

ISSN 2070-0784

Achievements of Modern Radioelectronics

УСПЕХИ РАДИОТЕХНИКИ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

6' 2014

В номере:

НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ РОССИИ



Научные достижения

**Рязанского государственного
радиотехнического университета
(РГРТУ)**



тел./факс: +7(495) 625-92-41
<http://www.radiotec.ru>

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 70325 В КАТАЛОГЕ АГЕНТСТВА "РОСПЕЧАТЬ": ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ

6'
2014

УСПЕХИ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

акад. РАН Ю.В. Гуляев; чл.-корр. АН Армении А.Г. Гулян; акад. РАН В.И. Пустовойт; чл.-корр. РАН В.А. Черепенин; Л.П. Андрианова; д.ф.-м.н., проф. М.А. Басараб; д.ф.-м.н., проф. О.В. Бецкий; д.т.н., проф. Р.П. Быстров (зам. гл. ред.); д.т.н., проф. В.С. Верба; И.Г. Волкова; проф. Нико Деклерке (США-Франция); д.ф.-м.н., проф. А.С. Дмитриев; д.т.н., проф. А.В. Коренной; д.ф.-м.н., проф. Б.Г. Кутуза; д.ф.-м.н., проф. В.И. Луценко (Украина); д.т.н., проф. В.И. Меркулов; д.т.н., проф. В.Н. Митрохин; д.т.н., проф. А.И. Николаев (первый зам. гл. ред.); д.т.н., проф. А.С. Петров; д.ф.-м.н., проф. А.А. Потапов; д.т.н., проф. Е.М. Сухарев (зам. гл. ред.); д.т.н., проф. Г.И. Хлопов (Украина); д.т.н. В.В. Чапурский; д.т.н., проф. А.А. Романов; д.т.н. О.П. Черемисин; д.ф.-м.н., проф. Л.Ф. Черногор (Украина); д.ф.-м.н., проф. А.Д. Шатров; д.т.н., проф. О.И. Шелухин; д.т.н., проф. Я.С. Шифрин (Украина); д.ф.-м.н., проф. В.П. Яковлев

Главный редактор,
академик РАН
А.С. Бугаев

EDITORIAL BOARD:

Academician RAS, Yu.V. Gulyaev, Academician RAS V.I. Pustovoit, Corresponding Member RAS V.A. Cherepenin, Corresponding Member AAS A.G. Gulyan (Armenia), L.P. Andrianova, I.G. Volkova, Dr.Sc. (Eng.), Prof. R.P. Bystrov (Deputy Editor), Dr.Sc. (Eng.), V.V. Chapurskii, Dr.Sc. (Eng.), O.P. Cheremisin, Prof. Nico F. Declercq (USA-France), Dr.Sc. (Eng.), Prof. G.I. Khlopov (Ukraine), Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.V. Korennoi, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.N. Mitrokhin, Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.I. Nikolaev (First Deputy Editor), Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.S. Petrov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.A. Romanov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. O.I. Shelukhin, Dr.Sc. (Eng.), Prof. Ya.S. Shifrin (Ukraine), Dr.Sc. (Eng.), Prof. Ye.M. Sukharev (Deputy Editor), Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.S. Verba, Dr.Sc. (Phys.-Math.), M.A. Basarab, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. O.V. Betskii, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. L.F. Chernogor (Ukraine), Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. A.S. Dmitriev, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. B.G. Kutuza, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. V.I. Lutsenko (Ukraine), Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. A.A. Potapov, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. A.D. Shatrov, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. V.P. Yakovlev, Ph.D. (Eng.), Prof. V.I. Merkulov

Editor-in-Chief,
Academician
RAS,
A.S. Bugaev

Научные достижения

Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ)

Редактор выпуска – д. т. н., проф. А.И. Таганов

Содержание

К читателям

Гуров В.С.

3

Уменьшение влияния нестабильных ионов на работу монопольного масс-анализатора.

Гуров В.С., Дубков М.В., Буробин М.А., Харланов И.А.

4

Нахождение периода занятости сети передачи данных полигонного измерительного комплекса.

Корячко В.П., Лукьянов О.В., Шибанов А.П.

10

Двухкритериальный синтез шестнадцатипозиционных радиосигналов с управляемой связью между синфазной и квадратурной составляющими.

Кириллов С. Н., Покровский П. С.

18

Алгоритмы декодирования кодов с низкой плотностью проверок на четность, основанные на структуре алгоритма «минимум-сумма».

Витязев В.В., Лихобабин Е.А.

26

Эффективность многопороговых методов коррекции ошибок в каналах связи с замираниями.

Овечкин Г.В., Шевляков Д.А.

37

Беспороговая вейвлет-фильтрация спекл-шума в РСА-изображениях. Бехтин Ю.С., Брянцев А.А., Малебу Д.П.	45
Оптимальное обнаружение сигналов и объектов на основе фрактальных броуновских моделей. Паршин Ю.Н., Паршин А.Ю.	53
Обнаружение многочастотных радиолокационных сигналов. Попов Д.И.	61
Алгоритм нелинейной компенсации комплекса помех с использованием оптимальной пространственной структуры радиосистемы. Гусев С.И., Паршин Ю.Н.	67
Динамика тепловых процессов в миниатюрных герконах при разрыве электрического тока. Соколовский Э.И., Коротченко В.А., Путилина Ж.В.	74
Гиперболоидный осесимметричный энергоанализатор на двух кольцевых электродах. Гуров В.С., Кукса П.И.	81
Оценка числа зажженных элементов газоразрядного индикатора при их параллельном возбуждении. Шестеркин А.Н.	86
Бесконтактное измерение толщины льда. Баранов И.В., Болонин В.А., Давыдовкин В.М., Езерский В.В.	91

Contents

Dynamics of thermal processes in miniature reed switches at break electrical current. Gurov V.S., Dubkov M.V., Burobin M.A., Kharlanov I.A.	8
Finding the period of employment data network measuring complex polygon. Koryachko V.P., Lukyanov O.V., Shibano A.P.	17
Two-criteria synthesis 16-position radio signals with cross-correlation between in-phase and quadrature components. Kirillov S.N., Pokrovskij P.S.	25
MSA-structure based decoding algorithms for LDPC codes. Vityazev V.V., Likhobabin E.A.	35
Efficiency of multithreshold methods for error correction in fading communication channels. Ovechkin G.V., Shevlyakov D.A.	43
Wavelet-based despeckling in SAR images without thresholding. Bekhtin Y.S., Bryantsev A.A., Malebo D.P.	52
Optimal detection of signals and objects based on fractal Brownian models. Parshin Yu.N., Parshin A.Yu.	60
Detection of multifrequency radar signals. Popov D.I.	66
Nonlinear compensation algorithm for complex of interferences using optimal spatial structure of radio system. Gusev S.I., Parshin Yu.N.	72
Dynamics of thermal processes in miniature reed switches at break electrical current. Sokolovskij Je.I., Korotchenko V.A., Putilina Zh.V.	79
Hyperboloid axisymmetric energy analyzer based on two ring-type electrodes. Gurov V.S., Kuksa P.I.	85
Estimating the number of elements of the gas-discharge indicator lit at their parallel excitation. Shesterkin A.N.	90
Contactless measurement of a thickness of ice. Baranov I.V., Bolonin V.A., Davidochkin V.M., Ezerskiy V.V.	98

"Uspekhi sovremennoi radioelektroniki" (Achievements of Modern Radioelectronics)
is a scientific and technical journal about modern problems of radioelectronics and neighboring areas
of science and engineering. Established in 1947

Необходимую информацию Вы найдете на нашем сайте: <http://www.radiotec.ru>



Учредитель ЗАО «Издательство «Радиотехника». Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12980 от 20 июня 2002 г.

Сдано в набор 20.05.2014. Подписано в печать 31.05.2014. Изд. № 118. Тираж 400. Печ. л. 12,25.
107031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6. Тел./факс +7(495)621-4837
info@radiotec.ru

Дизайн и допечатная подготовка ЗАО «САЙНС-ПРЕСС».
Отпечатано в ФГУП Издательство «Известия» УД ПРФ
127254, ул. Добролюбова, д. 6. Контактные телефоны: 650-38-80. Заказ №2212.

ISSN 2070-0784

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2014

Незаконное тиражирование и перевод статей, включенных в журнал, в электронном и любом другом виде запрещено
и карается административной и уголовной ответственностью по закону РФ «Об авторском праве и смежных правах»

Эффективность многопороговых методов коррекции ошибок в каналах связи с замираниями

© Авторы, 2014

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2014

Г.В. Овечкин

д.т.н., доцент, кафедра «Вычислительная и прикладная информатика»,
Рязанский государственный радиотехнический университет
E-mail: g_ovechkin@mail.ru

Д.А. Шевляков

аспирант, инженер-программист, кафедра «Вычислительная и прикладная информатика»,
Рязанский государственный радиотехнический университет
E-mail: dima-shevlyakov@yandex.ru

Рассмотрены вопросы, связанные с эффективностью декодирования при использовании многопороговых методов коррекции ошибок в типичных многолучевых каналах связи с замираниями. Проведено сравнение с декодерами турбо- и низкоплотностных кодов. Показано, что многопороговые декодеры способны обеспечивать сопоставимую с лучшими методами коррекции ошибок достоверность передачи данных при в десятки раз меньшей сложности реализации.

Ключевые слова: замирание сигнала, беспроводные системы передачи данных, помехоустойчивое кодирование, самоортогональные коды, многопороговые декодеры, достоверность передачи данных, компьютерное моделирование, межсимвольная интерференция.

The problems related to the efficient decoding using multithreshold error correction techniques in typical multipath fading channels. A comparison with turbo and low-density parity-check codes is performed. It's shown the multithreshold decoders are able to provide the same reliability of transmission as the best error correction methods at in many times less implementation complexity.

Keywords: fading, wireless communication system, error-correcting coding, self-orthogonal codes, multithreshold decoders, data transmission reliability, computer simulation, intersymbol interference.

Введение

Любая современная система передачи данных имеет в своем составе устройства для кодирования и декодирования помехоустойчивых кодов, позволяющие исправлять ошибки в принятых из канала данных. За счет применения помехоустойчивых кодов также можно увеличивать дальность связи, уменьшать мощность передатчика и размеры антенн, экономить используемую полосу частот, увеличивать скорость передачи данных. Поэтому важность применения помехоустойчивого кодирования невозможно переоценить.

В теории кодирования известно всего несколько видов помехоустойчивых кодов и методов их декодирования, обеспечивающих работу вблизи пропускной способности канала связи. К ним можно отнести турбокоды, низкоплотностные и полярные коды, а также самоортогональные коды, для декодирования которых применяются многопороговые декодеры (МПД) [1]. При этом последнее, лишь незначительно уступая турбокоды и низкоплотностным кодам по обеспечиваемой энергетической эффективности, обладают в десятки раз меньшей сложностью как программной, так и аппаратной реализации, что делает целесообраз-

ным их применение в высокоскоростных системах передачи данных [2].

В настоящее время характеристики МПД детально исследованы для каналов с независимыми ошибками, в которых данные методы обеспечивают близкое к оптимальному декодирование даже очень длинных кодов всего лишь с линейной от длины кода сложностью реализации. Для таких каналов был предложен ряд способов улучшения эффективности МПД [3]. В результате, как аппаратные, так и программные версии МПД могут уже сейчас обеспечивать уровни энергетического выигрыша, сопоставимые с выигрышем лучших методов декодирования турбо и низкоплотностных кодов. Вместе с тем в реальных каналах из-за многолучевого распространения сигналов, доплеровского сдвига и многих других причин, характер ошибок значительно сложнее, поскольку ошибки группируются в пакеты. В таких каналах уменьшение вероятности ошибки только за счет увеличения энергетики сигнала оказывается в ряде случаев невозможным, и поэтому эффект от применения кодирования оказывается много больше, чем в каналах с независимыми ошибками. Наряду с помехоустойчивым кодированием в многолучевых

каналах с замираниями для повышения достоверности применяются такие технологии, как: мультиплексирование с частотным разделением сигналов (OFDM), организация передачи данных при помощи нескольких передающих и нескольких приемных антенн (MIMO-технологии) и т.п.

В данной работе выполнено исследование эффективности МПД в типичных моделях многолучевых каналов связи при использовании вышеперечисленных технологий для борьбы с негативными последствиями многолучевости и межсимвольной интерференции.

Многопороговое декодирование

Рассмотрим основные принципы многопорогового декодирования. Известно, что МПД используется для декодирования как блочных, так и сверточных самоортогональных кодов (СОК), кодер для которых является простейшим устройством, состоящим только из регистров сдвига и сумматоров по модулю 2 [2]. Пример кодера для блочного кода показан на рис. 1.

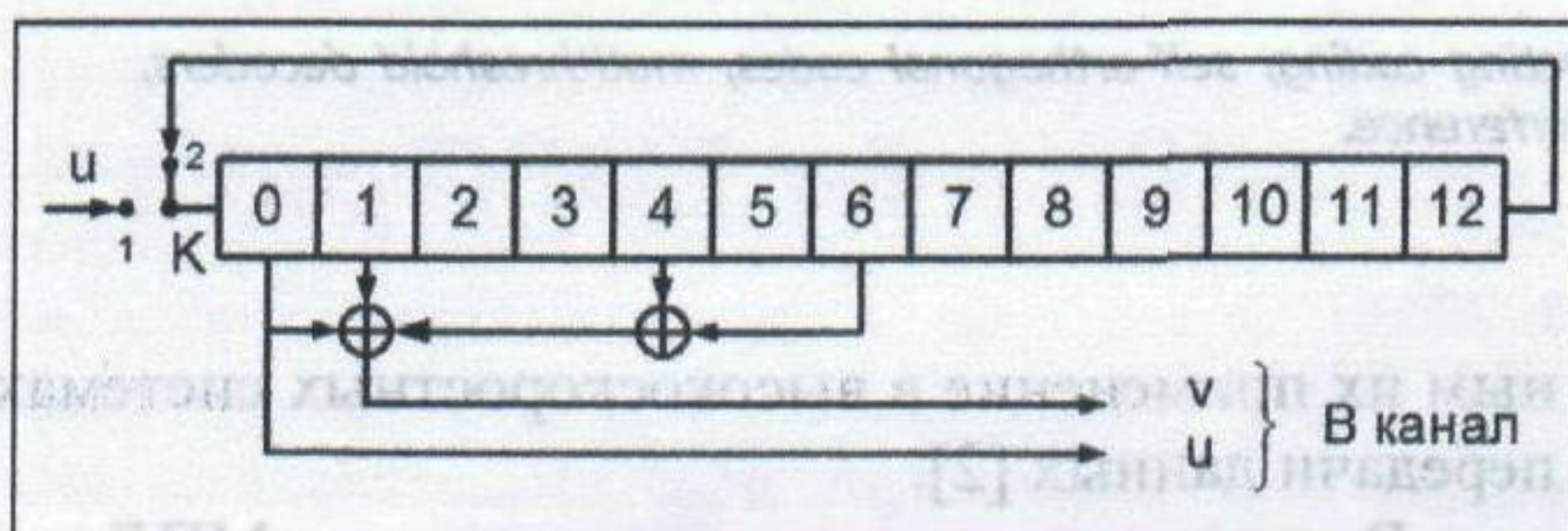


Рис. 1. Схема кодера блочного СОК

Достаточно простым является и сам МПД, пример которого для такого же блочного кода представлен на рис. 2. В его состав входят информационный, синдромный и разностный регистры, сумматоры по модулю 2 и пороговые элементы (ПЭ), которые суммируют свои входы и сравнивают полученную сумму с порогом. Подробное описание принципов работы представленных схем можно найти в [2].

Следует отметить, что в реальных системах МПД используется для декодирования гораздо более длинных кодов, имеющих по несколько информационных и проверочных ветвей, что позволяет существенно увеличить энергетический выигрыш кодирования и для блочных, и для сверточных кодов, который для гауссовских каналов может составлять 8 дБ и более.

Заметим, что многопороговые методы коррекции ошибок уже реализованы на современной элементной базе. Одна из последних реализаций МПД была выполнена в ИКИ РАН на ПЛИС Altera

Stratix EP1S20 (рис. 3) [4]. Этот МПД является очередным важнейшим этапом развития декодеров сверточных кодов на базе МПД и может считаться представителем их шестого поколения. Данная ПЛИС способна обеспечить декодирование входного потока с информационной скоростью более 1 Гбит/с. Этого удалось достичь за счет использования конвейера при реализации процедур вычислений на пороговом элементе декодера.



Рис. 2. Схема декодера МПД блочного кода

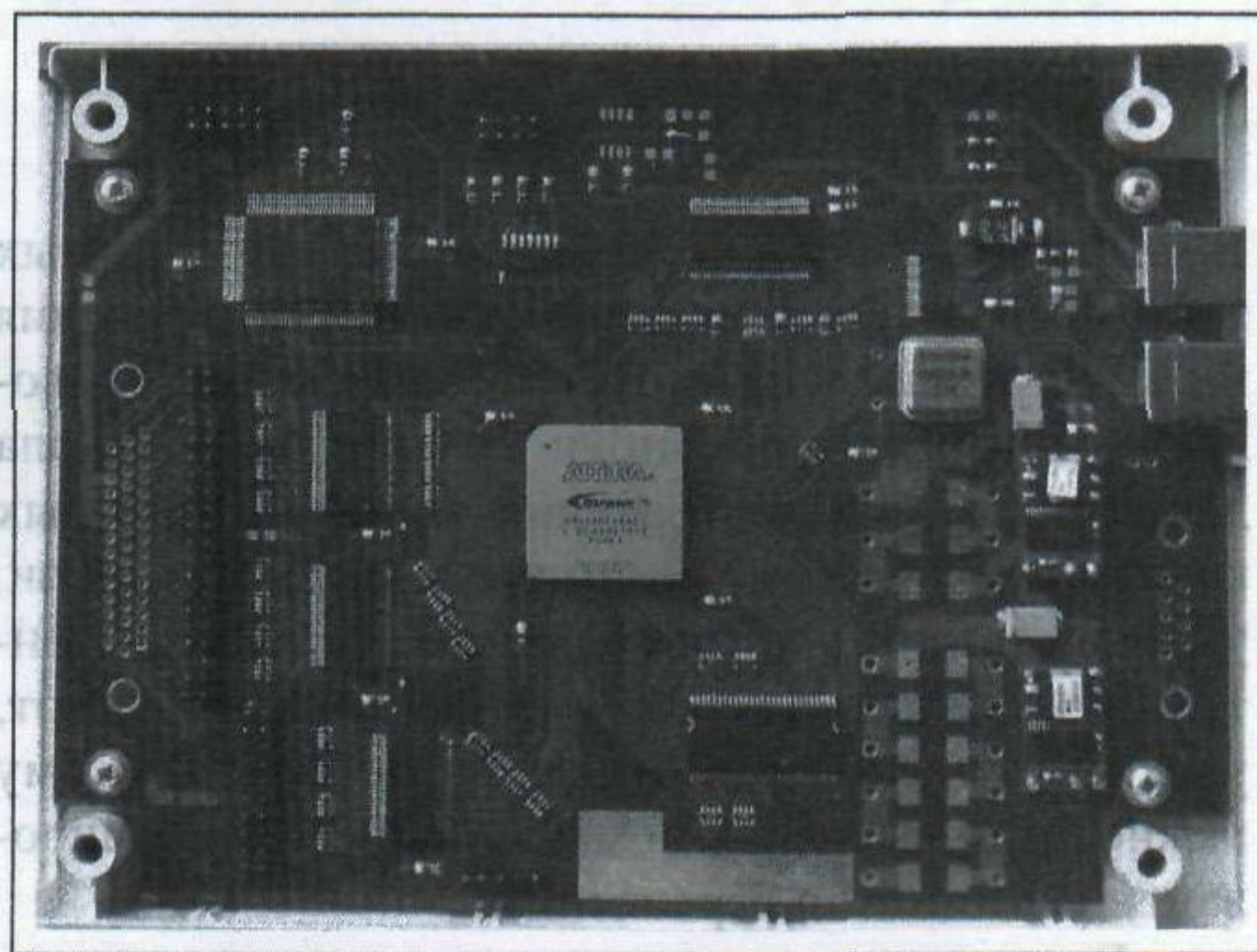


Рис. 3. МПД, разработанный в ИКИ РАН на ПЛИС Altera Stratix EP1S20

Результаты моделирования для каналов с релеевскими и райсовскими замираниями

Далее рассмотрим эффективность МПД в различных каналах с замираниями [5]. На рис. 4 кривой 1 представлен пример зависимости вероятности ошибки декодирования (BER) МПД от уровня шума в канале (E_b/N_0) с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). При получении данных характеристик использовались МПД для самоортогонального кода с кодовой скоростью

$R=1/2$, кодовым расстоянием $d=17$ и длиной $n=32768$ бит, модуляция типа QPSK и демодулятор, формирующий только жесткие решения относительно принятых бит. С данной кривой в дальнейшем будем сравнивать результаты моделирования, полученные для каналов с замираниями.

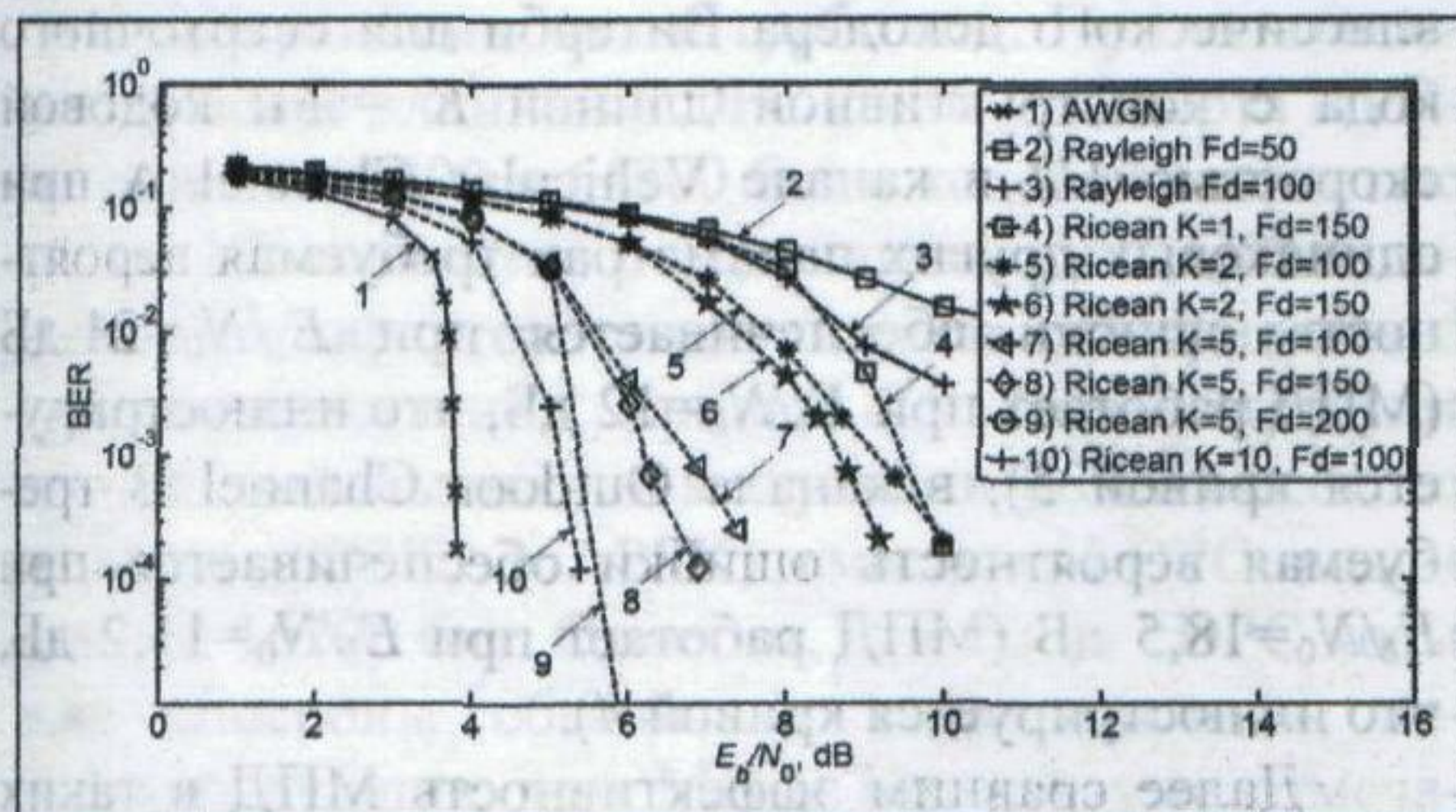


Рис. 4. Характеристики МПД в канале с замираниями

Кривыми 2 и 3 на рис. 4 показаны характеристики МПД в канале с коррелированными релеевскими замираниями с доплеровской частотой $F_d=50$ Гц и 100 Гц соответственно. При этом в приемник от передатчика приходят только отраженные лучи, т.е. прямой видимости между ними нет. Заметим, что в данном случае наблюдается существенное ухудшение характеристик по сравнению с каналом с АБГШ. При этом с более быстрыми замираниями МПД справляется лучше. Это объясняется тем, что при медленных замираниях часто ошибочными оказываются достаточно длинные последовательности рядом лежащих бит, искажая значительную часть кодового блока. И с такой долей искаженных бит МПД как, впрочем, и любые другие методы коррекции ошибок, не справляются. Одним из возможных способов повышения эффективности МПД в таких условиях видится использование дополнительного перемежителя, длина которого должна составлять сотни тысяч бит.

Оставшиеся кривые соответствуют случаю работы МПД в канале с райсовскими замираниями, когда между передатчиком и приемником есть прямая видимость. Кривая 4 на рис. 4 соответствует варианту с коэффициентом Райса $K=1$ и доплеровской частотой $F_d=150$ Гц. Канал при получении кривых 5 и 6 имел $K=2$ и $F_d=100$ Гц и 150 Гц. Кривым 7, 8 и 9 соответствуют значения коэффициента Райса $K=5$ и доплеровские частоты $F_d=100$, 150 и 200 Гц соответственно. И, наконец, кривой 10 соответствуют $K=10$ и $F_d=100$ Гц. Сравнивая перечисленные графики между собой, а также ра-

нее рассмотренные графики видно, что чем больше коэффициент Райса, т.е. чем больше мощность прямого луча, тем лучше обеспечиваемые характеристики помехоустойчивости. Но при этом даже при $K=10$ (т.е. при десятикратном превосходстве мощности прямого луча над мощностью отраженных лучей) наблюдается потеря в энергетике около 2 дБ по сравнению с гауссовским каналом. Кроме того, видно, что и в данном случае МПД лучше справляется с более быстрыми замираниями, поскольку при этом меньше вероятность, что значительная часть кодового блока будет подвержена сильным замираниям.

Рассмотренный вариант применения МПД позволяет успешно бороться только с частотно-неселективными замираниями, такими как релеевские замирания и замирания райса. В том случае, если замирания частотно-селективные (т.е. присутствует межсимвольная интерференция), то для борьбы с ними необходимо использовать дополнительные средства. Одним из подобных средств является так называемое мультиплексирование с ортогональным частотным разделением или OFDM, которое за счет перехода к нескольким несущим позволяет увеличить длину символа, что при использовании защитного интервала достаточной длины дает возможность устранить влияние межсимвольной интерференции.

Результаты моделирования для моделей канала, рекомендованных ITU-R

Для моделирования многолучевого канала с межсимвольной интерференцией обычно используется так называемая линия из задержек с отводами. При этом передаваемый сигнал $u(t)$ проходит через $N+1$ блоков задержек (это число равно числу лучей многолучевой модели), задерживаясь в каждом на заданное время. Сигналы с выхода каждой из задержек искажаются случайным мультипликативным коэффициентом и суммируются друг с другом, получая выход многолучевого канала $v(t)$. Этот выход в дальнейшем искажается под действием АБГШ и подается на приемник. Заметим, что можно придумать бесконечное множество различных многолучевых каналов, отличающихся числом лучей, их задержками и мощностями. В то же время сравнение эффективности альтернативных вариантов повышения достоверности передачи данных целесообразно выполнять в одинаковых условиях. Для этого можно использовать типичные модели каналов связи.

Одной из наиболее известных организаций, предлагающих параметры типичных моделей многолучевых каналов связи, является сектор радиосвязи Международного союза электросвязи (ITU-R). Эта организация разработала рекомендацию M.1225 [6], содержащую параметры типичных моделей радиоканалов. В частности, в этой рекомендации определены модели каналов Indoor Channel A, Indoor Channel B, Outdoor Channel A, Outdoor Channel B, Vehicular Channel A, Vehicular Channel B, отличающиеся числом лучей, их относительными задержками и мощностями, а также областью применения.

Представим некоторые полученные результаты моделирования МПД в перечисленных моделях каналов ITU-R. На рис. 5 показаны графики зависимости вероятности ошибки декодирования МПД для кода с кодовой скоростью $1/2$ и длиной 32768 бит от отношения сигнал/шум на бит в многолучевых каналах с замираниями. Тип применяемого канала указан в легенде к рисунку. При этом использовалось модуляция типа QPSK и демодулятор, формирующий только жесткие решения относительно декодированных битов (использование мягких решений демодулятора позволит еще на $1...1,5$ дБ улучшить характеристики). Также использовалось OFDM мультиплексирование с 1024 несущими с основными параметрами, соответствующими стандарту IEEE802.16e. Защитный интервал составлял $1/16$ длины OFDM символа, чего практически для всех типов каналов (за исключением Vehicular Channel B) было достаточно.

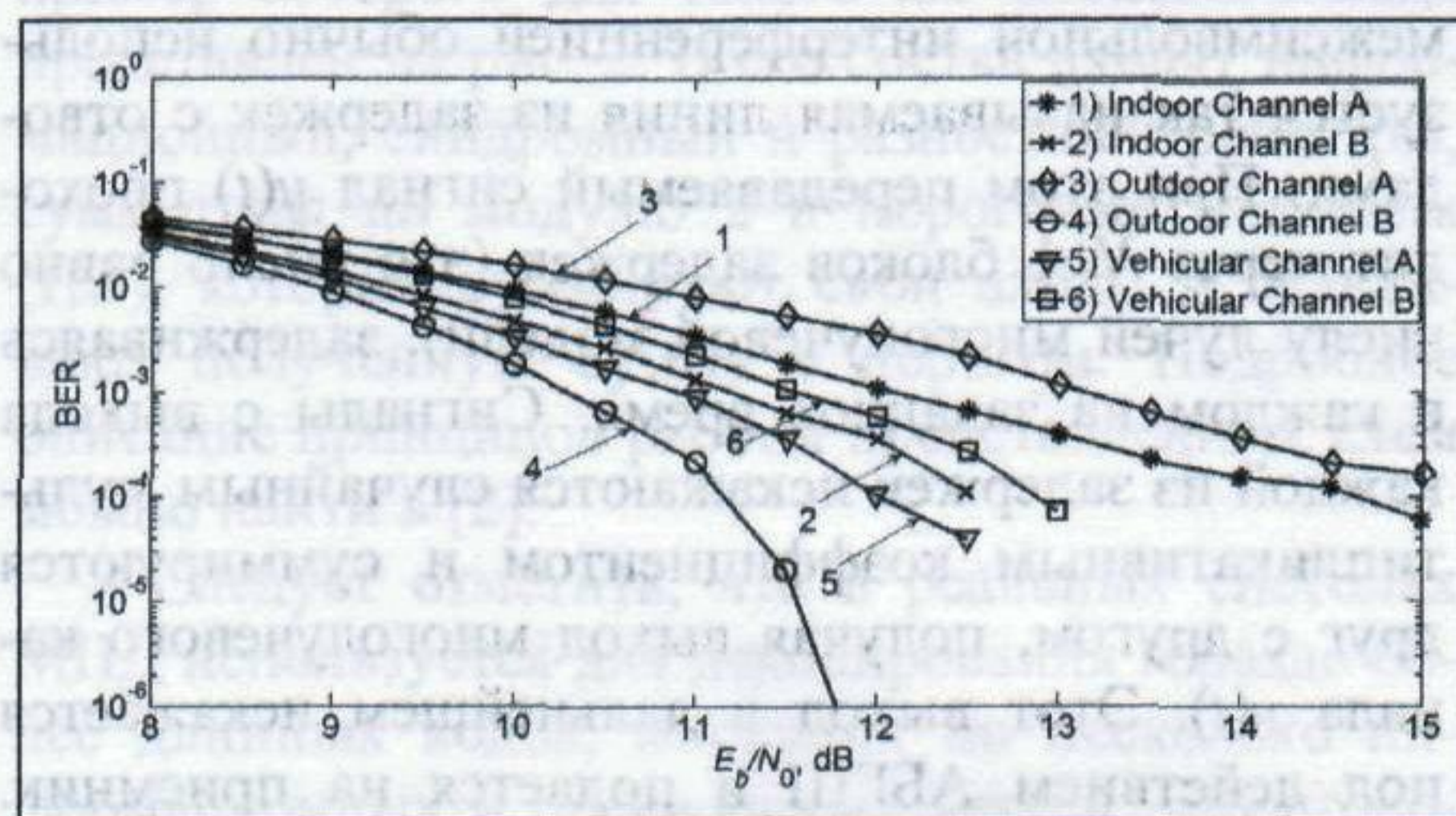


Рис. 5. Характеристики МПД в каналах ITU-R

Из сравнения данных результатов с ранее полученными результатами для частотно-неселективных замираний [5] следует, что наличие частотно-селективных замираний приводит к дополнительному ухудшению характеристик, чего и следовало ожидать. При сравнении характеристик,

обеспечиваемых МПД, с характеристиками других методов коррекции ошибок оказывается, что МПД позволяет получить, например, вероятность ошибки декодирования 10^{-4} при уровне шума, на несколько децибел меньше, чем классические методы коррекции ошибок. Например, с помощью классического декодера Витерби для сверточного кода с конструктивной длиной $K = 7$ и кодовой скоростью $1/2$ в канале Vehicular Channel A при одинаковых других параметрах требуемая вероятность ошибки обеспечивается при $E_b/N_0 = 21$ дБ (МПД работает при $E_b/N_0 = 12$ дБ, что иллюстрируется кривой 5), в канале Outdoor Channel B требуемая вероятность ошибки обеспечивается при $E_b/N_0 = 18,5$ дБ (МПД работает при $E_b/N_0 = 11,2$ дБ, что иллюстрируется кривой 4).

Далее сравним эффективность МПД в таких каналах при использовании различных видов модуляции и сравним ее с эффективностью лучших известных методов коррекции ошибок. На рис. 6 показаны графики зависимости вероятности ошибки декодирования для различных кодов от отношения сигнал/шум в канале типа Outdoor Channel A. Основные параметры модуляции и канала совпадают с параметрами ранее рассмотренного рис. 5. Характеристики МПД для кода с кодовой скоростью $1/2$ и длиной 32768 бит при использовании различных видов модуляции (QPSK, 8PSK, 16APSK) представлены на данном рисунке кривыми 1, 2 и 3 соответственно. Подобные результаты моделирования для гауссовского канала были представлены в [7]. Отметим, что при использовании модуляции типа 8PSK проигрыш в энергетике по сравнению с QPSK составляет около 3 дБ, а при использовании модуляции 16APSK – проигрыш порядка 5 дБ. При этом данные типы модуляции позволяют повысить битовую скорость передачи соответственно в $1,5$ и 2 раза без расширения полосы частот.

На рис. 6 кривой 9 показаны характеристики турбо кода с кодовой скоростью $1/2$ и длиной кодового блока 10228 бит при использовании модуляции типа QPSK. Конструктивная длина составляющих кодов была равна 4 . При декодировании составляющих кодов использовался max-log-MAP алгоритм. Отметим, что характеристики турбо кода оказываются существенно хуже характеристик МПД. Это объясняется тем, что такой длины кода оказывается недостаточно, чтобы справиться с замираниями в канале связи. Характеристики достаточно короткого низкоплотного кода

(LDPC) стандарта IEEE 802.16e (WiMAX) длиной 2016 бит при таких же остальных параметрах системы передачи данных показаны на рис. 6 кривой 4. Для декодирования этого и других LDPC кодов использовался min-sum алгоритм декодирования. Отметим, что данный код также плохо справляется с замираниями, как и турбо код. При использовании более длинных LDPC кодов стандарта DVB-S2 длиной 16200 и 64800 бит с кодовой скоростью около 1/2 совместно с модуляцией типа QPSK получаются характеристики, показанные кривыми 5 и 8 соответственно. Кривые 6 и 7 соответствуют случаю использования модуляции более высокого порядка (8PSK, 16APSK) вместе с LDPC кодом длиной 16200 бит. Отметим, что такие LDPC коды уже способны обеспечить характеристики, несколько лучшие, чем МПД. Но, как уже отмечалось, сложность реализации их декодеров в десятки раз больше, чем сложность МПД. Кроме того, для самоортогональных кодов, используемых совместно с МПД, при незначительном увеличении сложности (примерно в 4 раза) декодера, как предложено в [8], оказывается возможным обеспечить характеристики, показанные на рис. 6 кривыми 10, 11 и 12 для типов модуляции QPSK, 8PSK и 16APSK соответственно. Эти результаты оказываются лучше характеристик базового МПД примерно на 1...1,5 дБ и сопоставимыми с результатами, обеспечиваемыми LDPC кодами стандарта DVB-S2 длиной 16200 бит.

Результаты моделирования для моделей канала, рекомендованных консорциумом 3GPP

Другой широко используемой моделью многолучевого канала является Spatial Channel Model (SCM) [9], рекомендованная консорциумом 3GPP и позволяющая выполнять более детальное моделирование многолучевости по сравнению с моделями ITU-R.

Представим некоторые полученные результаты моделирования МПД и других методов коррекции ошибок в модели канала SCM. При этом использовалась модель канала типа Urban macro с одной передающей и одной приемной антеннами и модуляция типа QPSK. Для борьбы с многолучевостью использовалось OFDM мультиплексирование с ранее описанными параметрами.

На рис. 7 кривой 1 представлена зависимость вероятности ошибки декодирования МПД для кода с кодовой скоростью 1/2 и длиной 32768 бит от отношения сигнал/шум на бит. При этом исполь-

зовался демодулятор, формирующий только жесткие решения относительно декодированных битов. Характеристики декодеров рассмотренных ранее турбо и LDPC кодов в таких же условиях представлены на рис. 7.

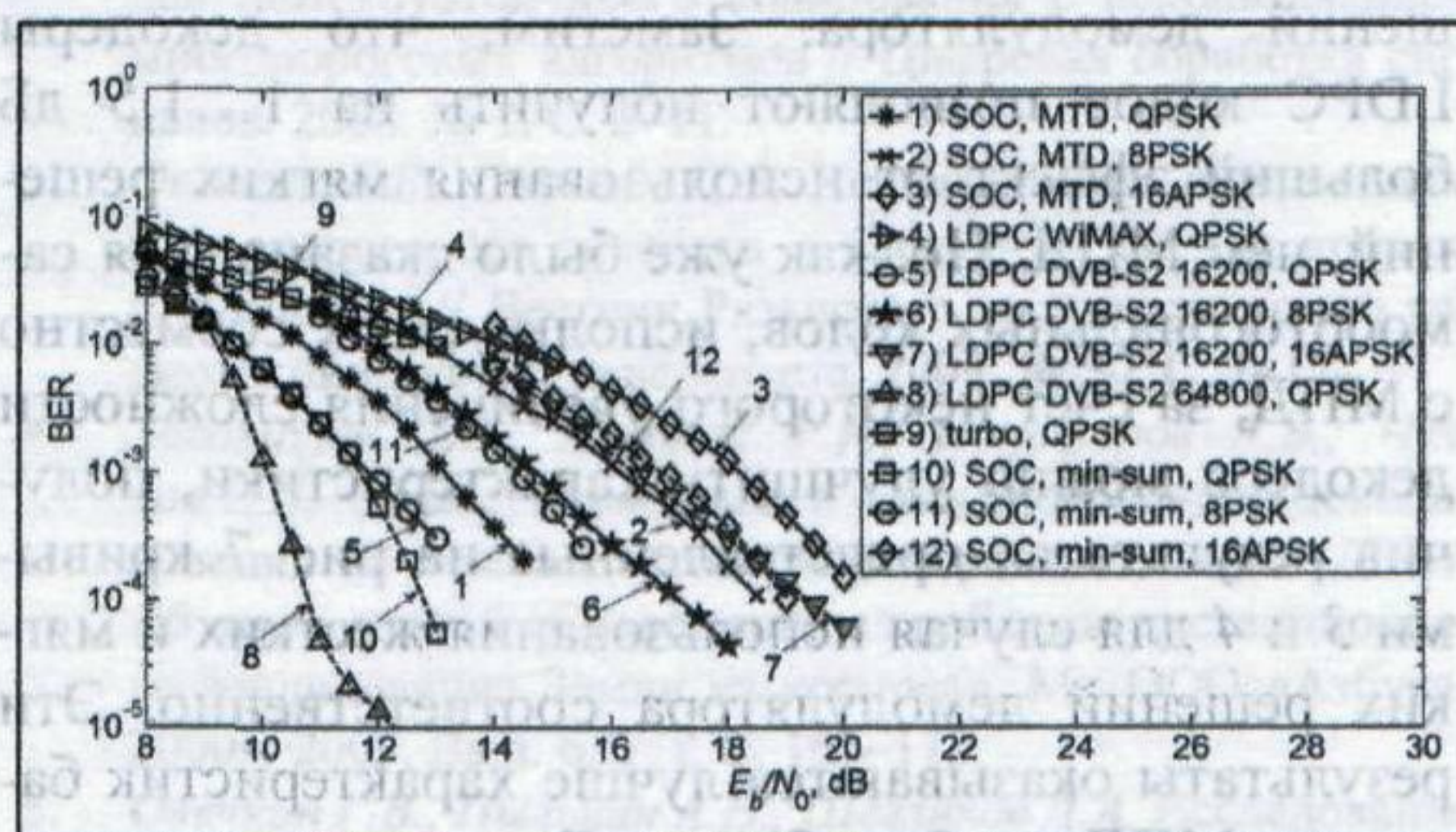


Рис. 6. Результаты моделирования в ITU-R канале типа Outdoor Channel A

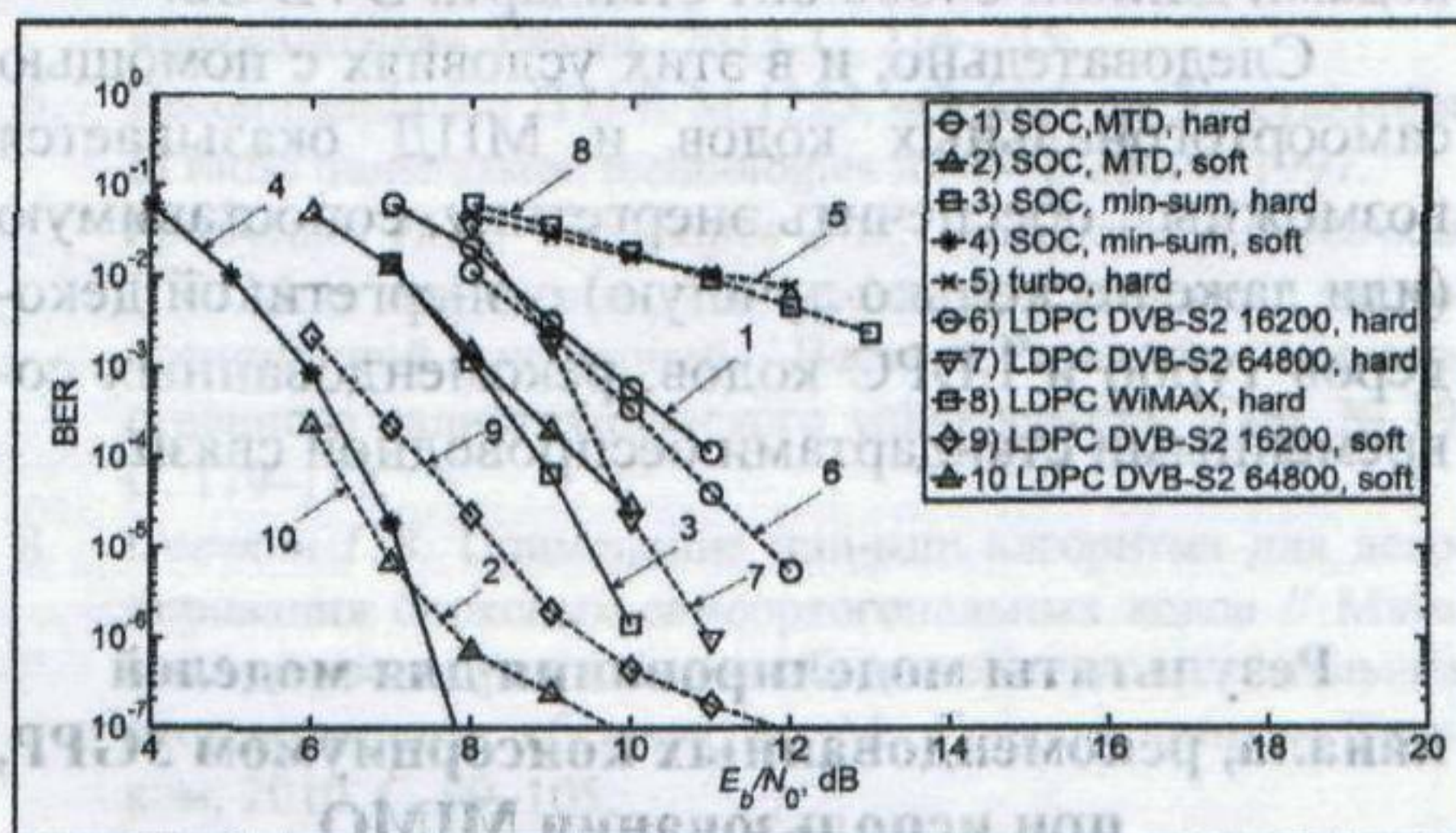


Рис. 7. Результаты моделирования в SCM канале типа Urban macro при модуляции QPSK

Здесь кривая 5 соответствует турбо коду, кривая 6 – LDPC коду стандарта DVB-S2 с кодовой скоростью 0,44 и длиной 16200 бит, кривая 7 – LDPC коду стандарта DVB-S2 с кодовой скоростью 1/2 и длиной 64800 бит, кривая 8 – LDPC коду стандарта WiMAX с кодовой скоростью 1/2 и длиной 2016 бит. Отметим, что эффективность турбокодов и коротких LDPC кодов стандарта WiMAX снова существенно хуже эффективности остальных кодов. Это объясняется тем, что такие короткие коды не справляются с потоками ошибок, возникающими в многолучевом канале связи. Характеристики МПД оказываются сопоставимыми с характеристиками LDPC кода длиной 16200 бит и около 1...1,5 дБ уступают характеристикам LDPC кода длиной 64800 бит. При использовании мягких решений демодулятора с помощью декодеров этих же кодов в многолучевом канале удастся получить на 1...3 дБ лучшие результаты по

сравнению со случаем использования только жестких решений. Это иллюстрируется кривыми 2, 9 и 10, соответствующими случаю использования многопороговым декодером, а также декодером LDPC кодов длиной 16200 и 64800 бит мягких решений демодулятора. Заметим, что декодеры LDPC кодов позволяют получить на 1...1,5 дБ больший эффект от использования мягких решений, чем МПД. Но, как уже было сказано, для самоортогональных кодов, используемых совместно с МПД, за счет некоторого увеличения сложности декодера можно улучшить характеристики, получив результаты, представленные на рис. 7 кривыми 3 и 4 для случая использования жестких и мягких решений демодулятора соответственно. Эти результаты оказываются лучше характеристик базового МПД на 2 и более дБ и даже несколько превосходят результаты, обеспечиваемые LDPC кодами длиной 64800 бит стандарта DVB-S2.

Следовательно, и в этих условиях с помощью самоортогональных кодов и МПД оказывается возможным обеспечить энергетику, сопоставимую (или даже несколько лучшую) с энергетикой декодеров турбо и LDPC кодов, рекомендованных современными стандартами беспроводной связи.

Результаты моделирования для моделей канала, рекомендованных консорциумом 3GPP, при использовании MIMO

Один из подходов к увеличению скорости передачи данных и улучшению качества связи в каналах с замираниями заключается в использовании систем с несколькими передающими и несколькими приемными антеннами (MIMO). Антенны разнесены в пространстве настолько, чтобы корреляция сигналов на них была минимальна. Такая схема позволяет существенно увеличить надежность и производительность беспроводной системы связи.

Опишем полученные результаты для модели канала Spatial Channel Model типа Urban micro при использовании MIMO. Для борьбы с многолучевостью снова использовалось OFDM мультиплексирование с рассмотренными параметрами. В качестве помехоустойчивых кодов применялись самоортогональный код с кодовой скоростью 1/2 и длиной 32768 бит, декодируемый с помощью МПД, и LDPC код стандарта DVB-S2 с кодовой скоростью 0,44 и длиной 16200 бит.

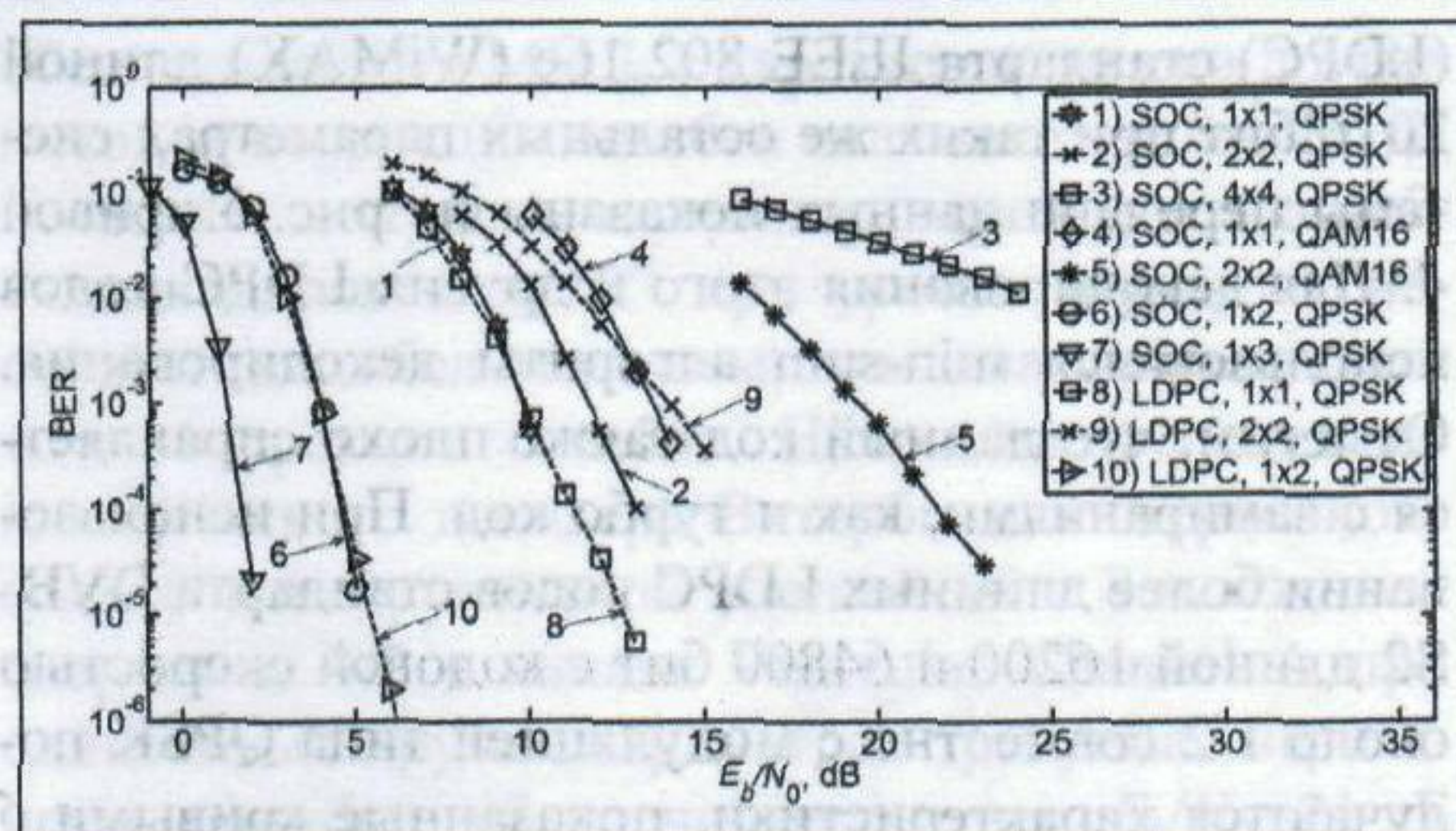


Рис. 8. Результаты моделирования в SCM канале типа Urban micro при использовании технологии MIMO

На рис. 8 кривыми 1 и 8 представлена зависимость вероятности ошибки декодирования самоортогонального кода и LDPC кода от отношения сигнал/шум на бит при использовании модуляции типа QPSK. При этом использовался демодулятор, формирующий только жесткие решения относительно декодированных битов. Отметим, что данные коды позволяют обеспечить примерно одинаковую достоверность передачи данных. При переходе к двум передающим и двум приемным антеннам энергетическая эффективность системы несколько уменьшается (кривые 2 и 9), но битовая скорость передачи увеличивается в два раза без расширения используемой полосы частот. Заметим, что для МПД такое же увеличение скорости обеспечивается при переходе к модуляции QAM16 вместо QPSK, но эффективность такой системы (кривая 4) оказывается почти на 2 дБ хуже варианта MIMO.

Также заметим, что эффект от применения технологии MIMO для самоортогональных кодов оказался больше, чем для LDPC кодов. В том случае, если битовая скорость передачи данных не увеличивается (используется одна передающая антенна и модуляция типа QPSK), за счет применения нескольких приемных антенн можно существенно улучшить достоверность передачи данных. Пример характеристик подобных систем для двух и трех приемных антенн показан на рис. 8 кривыми 6 и 7. Выигрыш по сравнению с одной приемной антенной при целевой вероятности ошибки декодирования на бит 10^{-5} составил 4 и 7 дБ соответственно. Такое же улучшение получается и при использовании LDPC кодов (кривая 10). Из рис. 8 также следует, что при попытках дальнейшего увеличения скорости передачи данных за счет MIMO характеристики МПД сильно ухудшаются (кривые 3 и 5). Поэтому подобные варианты уве-

личения скорости передачи на практике использовать нецелесообразно, либо нужно применять дополнительные способы улучшения характеристик, например, использование предварительного кодирования (precoding) для оптимизации размещения передаваемых символов по передающим антеннам, учитывающего информацию о состоянии канала связи.

Заключение

Результаты, представленные в работе, показали, что МПД, обеспечивающие высокую эффективность в гауссовских каналах, оказываются способными бороться с ошибками и в значительно более сложных условиях применения, когда большинство других методов исправления ошибок оказываются бессильными. Заметим, что эффект от применения помехоустойчивого кодирования в данных случаях многократно превышает эффект от применения кодирования в гауссовском канале, поскольку в каналах с замираниями без применения кодирования часто оказывается вообще невозможным обеспечить требуемую достоверность передачи данных даже при очень большой мощности излучаемого сигнала.

Большой объем научно-методических и учебно-демонстрационных материалов по МПД алгоритмов представлен на специализированном двуязычном веб-сайте www.mtdbest.ru.

Представленные результаты получены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №13-07-00391) и гранта Президента Российской Федерации (грант МД-639.2014.9).

Литература

1. Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных // *Электросвязь*. 2008. № 12. С. 58-61.
2. Золотарёв В.В., Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В. Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых алгоритмов // *Цифровая обработка сигналов*. 2008. № 1. С. 2-11.
3. Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Использование недвоичного многопорогового декодера в каскадных схемах коррекции ошибок // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2009. № 30. С. 7-12.
4. Золотарёв В.В., Назиров Р.Р., Никифоров А.В., Чулков И.В. Новые возможности многопорогового декодирования по высокодостоверной передаче данных ДЗЗ // *Сб. науч. статей «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. М.: ООО «Азбука-2000». 2009. Вып. 6. Т. I. С. 167-173.
5. Овечкин Г.В., Пылькин А.Н., Шевляков Д.А. Исследование эффективности многопорогового декодера в каналах связи с замираниями // *Материалы 6-й Междунар. научно-технич. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»*. Рязань. 2013. С. 214-215.
6. Recommendation ITU-R M.1225, «Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000». 1997.
7. Гринченко Н.Н., Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Овечкин П.В. Многопороговое декодирование в каналах с многопозиционной модуляцией // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2006. № 19. С. 179-182.
8. Овечкин Г.В. Применение min-sum алгоритма для декодирования блочных самоортогональных кодов // *Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр.* М.: Горячая линия – Телеком. 2010. С. 99-105.
9. 3GPP TR 25.996. Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations.

Поступила 30 марта 2014 г.

Efficiency of multithreshold methods for error correction in fading communication channels

© Authors, 2014

© Radiotekhnika, 2014

G.V. Ovechkin

Dr. Sc. (Eng.), Department "Computational and Applied Informatics",
Ryazan State Radio Engineering University
E-mail: g_ovechkin@mail.ru

D.A. Shevlyakov

Post-graduate Student, Programming Engineer, Department "Computational and Applied Informatics",
Ryazan State Radio Engineering University
E-mail: dima-shevlyakov@yandex.ru

Object of research in article is the method of decoding for error-correction codes, intended for correction of errors in a communication channel and called by the multithreshold decoder (MTD). It is known that in channels with independent errors this

method carries out near optimal decoding even very long codes only with linear from code length implementation complexity, providing the coding gain levels comparable to the gain from the best methods of decoding for turbo and the low-density parity-check codes. Examples of encoding and decoding schemes, presented in article, and also the presented FPGA version of MPD decoder illustrate simplicity of the method.

It is noted that in real channels because of multipath signal propagation, Doppler shift and many other reasons character of errors is much more complex as errors are grouped in packages. Along with error-correction coding in multipath channels with a dying down such technologies are applied to increase of reliability, as orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), the data transmission organization by multiple input and multiple output antennas (MIMO technology), etc. In work the actual research problem of MTD efficiency in such more difficult conditions which decision will significantly expand a scope of this surprisingly simple and at the same time effective method is put and solved.

At research such typical multipath channel models, as channels with the independent and correlated Rayleigh and Rice fading, the channel models recommended by sector of a radiocommunication of the International union of telecommunication (ITU-R), and also the multipath channel models (Spatial Channel Model) recommended by consortium 3GPP were used. To increase of reliability of data transmission together with MTD authors applied such technologies, as OFDM and MIMO. Results of modeling for MTD when using various types of modulation and demodulation were compared to the results provided with the best known methods of error correction, such as decoders for turbo and low-density parity-check codes recommended by standards of a wireless communication.

The presented results showed that MTD providing high efficiency in Gaussian channels, are capable to fight against errors in much more difficult conditions of application, providing coding gain comparable (or even slightly better) with gain of decoders for turbo and the low-density parity-check codes.

References

1. Zubarev YU.B., Ovechkin G.V. Pomekhoustojchivoe kodirovanie v tsifrovyykh sistemakh peredachi dannykh // *EHlektrosvyaz*. 2008. № 12. S. 58-61.
2. Zolotaryov V.V., Zubarev YU.B., Ovechkin G.V. Obzor metodov pomekhoustojchivogo kodirovaniya s ispol'zovaniem mnogoporogovykh algoritmov // *TSifrovaya obrabotka signalov*. 2008. № 1. C. 2-11.
3. Ovechkin G.V., Ovechkin P.V. Ispol'zovanie nedvoichnogo mnogoporogovogo dekodera v kaskadnykh skhemakh korrektsii oshibok // *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2009. № 30. S. 7-12.
4. Zolotarëv V.V., Nazirov R.R., Nikiforov A.V., Čul'kov I.V. Novye vozmozhnosti mnogoporogovogo dekodirovaniâ po vysokodostovernoy peredače dannykh DZZ // *Sb. nauch. statej «Sovremennyye problemy distancionnogo zondirovaniâ Zemli iz kosmosa»*. M.: OOO «Azбука-2000». 2009. Vyp. 6. T. 1. S. 167-173.
5. Ovechkin G.V., Pyl'kin A.N., Ševlâkov D.A. Issledovanie èffektivnosti mnogoporogovogo dekodera v kanalah svâzi s zamiraniâmi // *Materialy 6-j Mezhdunar. nauchno-tehnič. konf. «Kosmonavtika. Radioèlektronika. Geoinformatika»*. Râzan'. 2013. S. 214-215.
6. Recommendation ITU-R M.1225, «Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000». 1997.
7. Grinchenko N.N., Zolotarev V.V., Ovechkin G.V., Ovechkin P.V. Mnogoporogovoe dekodirovanie v kanalah s mnogopozitsionnoj modulyatsiej // *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2006. № 19. S. 179-182.
8. Ovechkin G.V. Primenenie min-sum algoritma dlya dekodirovaniya blokovykh samoortogonal'nykh kodov // *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie vychislitel'nykh sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.* M.: Goryachaya liniya – Telekom. 2010. S. 99-105.
9. 3GPP TR 25.996. Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations.

Издательство «Радиотехника» выпускает следующие журналы:

РАДИОТЕХНИКА

Главный редактор – академик РАН Ю. В. Гуляев
Международный научно-технический журнал, освещающий широкий круг проблем приоритетных направлений развития систем связи, локации, навигации, радиоэлектронных устройств и схем. Содержит под обложкой журнал в журнале «Радиосистемы».
Включен в Перечень ВАК

УСПЕХИ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Главный редактор – академик РАН А. С. Бугаев
Международный научно-технический журнал, публикующий обзоры о современных проблемах радиоэлектроники и смежных областей науки и техники.
Включен в Перечень ВАК

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Главный редактор – чл.-корр. РАН В.А. Черепенин
Международный научно-технический и теоретический журнал, освещающий фундаментальные и прикладные научно-технические проблемы, относящиеся к разработке новых математических методов, математическому моделированию физических процессов, космическим исследованиям, физике и технике СВЧ, миллиметровым и субмиллиметровым волнам, вопросам метрологии и информационно-измерительным системам.
Включен в Перечень ВАК

БИОМЕДИЦИНСКАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Главный редактор – академик РАН Ю. В. Гуляев
Международный научно-прикладной журнал, содержащий материалы по биомедицинским технологиям, воздействию электромагнитных колебаний на биологические объекты, а также информацию о новых приборах для применения в биологии, биомедицинских технологиях и медицине.
Включен в Перечень ВАК

АНТЕННЫ

Главный редактор – д. т. н., профессор А. П. Курочкин
Международный научно-технический и теоретический журнал, содержащий научные оригинальные и обзорные статьи по основным направлениям теории и техники антенн и фидерных устройств.
Включен в Перечень ВАК

НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ: разработка, применение

Главный редактор – д. ф.-м. н., профессор А. В. Чечкин
Международный научно-технический журнал, посвященный актуальным вопросам разработки и применения интеллектуальных информационных систем и технологий, приложениям теории искусственных нейронных сетей и нейрокомпьютинга, нейронауке и интеллекту в целом.
Включен в Перечень ВАК

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Главный редактор – д. т. н., профессор В. П. Марин
Международный научно-технический журнал, освещающий новые наукоемкие энергосберегающие технологии в экологии, медицине, промышленности, а также в науках о Земле.
Включен в Перечень ВАК

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Главный редактор – д. т. н., профессор В. С. Верба
Международный научно-технический журнал, отражающий вопросы разработки и проектирования информационно-измерительных и управляющих систем, создания средств и методов для измерения угловых, линейных и механических величин.
Включен в Перечень ВАК

НЕЛИНЕЙНЫЙ МИР

Главный редактор – д. ф.-м. н., профессор А. А. Потапов
Международный научно-технический и теоретический журнал, отражающий фундаментальные направления физики, математики, других естественных и гуманитарных наук с междисциплинарных позиций синергетики и нелинейной динамики.
Включен в Перечень ВАК

ТЕХНОЛОГИИ ЖИВЫХ СИСТЕМ

Главный редактор – д. м. н., академик РАН и РАМН А. И. Григорьев
Международный научно-теоретический и прикладной журнал, отражающий фундаментальные и прикладные проблемы наук о жизни (биомедицинские технологии, биоматериаловедение) и результаты исследований на стыке биологии, медицины, химии и других естественных, гуманитарных и точных наук с междисциплинарных позиций.
Включен в Перечень ВАК

СИСТЕМЫ ВЫСОКОЙ ДОСТУПНОСТИ

Главный редактор – д. т. н., чл.-корр. Академии криптографии В. И. Будзко
Научно-технический журнал освещает достижения по обеспечению конфиденциальности, доступности и целостности информации для класса информационно-телекоммуникационных систем высокой доступности.
Включен в Перечень ВАК

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОСТРУКТУРЫ

Главный редактор – чл.-корр. РАН А. С. Сигов
Международный научно-технический и теоретический журнал, содержащий статьи по структурам и свойствам наноматериалов от твердотельных до биологических объектов, по технологиям изготовления и методам исследования наноструктур с разнообразными приложениями от электроники до катализа и биотехнологий, а также отражающий результаты в области наноиндустрии.
Включен в Перечень ВАК

ВОПРОСЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ, МЕДИЦИНСКОЙ И ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОЙ ХИМИИ

Главный редактор – академик РАМН и РАСХН В. А. Быков
Научно-практический журнал, содержащий материалы, посвященные проблемам биологической, медицинской и фармацевтической химии, непосредственно связанным с развитием современной медицины.
Включен в Перечень ВАК

ДИНАМИКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Главный редактор – д. т. н., профессор А. С. Шалумов
Международный и междисциплинарный научный журнал, освещающий широкий круг вопросов по динамике социально-экономических, правовых и технических систем. Журнал рассматривает нелинейные процессы в динамических системах, раскрывает методологию исследований сложных систем, а также содержит материалы по теоретико-математическому и технологическому моделированию систем и процессов.
Включен в Перечень ВАК

"Uspekhi sovremennoi radioelektroniki" (Achievements of Modern Radioelectronics) is a scientific and technical journal about modern problems of radioelectronics and neighboring areas of science and engineering. Established in 1947