Институту магистратуры СПбГУТ 5 лет

УДК 621.391, 519.725

Методы организации адаптивного помехоустойчивого кодирования

Владимиров С. С.✉**, Остапчук Р. Л., Скакунов И. Р.**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи: *применение помехоустойчивого кодирования в каналах связи с переменными параметрами приводит к необходимости использования кодов, исправляющая способность и избыточность которых соответствуют наихудшему состоянию канала, что приводит к уменьшению скорости применяемого кода.* ***Целью работы*** *является анализ методов организации адаптивного помехоустойчивого кодирования как решения поставленной задачи. Предлагается применять коды, допускающие укорочение кодового слова сокращением числа избыточных или информационных элементов.* ***Результат:*** *сформулирована общая задача построения систем с адаптивным помехоустойчивым кодированием. Представлены блок-схема приемо-передатчика такой системы и алгоритм принятия решений о выборе помехоустойчивого кода, который может быть реализован в том числе с применением методов искусственного интеллекта. Приведены варианты помехоустойчивых кодов с укорочением кодового слова по проверочным и информационным элементам, а также представлены их вероятностные характеристики, полученные моделированием.* ***Теоретическая/Практическая значимость:*** *представленные подходы могут быть применены для построения адаптивных систем передачи данных. Для рассмотренных помехоустойчивых кодов выделены укорочения, которые позволяют использовать кодовые блоки данных с размером, кратным одному октету, что удобно для программной реализации соответствующих кодеков.*

Ключевые слова: *помехоустойчивое кодирование, адаптивная передача, эквидистантный код, код Рида — Соломона, укороченный код, двоичный симметричный канал*

Источник финансирования: *Исследование выполнено в рамках мегагранта Минобрнауки по соглашению № 075-15-2022-1137.*

Введение

Неотъемлемой частью всех современных систем связи являются различные способы защиты от ошибок передачи данных, включающие помехоустойчивое кодирование, методы и алгоритмы которого используются для обнаружения и исправления ошибок в принимаемых на стороне получателя данных. Поскольку разные методы помехоустойчивого кодирования и алгоритмы их декодирования неодинаково работают в различных каналах передачи данных, одной из важных задач является проведение соответствующих исследований как на компьютерных моделях, так и в реальных системах передачи [1–3].

Библиографическая ссылка на статью:
Владимиров С. С., Остапчук Р. Л., Скакунов И. Р. Методы организации адаптивного помехоустойчивого кодирования // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 1. С. 3. EDN: DUOERL

Reference for citation:
Vladimirov S., Ostapchuk R., Skakunov I. Methods of Organizing of Adaptive Error Correcting Coding // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 1. P. 3. EDN: DUOERL

© Владимиров С. С., Остапчук Р. Л., Скакунов И. Р., 2024

В реальных каналах связи вероятность поражения передаваемых данных ошибкой не постоянна и меняется в зависимости от состояния канала. Применяемый помехоустойчивый код при этом должен быть рассчитан на наихудшую ситуацию. Однако коды, исправляющие большое количество ошибок в кодовых комбинациях, имеют высокую избыточность, что приводит к росту размера передаваемых блоков данных и уменьшению скорости передачи полезной информации. Улучшение качества самого канала связи, приводящее к понижению вероятности ошибки в нем, является наилучшим способом борьбы с ошибками, однако это не всегда возможно.

Проблема нестабильного качества канала связи особенно характерна для радиоканалов различных беспроводных систем передачи данных. Возможным решением является использование адаптивных систем помехоустойчивого кодирования, которые позволяют варьировать применяемые помехоустойчивые коды в зависимости от состояния канала, оптимизируя избыточность кода для поддержания требуемой исправляющей способности [4–8].

Варианты организации адаптивного помехоустойчивого кодирования

Для реализации систем с адаптивным помехоустойчивым кодированием необходимо выделить критерии, которые будут влиять на выбор помехоустойчивого кода. К таким критериям можно отнести, например, информацию от демодулятора на приемном устройстве, которая позволяет оценить, насколько принятый сигнал отличается от эталонной точки сигнального созвездия используемого метода модуляции сигнала. Этот способ применяется, в частности, в системах с декодированием на основе мягких решений.

Другим критерием является наличие шумов и помех в канале связи, которые могут определяться при помощи пилот-сигналов или прослушиванием канала в интервалы времени, свободные от передачи полезных данных. Информацию о количестве ошибок в принятых кодовых блоках может определять собственно декодер помехоустойчивого кода (в зависимости от применяемых алгоритмов кодирования/декодирования). Таким образом, можно видеть, что выбор помехоустойчивого кода требует проведения анализа как состояния канала связи, так и самих принимаемых блоков данных [4, 5].

На рисунке 1 представлена блок-схема устройства приемопередатчика с указанием узлов, с которых решающее устройство собирает информацию для принятия решения о необходимости смены кода.

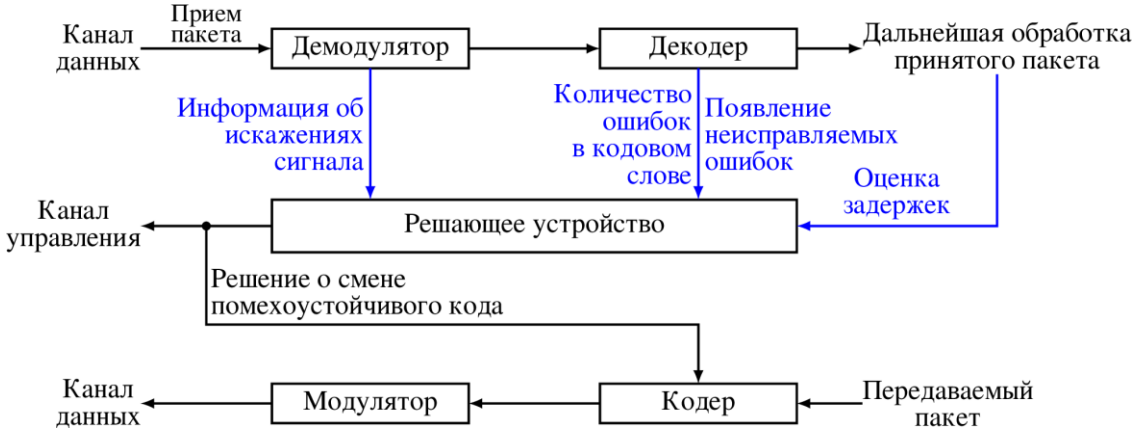

Рис. 1. Блок-схема приемопередатчика системы с адаптивным помехоустойчивым кодированием

Анализ канала и принятие решения о выборе помехоустойчивого кода может производиться как системой с заранее заданными жесткими решениями, требующей проведения предварительных исследований для конкретной системы связи, так и специализированной системой на основе искусственного интеллекта, которая может быть как функционально определенной для конкретной системы связи, так и универсальной и обучаемой для автоматической настройки под обеспечиваемую систему [4, 5, 8].

Алгоритм принятия решения о выборе помехоустойчивого кода представлен на рисунке 2.

Рис. 2. Алгоритм принятия решения о выборе помехоустойчивого кода для адаптивной системы передачи

В качестве возможной системы искусственного интеллекта, например, может быть использована рекуррентная нейронная сеть с долгой краткосрочной памятью LSTM (*аббр. от англ.* Long Short-Term Memory), структура которой представлена на рисунке 3. Необходимая для нее структура обучающих данных показана в таблице 1.

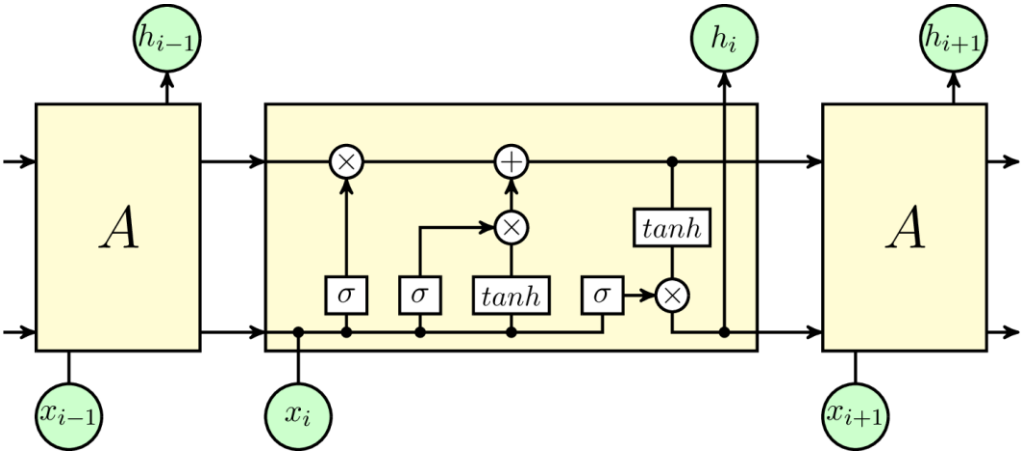

Рис. 3. Структура рекуррентной нейронной сети LSTM

Таблица 1. Пример структуры данных для обучения нейронной сети LSTM принятию решений об использовании помехоустойчивого кода

Признак 1	…	Признак *N*	Интервал	Метка
Параметр сети		Параметр сети	Временной промежуток, на котором собирались данные признаки	Помехоустойчивый код, который был применен в этот момент, или его отсутствие

Данная нейронная сеть будет принимать решения о необходимости применения определенного помехоустойчивого кода, основываясь на своем машинном представлении состояния сети.

Анализ передачи данных с точки зрения адаптации помехоустойчивого кода к состоянию канала может производиться как на оконечных приемных узлах сети, так и на промежуточных маршрутизирующих узлах в том случае, если они способны производить оценку передаваемых пакетов на наличие ошибок. При этом, поскольку все узлы в сети должны применять один и тот же помехоустойчивый код, система и протокол передачи должны иметь либо канал управления, охватывающий все эти узлы и позволяющий уведомлять их о необходимости изменения кода и согласовывать это изменение, либо специальную метку кода в передаваемых пакетах, позволяющую независимо использовать разные помехоустойчивые коды для разных пакетов. Применение одного или другого метода зависит от используемых технологий и протоколов передачи и должно определяться при разработке конкретной адаптивной системы передачи.

В качестве помехоустойчивых кодов для адаптивной системы передачи удобно использовать коды, допускающие укорочение за счет изменения абсолютной и/или относительной избыточности на основе изменения количества информационных или проверочных элементов в кодовом слове. Этот подход, в отличие от применения разнотипных кодов, позволяет использовать один и тот же алгоритм кодирования/декодирования, что упрощает разработку приемопередающих устройств системы связи.

Для примера в данной статье рассмотрим: 1) высокоизбыточные эквидистантные несистематические коды максимальной длины (КМД), в которых изменение исправляющей способности производится за счет корректировки числа проверочных элементов, и 2) циклические коды Рида – Соломона (РС), в которых укорочение производится изменением числа информационных элементов.

Пример адаптации помехоустойчивого кода корректировкой числа проверочных элементов

Адаптацию эквидистантного кода рассмотрим на примере КМД (15, 4), имеющего минимальное кодовое расстояние $d_{min} = 8$ и, соответственно, гарантированно исправляющего три ошибки. Данный код может быть укорочен вплоть до длины кодового слова $n_{укор} = 8$, формируя несистематический код (8, 4), который теряет свойства эквидистантности [9]. При укорочении кода (15, 4) можно выделить несколько кодов, представленных в таблице 2 [9].

Таблица 2. Параметры эквидистантного кода (15, 4) и его укорочений

Размер кода (n, k)	Относительная избыточность	Скорость кода	Минимальное кодовое расстояние d_{min}	Кратность гарантированно исправляемой ошибки	Количество линейно-независимых k-элементных комбинаций для декодирования
(15, 4)	0,73	0,27	8	3	840
(14, 4)	0,71	0,29	7	3	616
(12, 4)	0,67	0,33	5	2	304
(8, 4)	0,5	0,5	3	1	45

Размер информационной части кодового слова остается постоянным, а длина кодового слова меняется, в связи с чем меняются избыточность и кодовая скорость.

Для этого кода удобно применять мажоритарное декодирование по k-элементным линейно-независимым комбинациям, которое происходит по одному и тому же алгоритму для кода (15, 4) и его укорочений. В зависимости от длины кодового слова используется разное количество линейно-независимых комбинаций, как показано в таблице 2 [9, 10].

Среди представленных укорочений эквидистантного кода (15, 4) следует отметить коды (8, 4) и (12, 4), которые позволяют сформировать двухсловные кодовые блоки (16, 8) и (24, 8), соответственно. Размер информационной и проверочной частей в этих кодовых блоках кратен одному октету, что удобно для программной реализации соответствующего кодека [11, 12].

На рисунке 4 представлены вероятностные характеристики рассмотренного эквидистантного КМД (15, 4) и его укорочений ($КМД_у$), полученные моделированием в двоичном симметричном канале (ДСК).

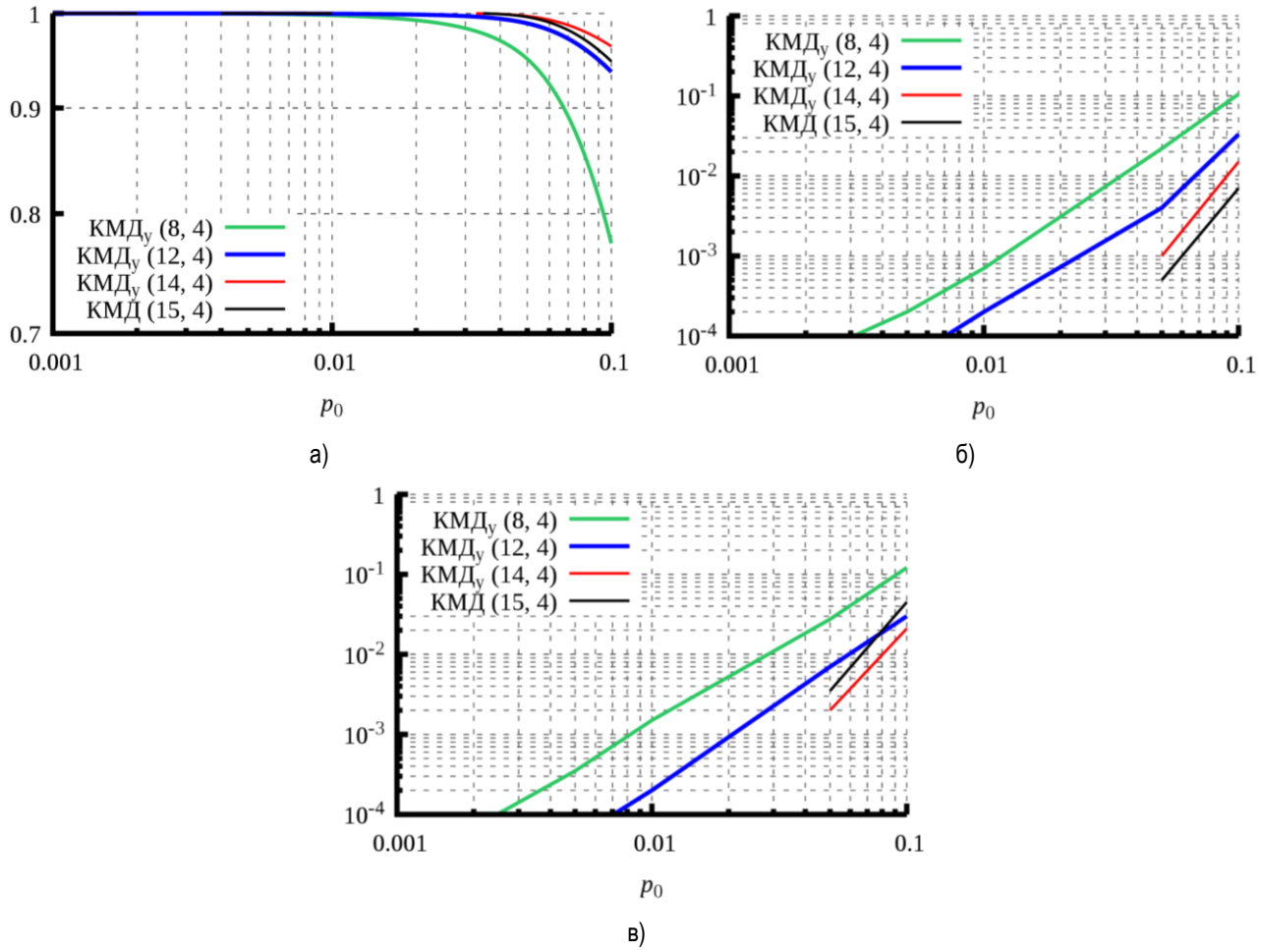

Рис. 4. Вероятностные характеристики эквидистантного кода (15, 4) и его укорочений для случая ДСК: а) вероятность правильного декодирования $P_{ПД}$; б) вероятность неправильного декодирования $P_{НД}$; в) вероятность обнаружения неисправляемой ошибки $P_{НО}$

При использовании данного кода в адаптивной схеме следует для хороших каналов использовать короткий код (8, 4), исправляющий однократную ошибку, а при ухудшении качества канала повышать избыточность. Согласно полученным вероятностным характеристикам, наилучшей исправляющей способностью обладает укороченный код (14, 4). При этом следует отметить, что применение полноценного кода (15, 4) допускает выполнение декодирования по *k*-элементным участкам, являющегося частным случаем декодирования по *k*-элементным линейно-независимым комбинациям и выполняющегося за меньшее время [13–15].

При использовании декодирования по *k*-элементным линейно-независимым комбинациям следует учитывать метод построения схемы декодера. Последовательный перебор комбинаций выполняется тем быстрее, чем меньше число этих комбинаций. Следовательно, такой способ декодирования будет выполняться быстро для кода (8, 4) и медленнее для полного кода (15, 4). При использовании параллельной обработки комбинаций время выполнения декодирования практически не зависит от количества комбинаций и длины кода [14, 15].

Пример адаптации помехоустойчивого кода корректировкой числа информационных элементов

В качестве примера кода, укорачиваемого в информационной части кодового слова, рассмотрим недвоичный систематический код РС (15, 11) над полем Галуа GF(2^4), элементы (символы) которого представляют собой 4-разрядные двоичные последовательности – элементы конечного поля, что позволяет свести данный код к двоичному коду (60, 44). Рассмотренный код способен гарантированно

исправлять любую одно- или двукратную символьную ошибку, при которой каждый ошибочный символ может содержать от одной до четырех битовых ошибок.

Укорочение кода РС (15, 11) производится за счет уменьшения количества информационных элементов вплоть до размерности (8, 4), соответствующей двоичному коду (32, 16). Размер проверочной части кодового слова остается постоянным. Кратность гарантированно исправляемой символьной ошибки при этом не изменяется и остается равной 2.

Варианты укорочения кода РС (15, 11) представлены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры систематического циклического кода РС (15, 11) и некоторых его укорочений

Размер кода (n, k)	Отображение на двоичный код	Относительная избыточность	Скорость кода
(15, 11)	(60, 44)	0,27	0,73
(14, 10)	(56, 40)	0,29	0,71
(12, 8)	(48, 32)	0,33	0,67
(8, 4)	(32, 16)	0,5	0,5

Следует отметить, что укороченные коды с четными n и k, подобно ранее рассмотренным эквидистантным кодам, позволяют осуществить удобные для программной реализации «байтовые» коды [11, 12, 16].

На рисунке 5 представлены вероятностные характеристики рассмотренного кода РС (15, 11) и его укорочений, полученные моделированием в ДСК.

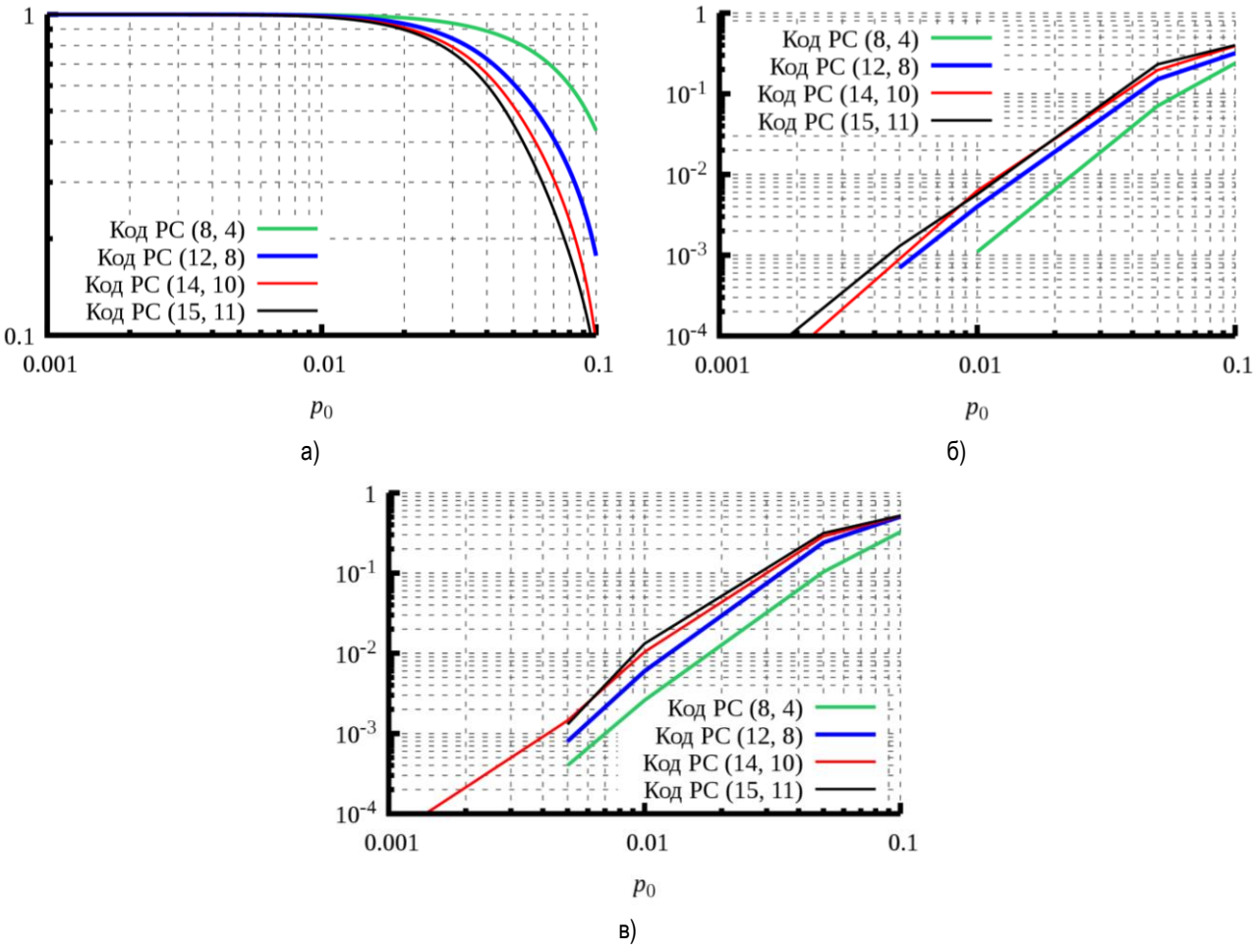

Рис. 5. Вероятностные характеристики кода РС (15, 11) и его укорочений для случая ДСК:
а) вероятность правильного декодирования $P_{ПД}$; б) вероятность неправильного декодирования $P_{НД}$;
в) вероятность обнаружения неисправляемой ошибки $P_{НО}$

При кодировании и декодировании укороченная информационная часть дополняется нулями до 11 символов, и далее кодирование и декодирование производятся как с полным кодовым словом посредством любых удобных алгоритмов кодирования и декодирования. После кодирования нули дополнения отбрасываются, и в канал передается кодовое слово укороченного кода. Чем меньше информационных символов, тем больше избыточность, но тем меньше вероятность поражения укороченного кодового слова ошибкой. При этом гарантированно известно, что при декодировании в нулевом дополнении не может быть ошибок, что является дополнительным критерием при декодировании кодового слова. Таким образом, для хороших каналов следует использовать код с наибольшей возможной длиной информационной части, а при ухудшении качества канала следует начинать постепенно уменьшать число передаваемых в кодовом слове информационных символов, пока на выходе декодера не будут достигнуты требуемые характеристики по исправлению ошибок. Время кодирования и декодирования для кода РС (15, 11) и его укорочений одинаково.

Выводы

Сформулированная в работе общая постановка задачи построения систем с адаптивным помехоустойчивым кодированием, представленные блок-схема приемопередатчика такой системы и алгоритм принятия решений о выборе помехоустойчивого кода, который может быть реализован в том числе с применением методов искусственного интеллекта, могут быть применены для построения адаптивных систем передачи данных. Для рассмотренных в работе вариантов эквидистантного помехоустойчивого кода с укорочением кодового слова по проверочным элементам и кода Рида – Соломона с укорочением кодового слова по информационным элементам представлены их вероятностные характеристики, полученные моделированием, а также выделены укорочения, которые позволяют использовать кодовые блоки данных с размером, кратным одному октету, что удобно для программной реализации соответствующих кодеков. В рамках дальнейших исследований предполагается разработать нейронную сеть согласно рассмотренным в статье подходам и провести исследование адаптивного помехоустойчивого кодирования для различных помехоустойчивых кодов.

Литература

1. Костюков А. С., Башкиров А. В., Никитин Л. Н., Бобылкин И. С., Макаров О. Ю. Помехоустойчивое кодирование в современных форматах связи // Вестник ВГТУ. 2019. Т. 15. № 2. С. 132–138. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.2.017. EDN: ZDUVTN

2. Kadel R., Islam N., Ahmed K., Halder S. J. Opportunities and Challenges for Error Correction Scheme for Wireless Body Area Network – A Survey // Journal of Sensor and Actuator Networks. 2019. Vol. 8. Iss. 1. Art. 1. DOI: 10.3390/jsan8010001

3. Fanari L., Iradier E., Bilbao I., Cabrera R., Montalban J., et al. A Survey on FEC Techniques for Industrial Wireless Communications // IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society. 2022. Vol. 3. PP. 674–699. DOI: 10.1109/OJIES.2022.3219607

4. Квашенников В. В. Двухступенчатая адаптивная коррекция параметров помехоустойчивого кода по результатам его декодирования // Вопросы радиоэлектроники. 2009. Т. 1. № 5. С. 58–66. EDN: QYXSKD

5. Квашенников В. В. Метод каскадной коррекции параметров помехоустойчивого кода и адаптивное кодирование с обучением // Вопросы радиоэлектроники. 2009. Т. 1. № 5. С. 67–74. EDN: QYXSKN

6. Нечаев Ю. Б., Плаксенко О. А. Комплексная оценка помехозащищенности многопараметрической адаптивной системы передачи информации // Радиотехника. 2013. № 3. С. 4–10. EDN: PXRINX

7. Аношко Р. Н., Квашенников В. В., Трушин С. А. Исследование и разработка способов повышения надежности КВ-радиолиний на основе адаптивного помехоустойчивого кодирования // Труды регионального конкурса проектов фундаментальных научных исследований. Вып. 21. Калуга: Калужский государственный институт развития образования, 2016. С. 271–281. EDN: XYDOOV

8. Hu H., Cheng S., Zhang X., Guo Z. LightFEC: Network Adaptive FEC with a Lightweight Deep-Learning Approach // Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia (MM'21). 2021. PP. 3592–3600. DOI: 10.1145/3474085.3475528

9. Владимиров С. С. О мажоритарном декодировании укороченного кода максимальной длины по *k* линейно-независимым элементам // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО): сборник научных статей V Международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 10–11 марта 2016 г.). СПб.: СПбГУТ, 2016. Т. 1. С. 276–281. EDN: WZILOT

10. Владимиров С. С. Эффективность мажоритарного декодирования кода максимальной длины по *k*-элементным линейно-независимым комбинациям в двоичном симметричном канале // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. Т. 3. № 4. С. 108–119. EDN: VUCAYH

11. Владимиров С. С. Сравнение вероятностных характеристик 8-разрядных кодов с прямой коррекцией ошибок // Информационные технологии и телекоммуникации. 2019. Т. 7. № 1. С. 21–30. DOI: 10.31854/2307-1303-2019-7-1-21-30. EDN: QRDLCH

12. Владимиров С. С. 8-разрядные коды с прямой коррекцией ошибок в линейном сетевом кодировании // Электросвязь. 2020. № 7. С. 51–58. DOI: 10.34832/ELSV.2020.8.7.007. EDN: AYFGRK

13. Когновицкий О. С., Кукунин Д. С. Метод декодирования эквидистантных кодов с использованием двойственного базиса поля Галуа // Труды учебных заведений связи. 2006. № 174. С. 45–52. EDN: WCTIMB

14. Когновицкий О. С. Двойственный базис и его применение в телекоммуникациях. СПб.: Линк, 2009. 423 с. EDN: QMULCD

15. Владимиров С. С. Варианты аппаратной реализации мажоритарного декодера кодов максимальной длины на основе двойственного базиса // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО): сборник научных статей VII Международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 марта 2018 г.). СПб.: СПбГУТ, 2018. Т. 1. С. 196–200. EDN: XSUFMD

16. Владимиров С. С., Гутовский А. С., Фомин А. И. Линейное сетевое кодирование с прямой коррекцией ошибок в системе беспроводного ретранслятора пакетов // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 1. С. 21–33. DOI: 10.31854/2307-1303-2022-10-1-21-33. EDN: UXKSFZ

Статья поступила 26 февраля 2024 г.
Одобрена после рецензирования 12 марта 2024 г.
Принята к публикации 18 марта 2024 г.

Информация об авторах

Владимиров Сергей Сергеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E–mail: vladimirovs@sut.ru

Остапчук Роман Леонидович – студент 1-го курса магистратуры (направление 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E–mail: predamer@yandex.ru

Скакунов Игорь Рустамович – студент 2-го курса магистратуры (направление 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E–mail: i.skakunov@mcart.ru

Methods of Organizing of Adaptive Error Correcting Coding

S. Vladimirov ✉, R. Ostapchuk, I. Skakunov

The Bonch-Bruevich St.-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Problem statement. *The use of error correcting coding in communication channels with variable parameters leads to the need to use codes whose correcting ability and redundancy correspond to the worst state of the channel, which leads to a decrease in the speed of the code used.* ***Purpose.*** *Analyze methods for organizing adaptive error correcting coding as a solution to the stated problem. It is proposed to use codes that allow shortening the code word by reducing the number of redundant or information elements.* ***Result.*** *A general formulation of the problem of constructing systems with adaptive error correcting coding is formulated. There are presented a block diagram of the transceiver of such a system and a decision-making algorithm for choosing an error correcting code, which can be implemented, including using artificial intelligence methods. Variants of error correcting codes with code word shortening by check elements and information elements are presented, and their probabilistic characteristics obtained by simulation are also presented.* ***Theoretical/ Practical relevance.*** *The presented approaches can be applied to build adaptive data transmission systems. For the considered error correcting codes, shortenings have been identified that allow the use of data code blocks with a size that is a multiple of one octet, which is convenient for software implementation of the corresponding codecs.*

Keywords: *error correcting coding, adaptive transmission, equidistant code, Reed–Solomon code, shortened code, binary symmetric channel*

Information about Authors

Vladimirov Sergey – D. Sc. of Engineering Sciences, Docent, Professor at the Department of Telecommunication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E–mail: vladimirovs@sut.ru

Ostapchuk Roman – a 1st Year Master's Student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E–mail: predamer@yandex.ru

Skakunov Igor – a 2nd Year Master's Student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E–mail: i.skakunov@mcart.ru