

# О РЕАЛИЗАЦИИ НОВОГО УРОВНЯ ПРИКЛАДНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ТЕОРИИ КОДИРОВАНИЯ

Золотарёв В.В.,

Институт космических исследований РАН

Овечкин Г.В.

Рязанский государственный радиотехнический университет



# ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЕ КОДИРОВАНИЕ

Помехоустойчивое кодирование используется для исправления ошибок передачи данных.

**Применение кодирования позволяет:**

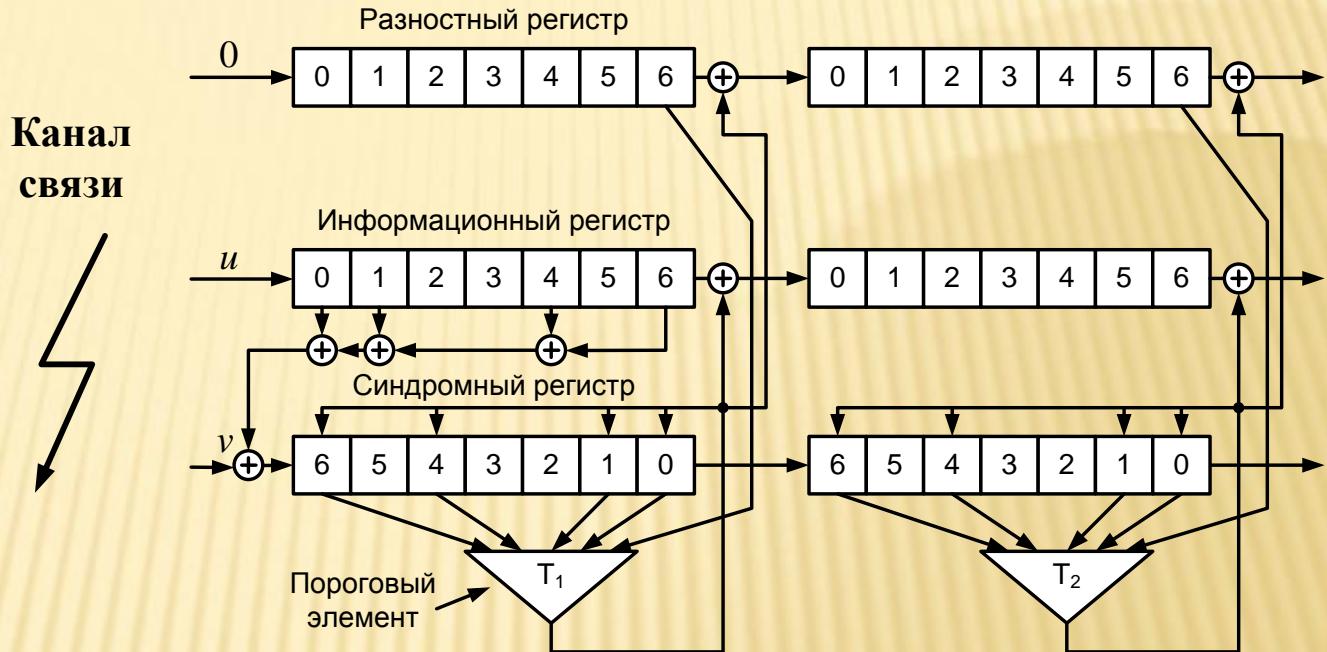
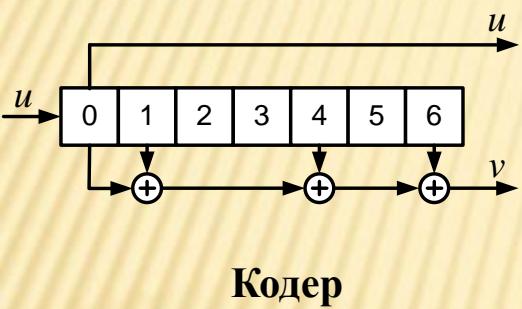
- снижать мощность передатчика;
- повышать скорость передачи данных;
- уменьшать размеры антенн;
- повышать дальность связи;
- экономить полосу частот;
- увеличить плотность записи;
- повысить надежность хранения данных;
- повысить к.п.д. используемых каналов.

**Клод Шеннон.** Если  $R < C$ , то возможна передача информации со сколь угодно высокой достоверностью.

**Основная проблема:** декодирование помехоустойчивых кодов с близкой к предельной эффективностью при минимально возможной сложности реализации.

**Решение:** оптимизационная теория кодирования (ОТ) и многопороговые декодеры (МПД) самоортогональных кодов (СОК)

# СХЕМА КОДЕРА И МНОГОПОРОГОВОГО ДЕКОДЕРА СВЕРТОЧНОГО КОДА С $R=1/2$



Многопороговый декодер (МПД) с двумя итерациями

Основа оптимизационной теории!

Многопороговый декодер является модификацией обычного порогового декодера Месси.

МПД применяется для декодирования блоковых и сверточных двоичных и недвоичных самоортогональных кодов .

При каждом изменении декодируемых символов решение МПД приближается к оптимальному.

Сложность МПД – линейная!

Доказана основная теорема многопорогового декодирования.

# НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

## Многопороговые декодеры для:

- блоковых и сверточных кодов;
- двоичных кодов и каналов связи;
- символьных кодов и каналов связи;
- двоичных и символьных кодов и каналов со стираниями;
- каналов с группирующими независимыми ошибками.

## Применение МПД:

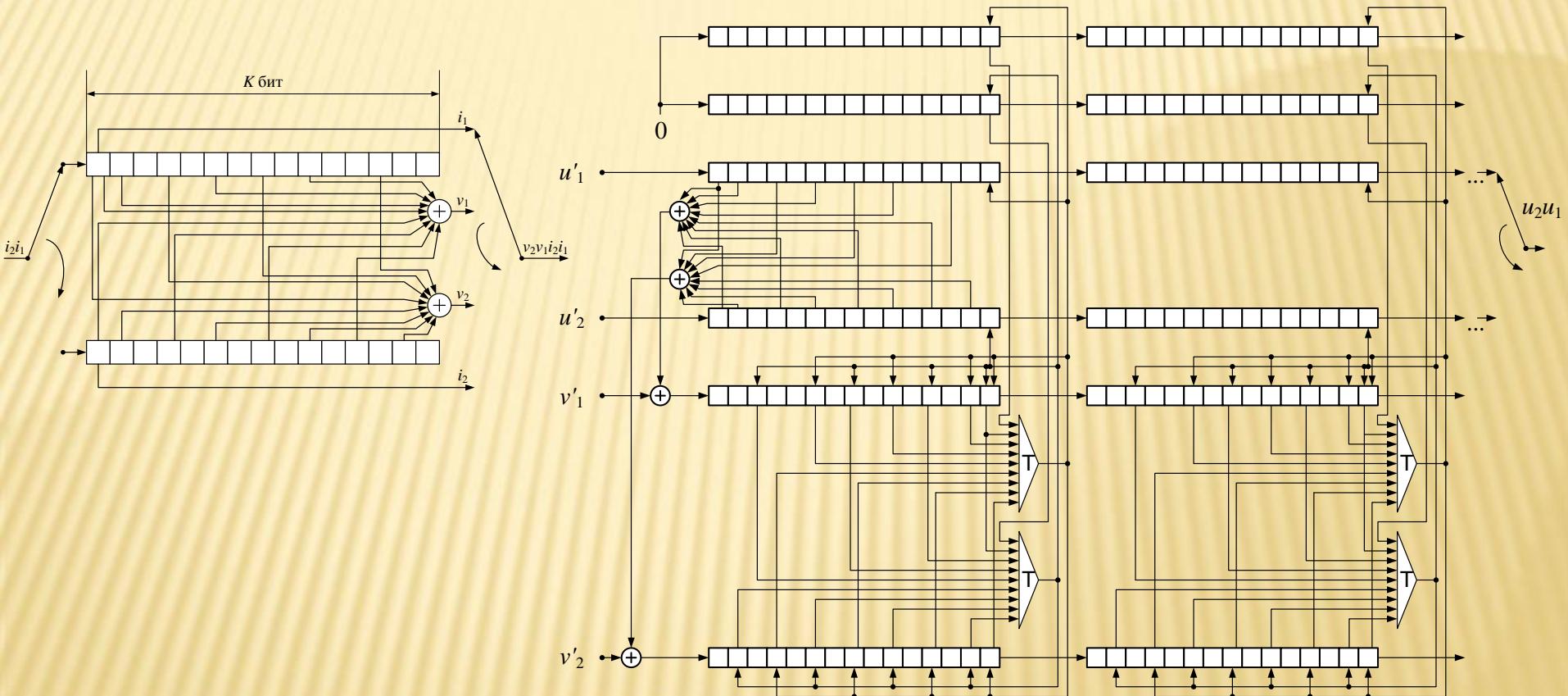
- системы дистанционного зондирования Земли
- системы хранения данных;
- оптические линии связи;
- флеш-память;
- ...

## Повышение эффективности МПД:

- выбор кодов с наименьшим уровнем размножения ошибок;
- оптимизация параметров МПД;
- использование каскадных схем коррекции ошибок;
- повышение эффективности работы отдельных узлов МПД;
- использование дивергентных схем кодирования.

# СХЕМА КОДЕРА СВЕРТОЧНОГО КОДА С $R=2/4$

Коды должны быть устойчивыми к размножению ошибок (РО).



Использование нескольких информационных и нескольких проверочных ветвей позволяет добиться существенного снижения уровня размножения ошибок при многопороговом декодировании.

# КОДЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ КАСКАДИРОВАНИЕМ

Вероятность неправильности проверки:

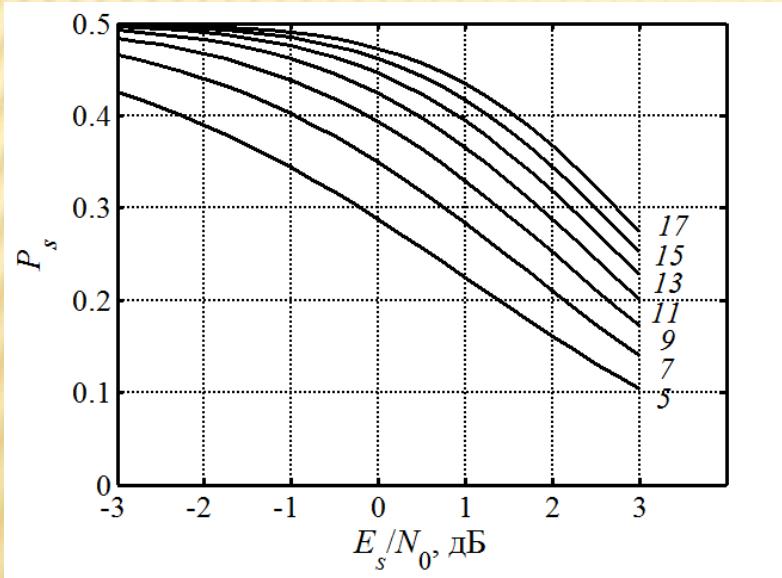
$$P_s = \sum_{i=1}^{\lfloor M/2 \rfloor} C_M^{2i-1} p_0^{2i-1} (1-p_0)^{M-2i+1}$$

$p_0$  – вероятность ошибки в ДСК;

$M = \frac{(d-1)n_k}{n_r} + 1$  – размерность проверки.

$n_k$  – число информационных ветвей;

$n_r$  – число проверочных ветвей.



В коде с параллельным каскадированием в СОК  $C_0$  с  $R_0$  и  $d_0$  выделяется составляющий СОК  $C_1$  с  $R_1 > R_0$  и  $d_1 < d_0$ .

Сначала декодируется  $C_1$ , после чего декодируется весь код  $C_0$ .

1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1

5
5
5
5
5

1	1	1	1	2
1	1	1	2	1
1	1	2	1	1
1	2	1	1	1
2	1	1	1	1

а)

2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2

10
10
10
10
10

б)

3	3	3	3	2
3	3	3	2	3
3	3	2	3	3
3	2	3	3	3
2	3	3	3	3

14
14
14
14
14

2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2

10
10
10
10
10

в)

3	1	1	1	1
3	1	1	1	1
3	1	1	1	1
3	1	1	1	1
2	10	10	10	10

7
7
7
7
42

2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
2	2	2	2	2
6	6	6	6	6

10
10
10
10
30

г)

3	2	2	1	1
3	2	2	1	1
3	2	1	1	1
3	2	1	1	1
2	6	8	10	10

9
9
8
8
36

ж)

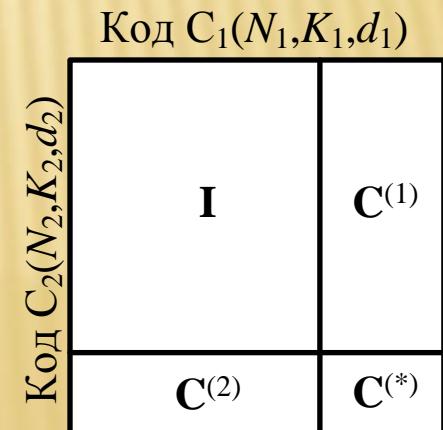
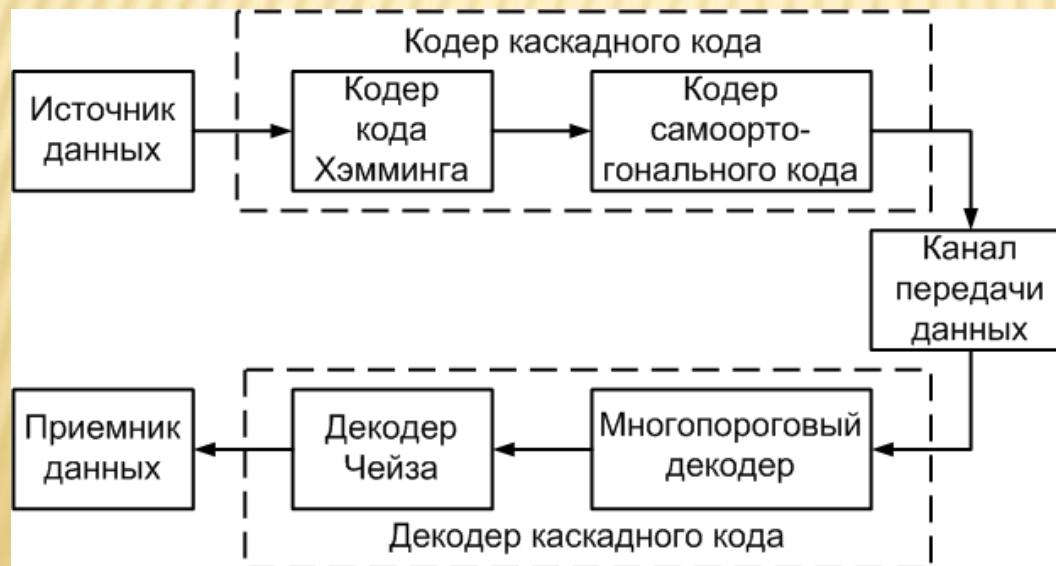
Среди кодов с кратными скоростями лучшими оказываются коды для схем с параллельным каскадированием с выделенными ветвями

# КАСКАДНЫЕ СХЕМЫ КОДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОПОРОГОВЫХ ДЕКОДЕРОВ

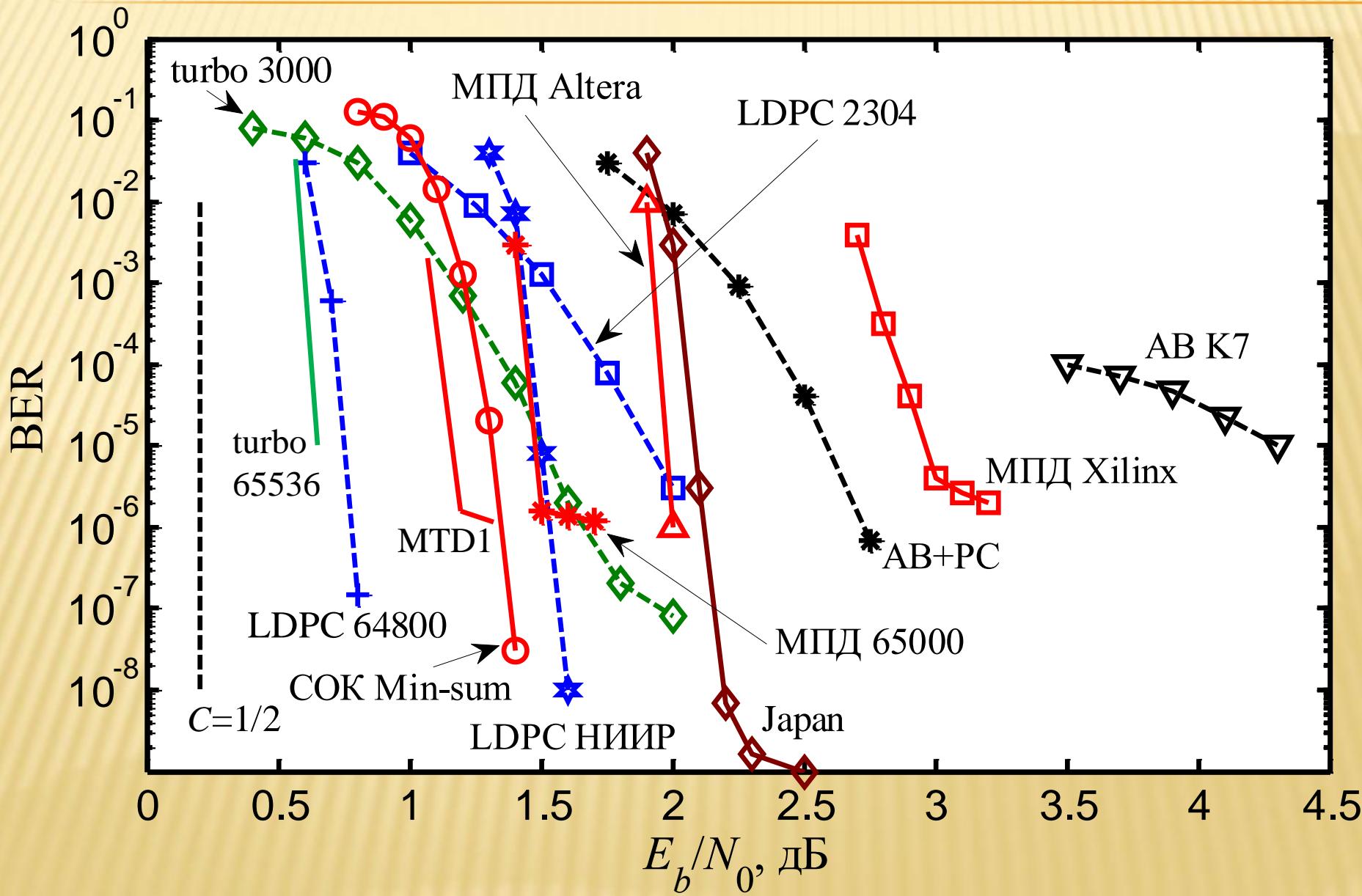
- каскадирование СОК с кодами контроля четности;
- каскадирование СОК с кодами Хэмминга;
- каскадирование СОК с коротким сверточным кодом, декодируемым алгоритмом Витерби;
- каскадирование СОК с СОК.

Для **всех** каскадных кодов получены **аналитические оценки эффективности**, подтвержденные результатами компьютерного моделирования.

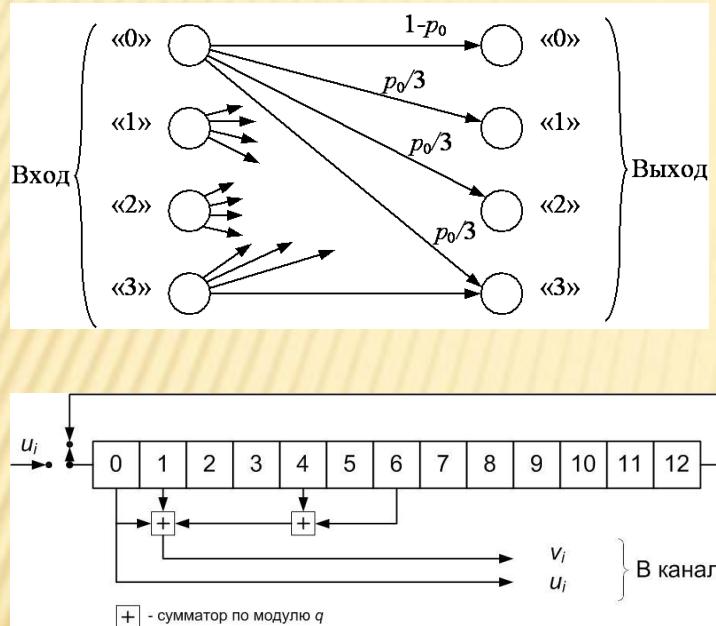
## Примеры использования каскадного кода



# ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДВОИЧНЫХ МЕТОДОВ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК С $R=1/2$ В ГАУССОВСКОМ КАНАЛЕ



# СИМВОЛЬНЫЕ МНОГОПОРОГОВЫЕ ДЕКОДЕРЫ



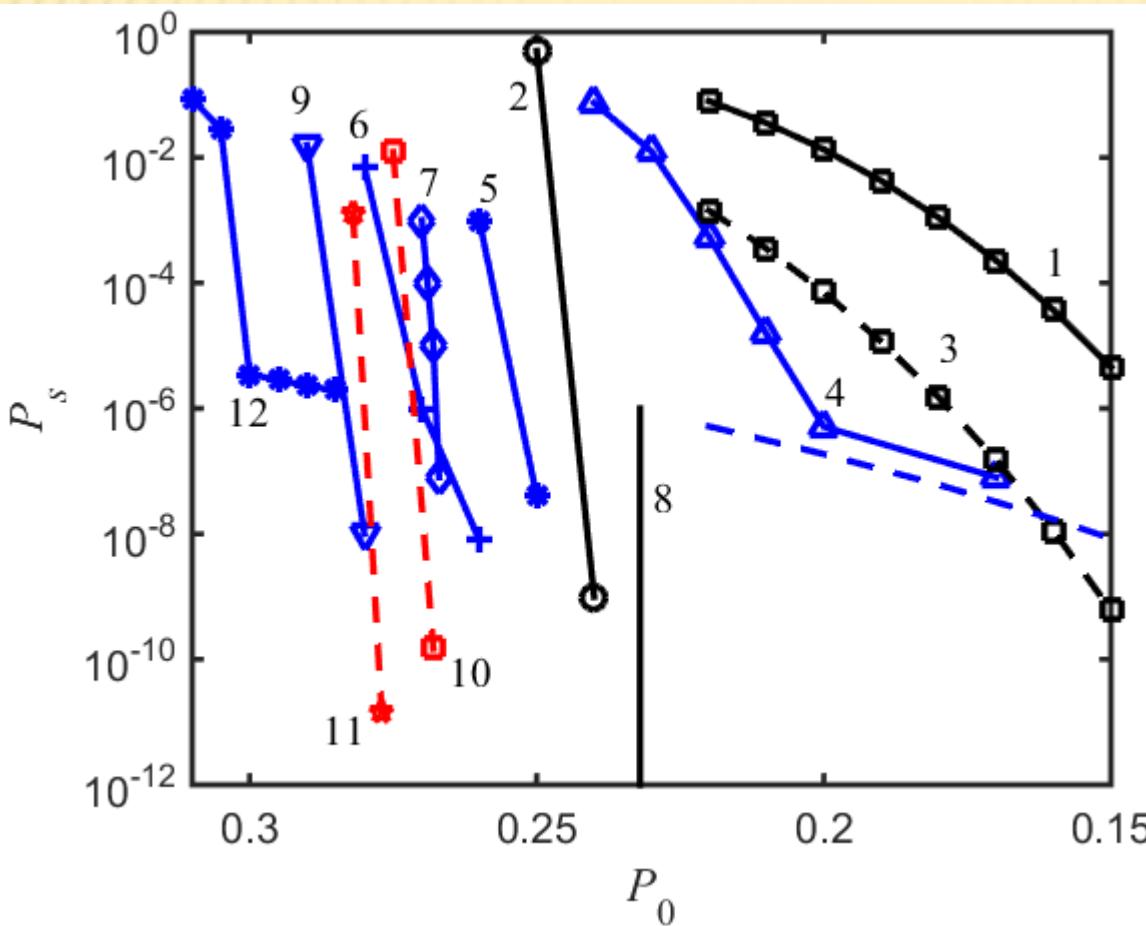
*q*МПД в 1000 и более раз уменьшают вероятность ошибки декодирования по сравнению с декодерами кодов Рида-Соломона и оказываются во много раз более простыми и быстрыми по сравнению с последними.

Сложность реализации *q*МПД линейно растет с длиной кода. Программные *q*МПД обеспечивают скорость декодирования в несколько десятков Мбит/с даже на обычном ПК. Они в десятки, сотни, а иногда и в тысячи раз быстрее других алгоритмов коррекции ошибок.

*q*МПД легко работают с символами любой размерности, например четырех, восьми и более байтовыми символами. Это существенно повышает и скорость, и эффективность восстановления информации.

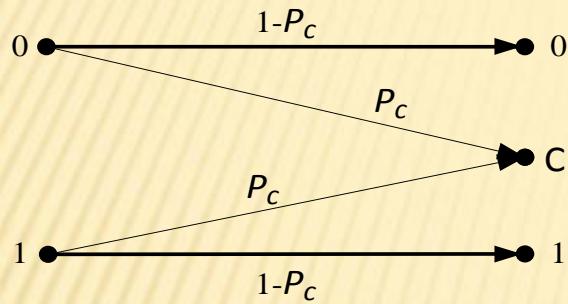
*q*МПД могут применяться, например, в сверхбольших цифровых специализированных аудио- и видео-базах данных с особо высокой достоверностью и целостностью хранения.

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ ДЕКОДИРОВАНИЯ НЕДВОИЧНЫХ КОДОВ ДЛЯ $R=1/2$ В QСК



- 1 – PC ( $R=1/2, n=255, q=256$ );  
2 – PC ( $R=1/2, n=64K, q=2^{16}$ );  
3 – PC ( $R=1/2, n=255, q=256$ ) - Судан;  
4 – qМПД ( $R=1/2, n=4K, q=256$ );  
5 – qМПД ( $R=1/2, n=32K, q=256$ );  
6 – qМПД ( $R=1/2, n=32K, q=2^{16}$ );  
7 – qМПД ( $R=1/2, n=100K, q=256$ );  
8 – qLDPC ( $R=1/2, n=100K, q=2^{32}$ );  
9 – qМПД ( $R=1/2, n=100K, q=2^{32}$ );  
10 – qМПД ( $R=1/2, n=32K, q=256$ ) + qХэмминг;  
11 – qМПД + qМПД;  
12 – qМПД ( $R=1/2, n=100K, q=2^{16}$ ) сверточный

# МНОГОПОРОГОВЫЕ ДЕКОДЕРЫ ДЛЯ КАНАЛОВ СО СТИРАНИЯМИ



$$P(Y=0|X=0) = P(Y=1|X=1) = 1 - P_c;$$

$$P(Y=0|X=C) = P(Y=1|X=C) = P_c,$$

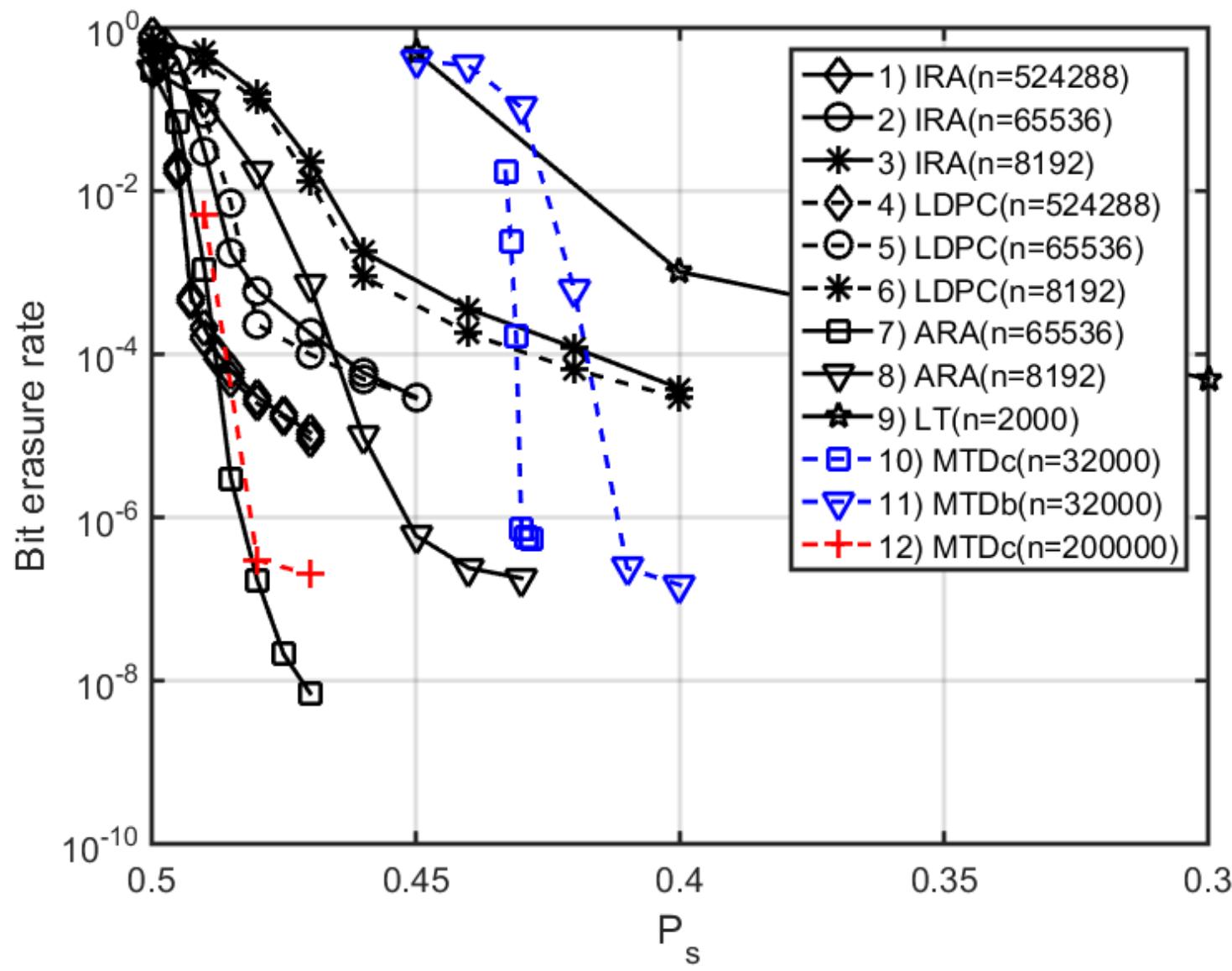
**Пропускная способность:**

$$C = 1 - P_c$$

**Работа МПД в канале со стираниями:**

- при вычислении символов синдрома стерты информационные и проверочные биты на значение проверок не влияют, но при этом для каждой проверки запоминается число участвующих в его формировании стираний;
- в процессе декодирования стертого информационного бита среди относящихся к нему проверок ищется проверка, содержащая только одно стирание;
- если такая проверка есть, то стирание в ней вызвано декодируемым информационным битом, который по значению данной проверки может быть восстановлен. При этом также необходимо провести коррекцию всех проверок для восстановленного информационного бита и уменьшить на единицу число стираний для этих же проверок;
- если же для стертого бита нет ни одной проверки, содержащей только одно стирание, то этот бит пропускается;
- переходят к декодированию следующего бита.

# ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДОВ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК В КАНАЛАХ СО СТИРАНИЯМИ



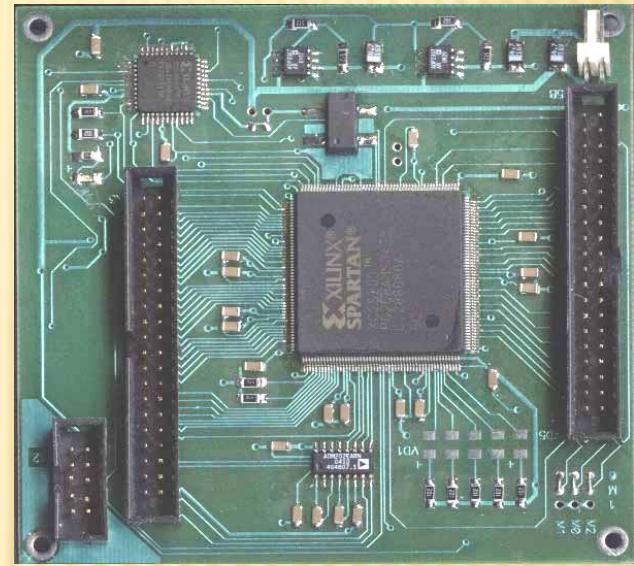
# АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МПД

---

1. МПД состоит почти полностью из элементов памяти или регистров сдвига. Это наиболее быстрые элементы и ПЛИС, и БИС. Доля остальных элементов МПД многое менее 1 % .
2. МПД оказывается абсолютно распараллеленным алгоритмом. Именно поэтому МПД для некоторых значений параметров примерно в 1000 более быстрые, чем другие, например, турбо декодеры. Задержка – как у простейшего 2-х входового ключа.
3. Реализация: Скорость - 320 Мб/с ÷ 2 и более Гб/с, ЭВК= 7 ÷ 9,5 дБ

# АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МПД НА ПЛИС

**Многопороговый декодер (МПД) для спутниковых и космических каналов. Он повышает КПД их использования в 3 - 10 раз, в том числе для ДЗЗ.**



**Макет МПД для каналов на 2,08 Гбит/с (ИКИ РАН)**

**МПД для космоса, оптических каналов и флеш-памяти**

# РЕАЛИЗАЦИЯ МПД НА GPU

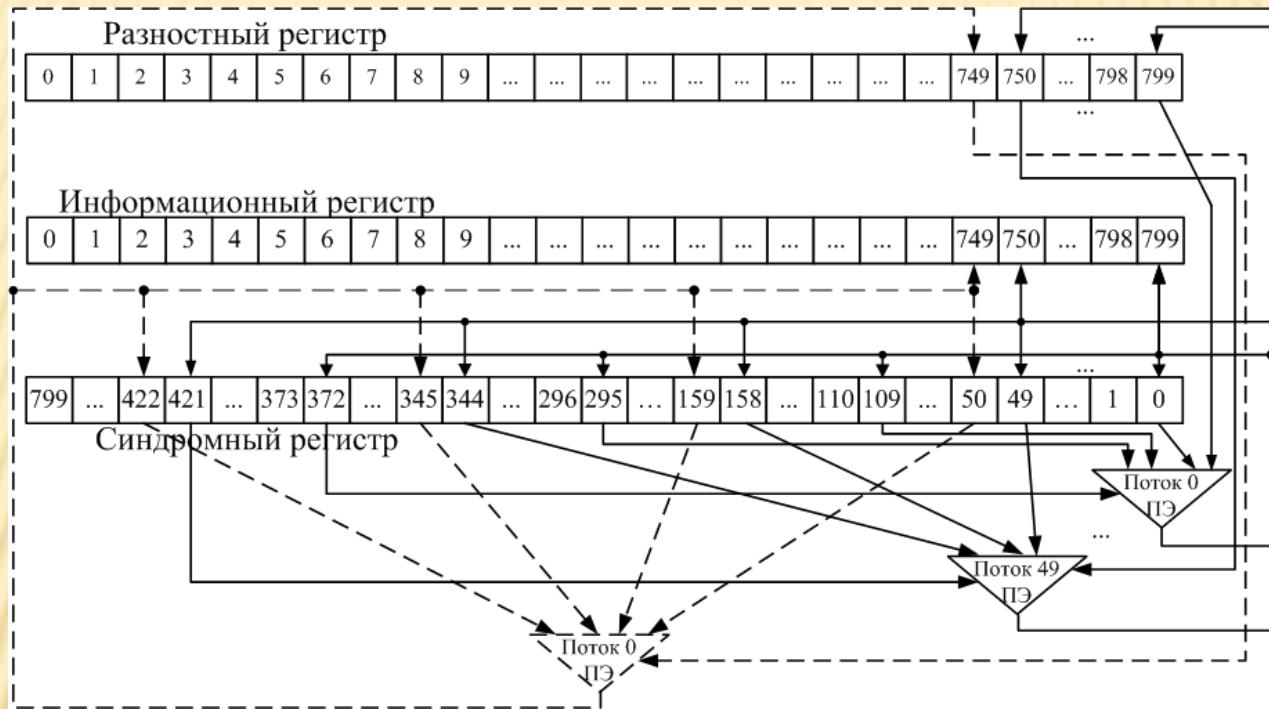
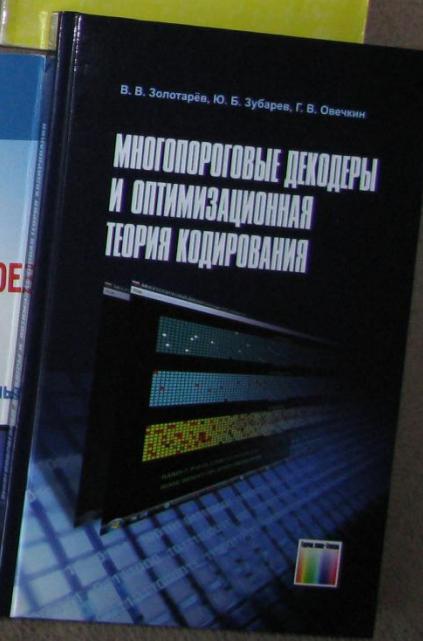
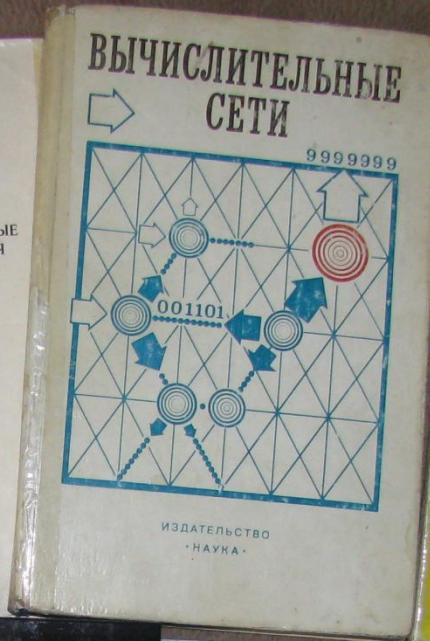
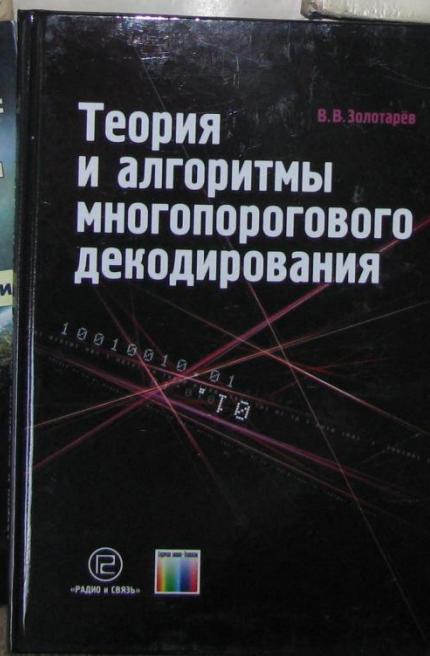
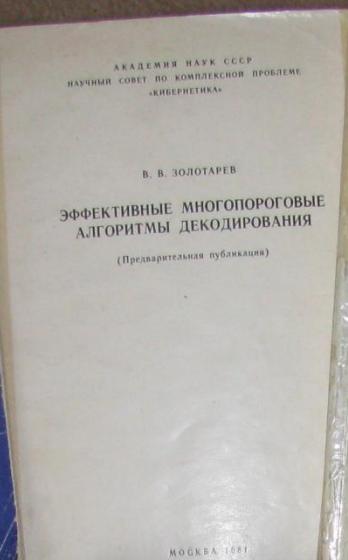
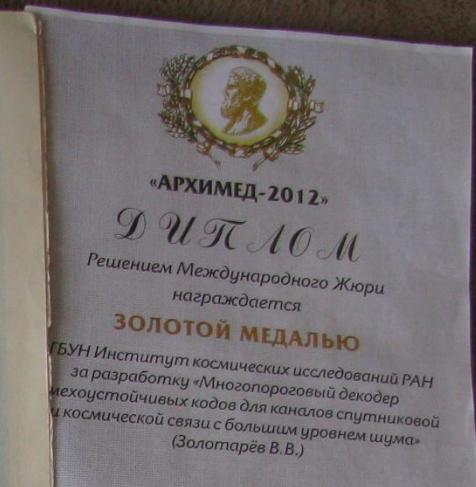


Table 2. Decoding speed of Multithreshold decoders on GTX 1080 graphics card.

Code parameters	Number of simultaneously decoded blocks	Decoding speed
$d=5, n=1600, \text{it}=10$	480	815 Mbit/s
$d=7, n=2200, \text{it}=10$	340	775 Mbit/s
$d=9, n=4000, \text{it}=10$	180	580 Mbit/s





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ  
ЗНАКАМ

FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL  
PROPERTY, PATENTS  
AND TRADEMARKS



Руководитель

Б.П. Симонов



XV Юбилейный международный Салон  
изобретений и инновационных технологий



«АРХИМЕД-2012»

ДИПЛОМ

Решением Международного Жюри  
награждается

ЗОЛОТОЙ МЕДАЛЬЮ

ФГБУН Институт космических исследований РАН  
за разработку «Многопороговый декодер  
помехоустойчивых кодов для каналов спутниковой  
и космической связи с большим уровнем шума»  
(Золотарёв В.В.)

Председатель  
Международного Жюри,  
Президент Евразийской  
патентной организации

А.Н. Григорьев

Президент Салона

Д.И. Зезюлин

Руководитель  
Федеральной службы  
по интеллектуальной  
свойственности

Б.П. Симонов

# **ЗАЩИЩЕННЫЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Золотарёв В.В. «Субоптимальные алгоритмы многопорогового декодирования».**  
**Докторская диссертация (1990, НИИ «КВАНТ»).**

Овчинин Г.В. «Алгоритмы и процедуры многопорогового декодирования в телекоммуникационных системах». Кандидатская диссертация (2003).

Гринченко Н.Н. «Организация помехоустойчивого кодирования в высокоскоростных телекоммуникационных системах». Кандидатская диссертация (2007).

Дмитриева Т.А. «Разработка и исследование алгоритмов помехоустойчивого кодирования на основе многопороговых декодеров для телекоммуникационных систем». Кандидатская диссертация (2008).

Овчинин П.В. «Разработка алгоритмов повышения эффективности недвоичных многопороговых декодеров в системах передачи и хранения больших объемов информации». Кандидатская диссертация (2009).

**Овчинин Г.В. «Теория каскадного декодирования линейных кодов для цифровых радиоканалов на основе многопороговых алгоритмов».** Докторская диссертация (2011).

Као В.Т. «Алгоритмы повышения эффективности многопороговых декодеров самоортогональных кодов для радиоканалов с высоким уровнем шума». Кандидатская диссертация (2015).

Шевляков Д.А. «Алгоритмы повышения достоверности передачи данных в многолучевых каналах на основе многопороговых декодеров». Кандидатская диссертация (2015).

Демидов Д.С. «Методы и алгоритмы исследования и повышения эффективности многопороговых декодеров помехоустойчивых кодов в высокодостоверных системах передачи информации». Кандидатская диссертация (2017).

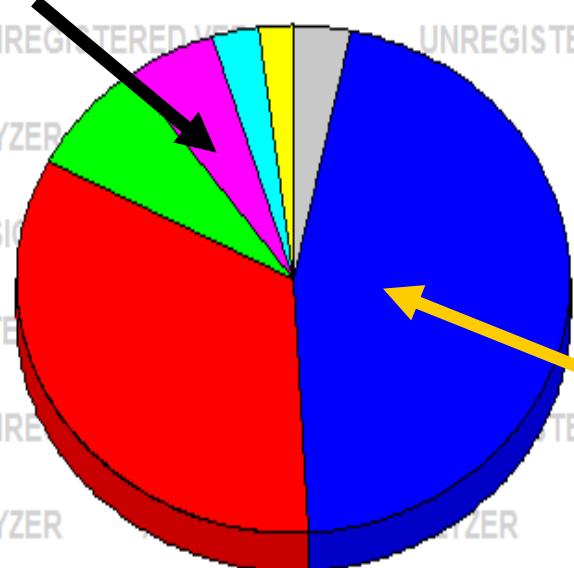
# Наши порталы по методам кодирования

[www.mtdbest.ru](http://www.mtdbest.ru)

[www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru)

Ежегодно их просматривают порядка  
100 тыс. читателей из 55 стран

**Россия**



**США**

Rank	Country	Visitors	Percentage
1	United States	13988	45.79%
2	Not determined	10280	33.65%
3	Germany	2178	07.13%
4	Russian Federation	1607	05.26%
5	Ukraine	859	02.81%
6	China	619	02.03%
7	United Kingdom	228	00.75%
8	Kazakhstan	103	00.34%
9	Belarus	80	00.26%
10	Italy	52	00.17%

- [О методе](#)
- [Обучение](#)
- [Дискуссии](#)
- [Наши книги](#)
- [Публикации](#)
- [Об авторах](#)
- [English version](#)

## Новый алгоритм многопорогового декодирования



[English version mtdbest.ru](#)

### О методе

Мы приветствуем вас на нашем сайте, посвящённом методу декодирования помехоустойчивых кодов, который называется многопороговое декодирование (МПД). Прототипом МПД является обычный пороговый (мажоритарный) декодер. Наш МПД алгоритм обеспечивает практически оптимальное декодирование длинных кодов при линейной сложности реализации с ростом длины кода даже при весьма высоком уровне шума канала. Код может быть как блоковым, так и сверточным. Ранее оптимальный декодер должен был быть фактически переборным, т.е. с экспоненциальным ростом сложности декодирования от длины кода.

В настоящее время МПД примерно в 100 раз проще по числу операций по сравнению с другими близкими ему по эффективности методами. Реальные его преимущества при аппаратной реализации еще больше.

На нашем сайте можно найти статьи и презентации, описывающие свойства и возможности МПД на русском и английском языках. Кроме того, можно переписать на свой компьютер и затем посмотреть маленький мультфильм. Он в очень наглядной форме демонстрирующий принципы работы МПД в канале с большим шумом. Он представлен в двух вариантах: для MS-DOS и WINDOWS. Не забудьте сначала внимательно прочесть [описание](#) работы с [демонстрационной программой](#), хотя она очень простая по управлению и абсолютно понятна для каждого специалиста, знакомого с теорией и методами помехоустойчивого кодирования. Вы можете закрыть программу в режиме MS-DOS в любой момент нажатием на клавишу "e" английского регистра.

Просмотрите [пример технического задания \(ТЗ\)](#) для системы кодирования.

### Новости:

- [Выпущена англоязычная книга про МПД...\*new!\*](#)
- [В разделе "Обучение" размещены три новых демопрограммы для МПД...\*new!\*](#)
- [Обращение к читателям нашего сайта...\*new!\*](#)
- [Глава про МПД из новой книги "Современная наука: актуальные проблемы и перспективы развития"](#)
- [Наши сайт расширяет свою научно-дискуссионную деятельность](#)
- [Новые вопросы о кодировании](#)

### Наши дипломы:

- [Диплом за разработку "Многопороговый декодер помехоустойчивых кодов"](#)
- [Диплом "Архимед-2012"](#)
- [Диплом за лучшее учебно-методическое издание](#)

### Монография:

- [В 2012 году вышла новая книга по МПД "Многопороговые декодеры и](#)

# Optimization Coding Theory and Multithreshold Algorithms

YOU ARE HERE [HOME](#) > [ITU PUBLICATIONS](#) > [GENERAL SECRETARIAT AND ITU TELECOM](#) > [GENERAL](#) > [OPTIMIZATION](#)  
[CODING THEORY AND MULTITHRESHOLD ALGORITHMS](#) > [2015](#)

Optimization Coding Theory and Multithreshold Algorithms  
2015



Optimization Coding Theory  
and Multithreshold Algorithms  
by Valeriy Zolotarev, Gennadiy Ovechkin, and Yuriy Zubarev  
Published on 15 January 2015

This new work by Professors Valeriy Zolotarev, Gennadiy Ovechkin and Yuriy Zubarev sets out the basic principles of modern error-correcting optimization coding theory, before moving on to consider multithreshold decoding (MTD) algorithms. With each symbol correction iteration, these iterative algorithms always find decisions of strictly increasing likelihood and can achieve optimum results that would normally require exhaustive search of all possible code words. It reviews the capabilities of symbolic codes discovered by the authors and the corresponding, simple-to-implement special symbolic MTD decoders, which are easier and more efficient than all other known methods of decoding non-binary codes. Concatenated parallel-type

## QUICK LINKS

- ▶ [Search publications](#)
- ▶ [New releases](#)
- ▶ [Featured](#)
- ▶ [Publication Notices](#)
- ▶ [Publication Catalogue](#)

## PUBLICATIONS BY SECTOR

**Исследования поддержаны**  
**Институтом космических исследований РАН,**  
**Рязанским государственным радиотехническим**  
**университетом,**  
**Советом по грантам Президента Российской Федерации,**  
**Российским фондом фундаментальных исследований,**  
**Российским научным фондом,**



**ИКИ**



Совет по грантам Президента Российской Федерации  
для государственной поддержки молодых российских ученых  
и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

**Большой объем дополнительной информации  
о многопороговых декодерах можно найти  
на специализированных двуязычных веб-сайтах  
[www.mtdbest.iki.rssi.ru](http://www.mtdbest.iki.rssi.ru) и [www.mtdbest.ru](http://www.mtdbest.ru)**

Для контакта:

Золотарев В.В.: ИКИ РАН, моб. 8-916-518-86-28,  
[zolatasd@yandex.ru](mailto:zolotasd@yandex.ru);

Овечкин Г.В.: РГРТУ, моб. 8-920-952-02-26,  
[g\\_ovechkin@mail.ru](mailto:g_ovechkin@mail.ru).