

## ОБЗОР СИГНАЛЬНО-КОДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПОДВОДНОЙ акустической связи

И.Малахов, мл. науч. сотр. Института проблем управления  
им. В.А.Трапезникова РАН / froztgal@gmail.com,  
Ф.Панкратов, мл. науч. сотр. ИПУ им. В.А.Трапезникова РАН /  
philippsait@gmail.com

УДК 621.391, DOI: 10.22184/2070-8963.2021.94.2.70.72

В статье проведен обзор сигнально-кодовых конструкций в подводной акустической связи. Рассмотрены основные используемые в подводной связи виды модуляции и кодирования. Приведены оценки коэффициентов битовых ошибок при использовании различных сигнально-кодовых конструкций.

### ВВЕДЕНИЕ

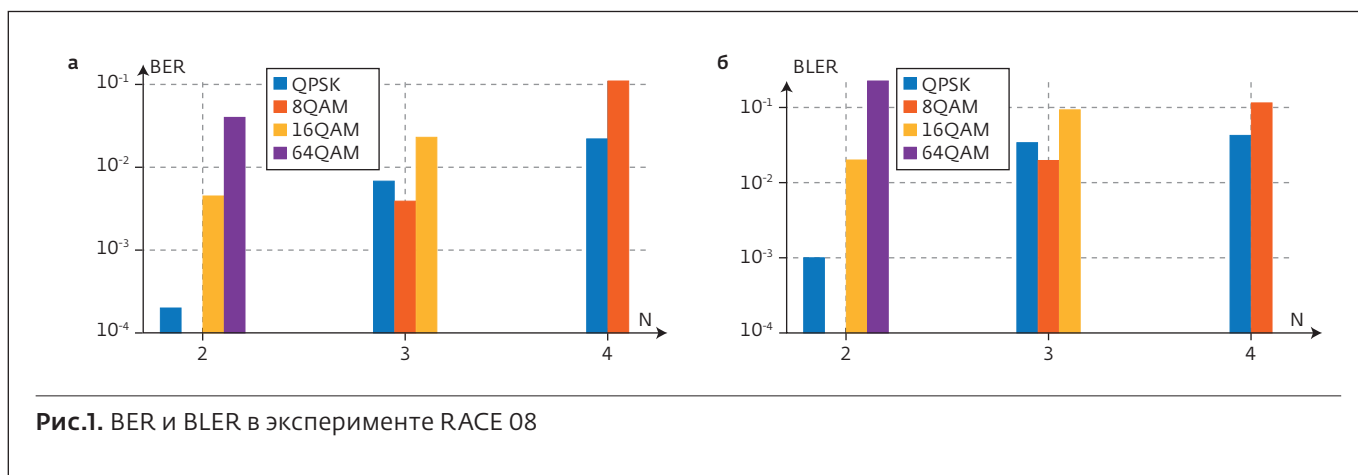
В последнее время все больший интерес к теме подводной акустической связи проявляют специалисты самых разных областей. В морях и океанах расположено большое количество различных объектов, обеспечивающих связь, добычу полезных ископаемых, защиту морских границ. Появление таких объектов привело к необходимости наблюдения и обслуживания, а также автоматизации этих процессов. Такие задачи способны решить беспилотные подводные модули (дроны), однако для обеспечения нормального функционирования сети таких дронов необходим устойчивый и надежный подводный канал связи.

Реализовать надежный высокоскоростной канал можно при помощи кабельных линий связи, однако такой подход не всегда реализуем в подводных сетях, так как большинство объектов в них являются мобильными. Использование традиционной беспроводной связи под водой также является довольно проблематичным, так как высокочастотные электромагнитные волны сильно затухают в водной среде. В подводной связи на данный момент используются

гидроакустические, оптические и низкочастотные радиосистемы связи [1]. Наиболее интересным выглядит вариант использования гидроакустической системы, так как оптические системы связи работают на относительно небольшие расстояния, хотя и обеспечивая при этом высокую скорость передачи информации, а низкочастотные радиосистемы требуют использования больших антенн и обеспечивают малую скорость передачи информации.

Несмотря на перспективность, гидроакустический канал подвержен влиянию ряда эффектов, затрудняющих надежную и высокоскоростную передачу информации по нему. К таким эффектам можно отнести многолучевое распространение сигналов за счет отражений от поверхности воды и дна, высокое затухание сигнала в канале, эффект Доплера и нестационарность канала связи из-за движения воды и дрейфа или движения приемопередатчиков.

В данной статье приведен обзор научных работ в области применения различных сигнальных кодовых конструкций, а также достигнутых в них



на основании математического моделирования и ряда экспериментов результатов.

### Модуляция и кодирование

В работе [2] была произведена оценка эффективности по коэффициенту битовых ошибок в зависимости от отношения "сигнал – смесь помехи с шумом" (BER vs SINR) таких видов модуляции, как BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM и 32QAM. В [3] исследовались характеристики модуляции при работе с различным количеством поднесущих в сигнале OFDM. Авторы [3] использовали мультиплексирование с ортогональным частотным разделением и нулевым заполнением интервала между блоками (ZF-OFDM) [4] и передачу широкополосных сигналов по методу прямой последовательности (DS-SS) [5].

В рамках исследования [3] были проведены тесты как в резервуаре с водой, так и в озере Ла Саль (Lake La Salle).

В случае использования методов цифровой фазовой модуляции BPSK и QPSK увеличение количества поднесущих в сигнале OFDM ведет к уменьшению BER. Как и ожидалось, при прочих равных вероятность битовой ошибки у BPSK ниже, чем у QPSK. В работе [3] авторы описали высокоскоростной программно-реконфигурируемый гидроакустический модем (SDAM) с возможностью адаптации в реальном времени, который изменяет вид модуляции и кодирования в зависимости от условий. Благодаря этому модем может достичь компромисса между надежностью и скоростью передачи данных. При тестировании модема авторами была достигнута скорость 104 кбит/с при BER, равном  $2 \cdot 10^{-5}$ , 208 кбит/с при BER, равном  $10^{-3}$ , и 260 кбит/с при BER, равном  $10^{-2}$ . Измерения проводились на двухсотметровом горизонтальном участке на мелководье.

В работе [6] описан эксперимент с использованием MIMO-OFDM [7]. MIMO обычно используется для увеличения скорости передачи данных по каналам ограниченной полосой пропускания. Предлагаемый в [6] приемник состоит из следующих блоков:

- блок оценки смещения несущей частоты, в котором нулевые поднесущие OFDM-сигнала используются для компенсации доплеровского сдвига частоты;
- блок оценки канала, в котором пилотные поднесущие OFDM-сигнала используются для оценки канала;
- итеративный блок демодуляции и декодирования сигналов MIMO, который, в свою очередь, состоит из двух блоков:
  - ▶ блок последовательного подавления помех и мягкого выравнивания минимального среднего квадрата ошибки (MMSE);
  - ▶ блок декодера канала, использующий код с низкой плотностью проверок на четность (LDPC [8]).

Такое решение применено для итеративного декодирования сигнала на каждой поднесущей. Авторы [6] проводили испытания с различным количеством передатчиков (от 2 до 4), количество приемников было равно 12, при использовании различных видов модуляции (QPSK, 8QAM, 16QAM, 64QAM). Максимальная достигнутая скорость в экспериментах была равна 125,7 кбит/с при использовании полосы пропускания 62,5 кГц, а максимально достигнутая спектральная эффективность была равна 3,5.

На рис.1 приведены усредненные по каналам показатели BER и коэффициента блочных ошибок (BLER), полученные в эксперименте по акустической связи (RACE 08), который проводился в заливе Наррагансетт (Род-Айленд) в марте 2008 года. Глубина воды составляла от 9 до 14 м. В эксперименте изменялось число

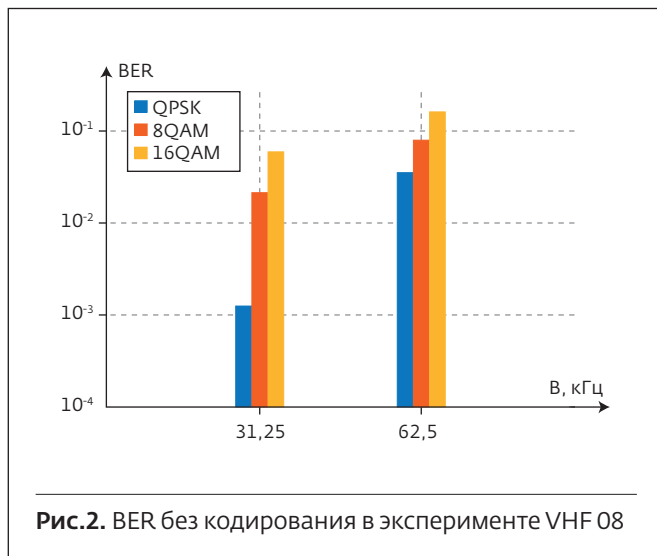


Рис.2. BER без кодирования в эксперименте VHF 08

передатчиков от двух до четырех, количество приемников было равно 12.

На рис.2 приведены усредненные по каналам показатели BER без использования кодирования, полученные в эксперименте VHF 08. Этот эксперимент проводился в заливе Баззардс Атлантического океана (Массачусетс) в апреле 2008 года. Глубина воды составляла 12 м. Дальность передачи достигала 450 м при использовании сигнала очень высокой частоты (VHF). В эксперименте изменялась ширина полосы канала, использовалось два передатчика. Показатели BER с применением кодирования в обоих случаях были равны нулю.

В [2] рассматривались сигналы без применения кодирования и при использовании кодирования с исправлением ошибок (коэффициент избыточности 1/2 и 3/4). Использование кодирования с исправлением ошибок помогает значительно уменьшить BER.

В [6] был рассмотрен небинарный код с низкой плотностью проверок на четность (NB-LDPC [8]) и коэффициентом избыточности 1/2.

В [9] были проверены сверточные коды (CC) и блочные коды Рида – Соломона (RS). Эти коды не смогли значительно улучшить коэффициент битовых ошибок (BER) на выходе декодера. По этой причине были испытаны варианты так называемых турбокодов, в частности блочные турбокоды Рида – Соломона (RS-BTC) для повышения эффективности декодирования. После проверки системы на реке Панфельд (Penfeld) во Франции (район г. Брест) были проведены испытания в Брестском заливе. Использование RS-BTC с несколькими итерациями показало значительное улучшение BER по сравнению с кодами CC и RS.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В приведенном выше обзоре было рассмотрено применение различных сигнально-кодовых конструкций в подводной среде. Согласно проведенному анализу скорость передачи данных недостаточна для передачи видеопотока приемлемого качества. Данная тема требует дальнейшего исследования с целью увеличения скоростей в подводных каналах связи.

Исследование и разработка новых перспективных сигнально-кодовых конструкций имеет важное значение для гидроакустической связи. Перспективными выглядят алгоритмы адаптивного изменения сигнально-кодовых конструкций в зависимости от состояния канала связи, так как каналы подводной связи нестационарные и условия в них постоянно меняются.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Душин С.В., Фархадов М.П., Шаврин С.С., Алёшин В.С. Тенденции и перспективы развития беспроводной подводной связи // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2020. Т. 10. № 2. С. 11-18.
2. Demirors E., Sklivanitis G., Santagati G.E., Melodia T. and Batalama S.N. A High-Rate Software-Defined Underwater Acoustic Modem With Real-Time Adaptation Capabilities // IEEE Access. 2018. Vol. 6. PP. 18602-18615.
3. Kabir W. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) // 2008 China-Japan Joint Microwave Conference, Shanghai. 2008. PP. 178-184.
4. Ghosh M. Improved Equalization For Coded, Zero-Padded OFDM (ZP-OFDM) Systems // 2007 IEEE International Conference on Communications, Glasgow. 2007. PP. 4263-4268.
5. Pursley M.B. Direct-sequence Spread-Spectrum Communications for Multipath Channels // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50. No. 3. PP. 653-661.
6. Li B. et al. MIMO-OFDM for High-Rate Underwater Acoustic Communications // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2009. Vol. 34. No. 4. PP. 634-644.
7. Stuber G.L., Barry J.R., McLaughlin S.W., Ye Li, Ingram M.A. and Pratt T.G. Broadband MIMO-OFDM Wireless Communications // Proceedings of the IEEE. 2004. Vol. 92. No. 2. PP. 271-294.
8. Huang J., Zhou S. and Willett P. // Nonbinary LDPC Coding for Multicarrier Underwater Acoustic Communication // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2008. Vol. 26. No. 9. PP. 1684-1696.
9. Trubuil J., Goalic A. and Beuzelin N. An Overview of Channel Coding for Underwater Acoustic Communications // MILCOM 2012-2012 IEEE Military Communications Conference, Orlando (FL). 2012. PP. 1-7.





# ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



**Цена 975 руб.**

М.А. БЫХОВСКИЙ

## ГИПЕРФАЗОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ – ОПТИМАЛЬНЫЙ МЕТОД ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ В ГАУССОВСКИХ КАНАЛАХ СВЯЗИ

### Рецензенты:

член-корреспондент РАН, профессор

А.В. Дворкович,

доктор технических наук, профессор

А.И. Скородумов

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 310 с.

ISBN 978-5-94836-478-0

Книга посвящена актуальным вопросам, связанным с выбором для проектируемых систем связи ансамблей сигналов и помехоустойчивых кодов, позволяющих передавать сообщения по каналам связи с максимально возможной скоростью и энергетической эффективностью, теоретический предел которых был установлен создателем теории информации, знаменитым американским ученым Клодом Шенноном.

Изложенные в книге результаты дают возможность инженерам, проектирующим системы связи, обоснованно выбирать для них метод модуляции (ансамбль сигналов, его размерность, алгоритмы модуляции и демодуляции сигналов), вид помехоустойчивого кода, его параметры (длину кода, его кодовую скорость) исходя из требуемых скорости передачи сообщений и надежности их приема. Автор предлагает новые методы определения вероятности ошибки при приеме многомерных сигналов, позволяющие обобщить теорему Шеннона о пропускной способности непрерывного канала связи на случай, когда сигналы имеют ограниченную длительность и известна вероятность ошибки, возникающей при их демодуляции. Кроме того, в книге описан новый алгоритм построения многомерного ансамбля сигналов, относящегося к классу поверхностно-сферических, который назван гиперфазовой модуляцией. В ней рассмотрены вопросы построения модулятора и оптимального демодулятора для этого вида сигналов, а также представлены алгоритмы, позволяющие на передаче по номеру передаваемого сообщения определять параметры сигнала, формируемого на выходе модулятора, а на приеме по параметрам принятого сигнала, сформированном в демодуляторе, – определять соответствующий этим параметрам номер принятого сообщения. В книге также приведены простые методы вычисления вероятности ошибки при приеме многомерных сигналов, дан анализ помехоустойчивости приема сигналов с гиперфазовой модуляцией и выполнено сравнение эффективности таких систем связи и систем, в которых применяются другие методы модуляции.

Материал книги изложен на высоком научном уровне и в то же время достаточно простым языком, представленные результаты проиллюстрированы большим количеством таблиц и графиков. Поэтому книга будет полезна не только для ученых и исследователей, но и для инженеров, занимающихся разработками систем связи, а также для студентов профильных вузов.

Книга посвящается памяти выдающихся ученых XX века К. Шеннона и В.А. Котельникова, сыгравших ключевую роль в создании теории связи – идейного фундамента созданных в XX веке и реализуемых сегодня телекоммуникационных систем. Очерки жизни этих ученых приведены в конце книги.

**Автор книги – профессор Марк Аронович Быховский, известный ученый в области телекоммуникаций. Им и с его участием написан ряд научных монографий и учебных пособий по системам связи разного назначения. Кроме того, он является автором книг по истории развития телекоммуникаций. Считаю издание данной книги очень полезным и своевременным.**

А.В. Дворкович

## Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91

По факсу: (495) 956-33-46

E-mail: [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru)

[sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ  
[www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)