскую Федерацию на саммите представлял замглавы Минкомсвязи Михаил Мамонов. Он назвал перспективными для стран БРИКС такие сферы сотрудничества, как национальные системы цифровой идентификации, большие данные для государственной политики, национальные системы управления данными и «умные» города.

Новые направления сотрудничества характеризуются тем, что в программу «Цифровая экономика Российской Федерации» заложена разработка важных для человека документов, какими являются удостоверение личности гражданина (электронный паспорт), единая биометрическая система, облачная квалифицированная электронная подпись, цифровой профиль. Аналогичные проекты ведутся и в других странах БРИКС. Например, в Индии в 2019 году объявлено о скором внедрении электронных паспортов. В Китае, где они выдаются с 2012 года, планируется еще и внедрение цифровой версии идентификационной карты гражданина. В Бразилии полноценный запуск цифровой идентификации запланирован на 2020 год. Что касается работы с большими данными, то все страны БРИКС накопили значительный опыт в этом направлении. Так, в Бразилии и Китае они используются для администрирования налогов и совершенствования налоговой политики. В Индии банковские данные применяются для выявления фиктивных сделок и нелегальных доходов, а сведения геолокации – для поиска фирм-однодневок. Особый интерес представляют национальные системы управления данными (НСУД). В России это предусмотрено программой цифровой экономики. НСУД нацелены на то, чтобы повысить качество данных, упростить гражданину сбор документов для получения госуслуг и снизить административную нагрузку на бизнес. В отдельных странах БРИКС, скажем, в Индии и Китае, также накоплен опыт формирования и внедрения подобных систем.

Одной из глобальных задач является внедрение цифровых технологий в городское пространство. По прогнозам, в 2019 году объем мирового рынка решений для «умных» городов достигнет $1 трлн, а по итогам 2026-го – $3,5 трлн. Развивают это направление и страны БРИКС. В EasyPark Smart Cities Index 2019 Шанхай занимает 75-ю строчку, Москва – на 78-й, Нью-Дели – на 83-й, Кейптаун – на 86-й, Сан-Паулу – на 94-й.

Среди вероятных сфер развития «умных» городов можно выделить каршеринг, общественные сети Wi-Fi, сети 4G и 5G, использование возобновляемых источников энергии, внедрение инноваций в услуги общественного транспорта и т.д.

В 2020 году в роли председателя в БРИКС выступит Россия. Шестая встреча министров связи стран объединения, как и первая встреча в 2015-м, пройдет в Москве.