

УДК 621.376

## ПРИМЕНЕНИЕ СИГНАЛОВ С ОРТОГОНАЛЬНО ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

**Б.И. Шахтарин<sup>1</sup>, А.А. Федотов<sup>1</sup>, К.А. Балахонов<sup>1</sup>, К.С. Калашников<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: fdotovaa@yandex.ru

<sup>2</sup>ООО “НПП “Цифровые решения”, Москва, Российская Федерация

*Описана специфика использования беспроводной связи в условиях ее применения в гидроакустическом канале передачи данных. Рассмотрен принцип работы одного из перспективных видов сигнально-кодовых конструкций — ортогонально частотного мультиплексирования, как способа борьбы с эффектом ревербации и межсимвольной интерференцией. Приведены результаты имитационного моделирования средства связи на основе алгоритма ортогонального частотного мультиплексирования в программном продукте MATLAB Simulink. Рассмотрено влияние зашумленности канала передачи данных на точность получаемой приемником информации.*

**Ключевые слова:** подводные системы связи, гидроакустический канал, квадратурная амплитудная модуляция, модуляция с несколькими несущими, ортогонально частотное мультиплексирование.

## THE USAGE OF OFDM-BASED SIGNALS IN UNDERWATER ACOUSTIC CHANNEL

**B.I. Shakhtarin<sup>1</sup>, A.A. Fedotov<sup>1</sup>, K.A. Balakhonov<sup>1</sup>, K.S. Kalashnikov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: fdotovaa@yandex.ru

<sup>2</sup>ООО Scientific Production Enterprise Digital Solutions,  
Moscow, Russian Federation

*The paper describes the specific usage of wireless communication in the underwater acoustic channel. It considers the operating principle of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) as one of the most promising types of signal-code structures, which is used for dealing with the effect of reverberation and intersymbol interference. The paper also presents the results of the communication system simulation based on the OFDM algorithm in the MATLAB Simulink software product. The influence of noise contamination in the data transmission channel on an accuracy of receiving data is considered.*

**Keywords:** underwater communication systems, underwater acoustic channel, quadrature amplitude modulation, multicarrier modulation, orthogonal frequency division multiplexing.

**Введение.** Применения беспроводной связи в водной среде является стремительно развивающимся направлением научной и инженерной деятельности. Передача информации между несколькими коммуницирующими устройствами, находящимися под водой, — задача, регулярно возникающая в коммерческой и военной деятельности. Наблюдается все возрастающая потребность в создании подводных сенсорных

сетей и автоматических аппаратов (роботов), используемых для мониторинга загрязнений окружающей среды, климатических изменений, проведения исследований дна, контроля нефтяных месторождений, слежения за акваторией портов и т.д.

**Подводные средства связи.** В настоящее время существует четыре типа средств связи, используемых для обмена информацией как между подводными аппаратами, так и между подводным устройством и надводными объектами [1].

1. *Проводные.* Обеспечивают надежную связь, однако развертывание таких средств связи оказывается очень дорогостоящим. Кроме того, их использование на подвижных аппаратах затруднительно, что побуждает к применению преимущественно беспроводных систем передачи данных.

2. *Оптические.* Использование оптических волн в подводных средствах связи имеет большое преимущество в виде высокой скорости передачи информации, однако высокий уровень зашумленности среды (особенно вблизи поверхности), сильное рассеивание и поглощение в мутной воде позволяет применять указанные средства связи лишь на ограниченном расстоянии.

3. *Акустические.* Средства связи на основе акустических волн рассматриваются как основной способ беспроводной передачи данных для подводных систем вследствие относительно малого поглощения таких волн окружающей средой.

4. *Радиочастотные.* Применение радиочастотных средств связи так же, как и оптических средств имеет преимущество перед акустическими в виде высокой скорости передачи данных. Ключевое ограничение использования электромагнитных волн в подводной связи — сильное подавление их вследствие поглощающей природы молекул воды, позволяющее использование радиочастотных средств с большой длиной волны, так как чем больше длина волны, тем меньшее поглощение претерпевает радиосигнал.

Основные характеристики беспроводных средств связи приведены в таблице.

Очевидно, что каждый тип средств связи имеет преимущества и недостатки, но акустические волны хорошо распространяются в морской воде на большое расстояние, что объясняет использование акустических волн во многих системах подводной беспроводной связи.

Передача сигнала в гидроакустическом канале гораздо более трудоемкая задача, чем обмен информацией в воздушной среде. Серьезное влияние имеет эффект реверберации (множественного переотражения от поверхности воды и дна водоема), вследствие которого приемник получает многолучевой сигнал с различными искажениями и

## Основные характеристики беспроводных средств связи

| Характеристика                                 | Акустические                                 | Электромагнитные                   | Оптические   |
|--|--|------------------------------------|--|
| Номинальная скорость распространения, м/с      | 1500   | $3 \cdot 10^8$                     | $3 \cdot 10^8$   |
| Ширина полосы частот, Гц                       | $300 \dots 100 \cdot 10^3$                   | $3 \dots 300 \cdot 10^9$           | $(10 \dots 150) \cdot 10^6$  |
| Эффективная дальность, м                       | Десятки километров                           | 10                                 | 10... 100  |
| Недостатки для использования в подводной среде | Малая скорость, ограничение по полосе частот | Сильное поглощение молекулами воды | Сильное рассеивание в мутной воде, высокий уровень зашумленности среды |

задержками [2–4]. Кроме того, гидроакустический канал претерпевает быстрые временные и пространственные искажения (в результате наличия слоев воды с разной температурой). Следует отметить, что скорость распространения звука под водой составляет 1500 м/с, что в сотни раз меньше скорости электромагнитных волн в воздухе. Немаловажным является эффект Доплера, проявляющийся в подводной среде в виде двух составляющих: 1) сдвиг по частоте, связанный с движением объектов; 2) сдвиг по времени, связанный с различной дисперсностью среды [5, 6].

Следовательно, поскольку гидроакустический канал отличается избирательностью по времени и частоте, высокочастотная коммуникация вызывает множество затруднений. Поэтому многие методы (например, основанные на модуляции одной несущей частоты), используемые в воздушной среде, либо не применимы под водой, либо их использование приводит к появлению эффекта межсимвольной интерференции.

Один из перспективных видов модуляции, используемый в подводной среде, — ортогональное частотное мультиплексирование (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), которое обладает высокой скоростью передачи информации в дисперсной среде [7–12].

**Принципы функционирования сигналов с ортогонально частотным разделением каналов.** Первые научные работы, предполагающие использование сигналов с несколькими несущими частотами, были предложены в 1960–70-е годы Р.В. Чангом, Б.Р. Зальцбергом, С.Б. Вайнштейном и П.М. Эбертом. Однако применение указанной технологии было ограничено в основном военными целями в связи с недостаточными возможностями технической базы.

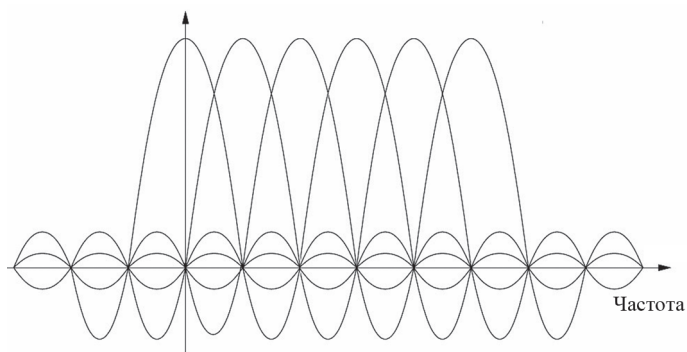
В процессе развития микроэлектроники и с появлением недорогих вычислительных средств возникла возможность создания устройств для коммерческого и гражданского применения. Функционирование таких известных технологий, как Wi-Fi, WiMAX и LTE основано именно на использовании нескольких несущих частот для передачи сигналов — ортогонального частотного мультиплексирования [13].

При передаче информации с помощью одной несущей частоты для ослабления эффекта межсимвольной интерференции необходимо, чтобы длительность отклика канала на передаваемый символ была немногим больше длительности самого символа. При достаточно высоком уровне межсимвольной интерференции это привело бы к необходимости значительно увеличить длительность передачи символа, что в свою очередь означало бы снижение скорости передачи данных [14].

Идея технологии ортогонального частотного мультиплексирования заключается в замене последовательной передачи потока данных с помощью одной несущей частоты параллельной передачей символов с помощью разделения канала на несколько поднесущих частот (ортогональных подканалов), каждая из которых формирует отдельный подпоток. В этом случае длительность каждого передаваемого символа становится значительно больше, что приводит к снижению влияния межсимвольной интерференции, которая, влияя лишь на отдельный подканал (или подканалы), не будет вызывать сильных искажений передаваемой информации. Кроме того, использование параллельной передачи символов способствует увеличению скорости передачи информации.

Основная задача — расположить несколько ортогональных подканалов так, чтобы один подканал не стал помехой другому и спектры подканалов перекрывались. При этом необходимо, чтобы ширина каждого подканала являлась достаточно узкой для минимизации искажений передаваемого сигнала и достаточно широкой для передачи информации с необходимой скоростью. Также требуется обеспечить экономичное использование полосы канала, для чего следует обеспечить достаточную плотность расположения поднесущих частот, избегая их взаимного влияния.

В качестве примера приведен спектр ортогонально частотного мультиплексирования сигнала (OFDM-сигнал, рис. 1), состоящего из шести поднесущих частот (подканалов).



**Рис. 1.** Спектр ортогонально частотного мультиплексирования сигнала

В непрерывном времени амплитуда OFDM-сигнала может быть представлена в следующем виде:

$$S(t) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} A_k e^{j\omega_k t}, \quad t \notin [0; T_c], \quad (1)$$

где  $A_k$  — комплексная амплитуда  $k$ -й поднесущей частоты;  $\omega_k$  — частота;  $N$  — число поднесущих частот;  $T_c$  — длительность информационной части символа.

Следует отметить, что при использовании OFDM-сигнала может возникнуть случайная задержка на одной поднесущей частоте относительно любой другой, что может привести к нарушению ортогональности между ними. Именно поэтому для снижения влияния межсимвольной и межканальной интерференций перед началом каждого полезного символа добавляют так называемый защитный интервал (циклический префикс), представляющий собой точную копию окончания символа. Его использование снижает скорость передачи данных, так как увеличивает длительность каждого символа, однако положительный эффект компенсирует потери от воздействия межсимвольной интерференции [14, 15].

Изменим выражение (1) с учетом добавления защитного интервала

$$S(t) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} A_k e^{j\omega_k(t-T_3)}, \quad t \notin [0; T_c + T_3], \quad (2)$$

где  $T_3$  — длительность защитного интервала.

После прохождения канала связи с аддитивным белым гауссовским шумом на входе приемника амплитуда сигнала, описанная выражением (2), выглядит так:

$$R(t) = S(t - \tau) e^{j(\Delta\omega t + \varphi_0)} + n(t). \quad (3)$$

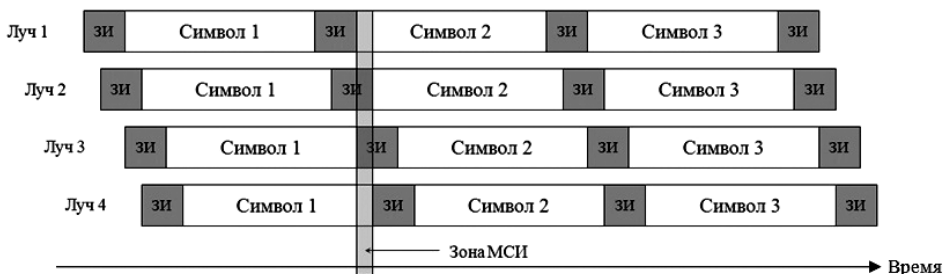
Здесь  $\tau$  — задержка между передаваемым и принимаемым сигналами;  $\Delta\omega$  — рассогласование по частоте между передатчиком и приемником;  $\varphi_0$  — начальная фаза сигнала;  $n(t)$  — шумовая составляющая сигнала  $S(t)$ .

При многолучевом распространении сигнала выражение (3) можно представить в виде [16]

$$R(t) = \sum_i \alpha_i S(t - \tau_i) e^{j(\Delta\omega_i t_i + \varphi_i)} + n(t), \quad (4)$$

где  $\alpha_i$  — амплитуда  $i$ -го луча;  $\tau_i$  — задержка между приемом и передачей  $i$ -го луча;  $\Delta\omega_i$  — рассогласование  $i$ -го луча;  $\varphi_i$  — фаза сигнала, распространяющегося вдоль  $i$ -го луча.

При многолучевом распространении сигнала происходит либо усиление, либо ослабление сигнала, так как отраженные копии исходного



**Рис. 2. Пример многолучевого распространения OFDM-сигнала:**  
 ЗИ — защитный интервал; МСИ — межсимвольная интерференция

сигнала с некоторой задержкой “накладываются” друг на друга в момент приема. Рассмотрим пример многолучевого (число лучей равно четырем) распространения OFDM-сигнала (рис. 2).

Предположим, что на вход приемника поступает сигнал, описываемый выражением (4), который раскладывается по ортогональным функциям с помощью, например, быстрого преобразования Фурье (БПФ). Поскольку БПФ является линейным преобразованием, суммарный сигнал в частотной области представляет собой суперпозицию его составляющих  $R(f) = \sum_4 A_i S_i(f)$ , где  $S_i(f)$  — представление сигнала  $S_i(t)$  в частотной области.

Примем, что приемник синхронизирован так, что задержка первого луча нулевая, тогда

$$C_1(f) = \text{БПФ}(S_1(t)). \quad (5)$$

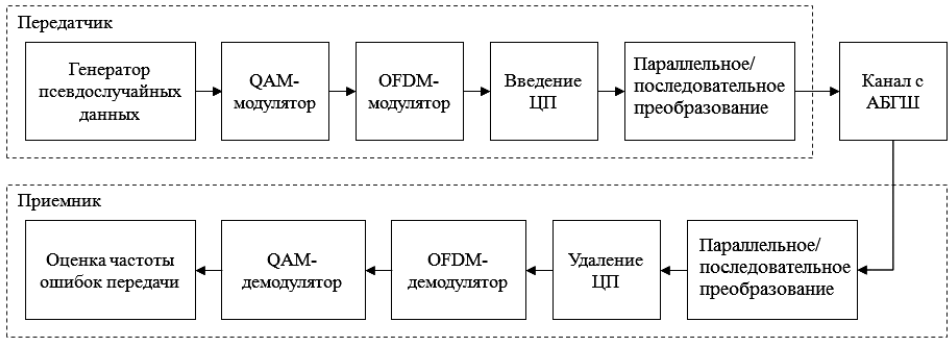
Сигналы  $S_2(t)$  и  $S_3(t)$  являются задержанными на время  $\tau_2$  и  $\tau_3$  сигналом  $S_1(t)$ , поэтому выражение (5) для них примет вид

$$C_2(f) = \text{БПФ}(S_2(t)) = \text{БПФ}(S_1(t - \tau_2)) = C_1(f)e^{-j2\pi f\tau_2}; \quad (6)$$

$$C_3(f) = \text{БПФ}(S_3(t)) = \text{БПФ}(S_1(t - \tau_3)) = C_1(f)e^{-j2\pi f\tau_3}. \quad (7)$$

Согласно выражениям (6) и (7), сигналы  $C_2(f)$  и  $C_3(f)$  представляют собой сигнал  $C_1(f)$  с некоторой фазовой добавкой.

Задержка распространения сигнала  $S_4(t)$  (четвертый луч) приводит к появлению помех, так как захват приемником происходит вне интервала ортогональности, что вызывает возникновение эффекта межсимвольной интерференции. В результате на входе приемника образуется три луча, содержащих полезную информацию, и один луч, вносящий искажения. В связи с тем, что задержка четвертого луча представляет собой достаточно большое значение, у луча следует ожидать минимальную энергию при экспоненциальном профиле задержки мощности [17]. Отметим, что отклик некоторого канала может не позволить пройти сигналам с определенной частотой (или сильно их ослабить). Такой эффект называется частотно-селективным замиранием.



**Рис. 3. Блок-схема OFDM-системы:**

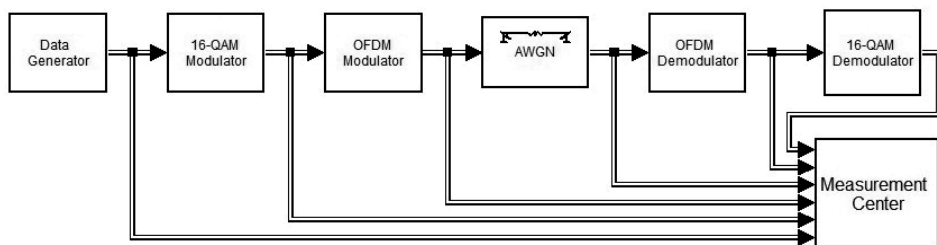
ЦП – циклический префикс; АБГШ – аддитивный белый гауссовский шум

Распространяясь в канале с замиранием, OFDM-сигнал имеет значительное преимущество перед сигналами с одной несущей частотой, поскольку пропускные характеристики канала по частоте будут влиять лишь на определенную часть поднесущих частот. Таким образом, вместо потери символа целиком произойдет утрата лишь некоторого числа битов информации, которые при правильном кодировании могут быть восстановлены. Другими словами, значение BER (Bit Error Rate) для OFDM-сигнала в подобных условиях больше, чем для QPSK/FDM [18].

**Имитационное моделирование системы связи на основе технологии ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM-системы).** Блок-схема OFDM-системы, описывающая основные преобразования сигнала, приведена на рис. 3.

Поток данных из источника (генератор псевдослучайных данных) поступает на квадратурный модулятор (QAM-модулятор), который преобразует цифровую информацию в амплитудно-модулированный сигнал. В OFDM-модуляторе происходит объединение  $N$ -го числа поднесущих частот в шумоподобный сигнал с помощью обратного преобразования Фурье. Объединение параллельных поднесущих частот в последовательный сигнал (Параллельное/последовательное преобразование) происходит после введения циклического префикса (Введение ЦП), что способствует уменьшению влияния межсимвольной интерференции.

Проходя через канал связи, сигнал претерпевает искажения, вызванные шумами. К наиболее часто используемым при моделировании каналов связи относятся: канал с аддитивным белым гауссовским шумом (прямая видимость, отсутствуют отраженные лучи сигнала); рэлеевский канал (нет прямой видимости, сигнал является отраженным); райсовский канал (есть прямая видимость, присутствуют отраженные сигналы).



**Рис. 4. Модель OFDM-системы, спроектированной в MATLAB Simulink**

В приемнике происходят действия, обратные тем, что наблюдаются в передатчике. Последовательный поток разбивается на параллельные поднесущие частоты, происходит удаление циклического префикса, прямое преобразование Фурье и демодуляция исходного сигнала.

В качестве иллюстрации работы реальной OFDM-системы рассмотрим функционирование модели, спроектированной в программном продукте MATLAB Simulink (рис. 4). Следует отметить, что в библиотеке Simulink 2014 г. присутствуют системные блоки OFDM-модулятора и демодулятора, в ранних версиях программы их реализация была возможна только лишь из набора составных частей. В настоящей статье для моделирования использована Simulink 2011 г. Параметры OFDM-системы приведены ниже:

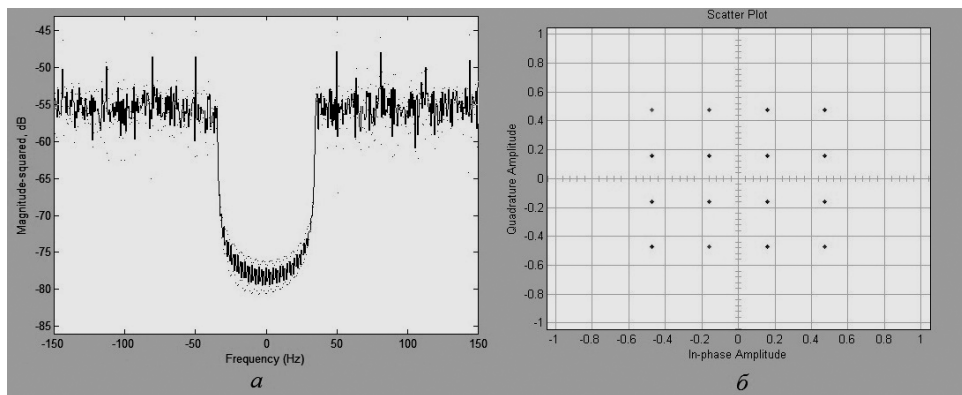
|  |          |
|--|----------|
| Длительность моделирования, с .....          | 100      |
| Скорость передачи, Кбит/с .....              | 16       |
| Число информационных поднесущих частот ..... | 192      |
| Защитный интервал, с .....                   | 0,0039   |
| Общее число поднесущих частот .....          | 256      |
| Вид модуляции .....                          | M-QAM    |
| Отношение $E_b/N_0$ канала, дБ .....         | [0, 100] |

Спектр сигнала на выходе приемника и сигнальное созвездие 16-QAM-модулятора представлены на рис. 5, вещественная и мнимая части комплексной огибающей OFDM-сигнала — на рис. 6 (сигнал имеет шумоподобную форму).

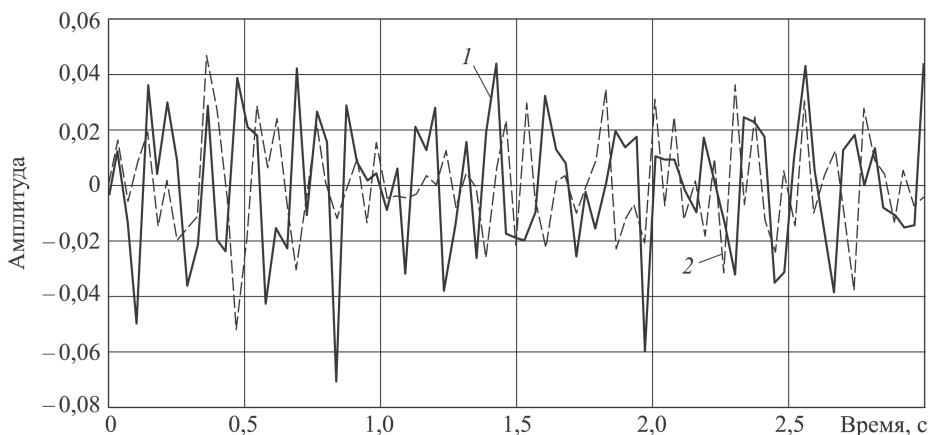
Возникающие искажения спектра принимаемого сигнала и размытие точек сигнального созвездия на входе приемника, вызванное влиянием шумов в канале связи, показано на рис. 7. Число и доля некорректно принятых битов в общем потоке данных BER (Bit Error Rate) рассчитывается в блоке Measurement center.

Интересная задача — исследование изменения  $BER$  в зависимости от используемого типа QAM-модуляции и интенсивности шумов в канале, а также типа канала (AWGN, Rayleigh Fading Channel или Rician Fading Channel).





**Рис. 5. Спектр сигнала на выходе приемника (а) и сигнальное созвездие 16-QAM-модулятора (б)**

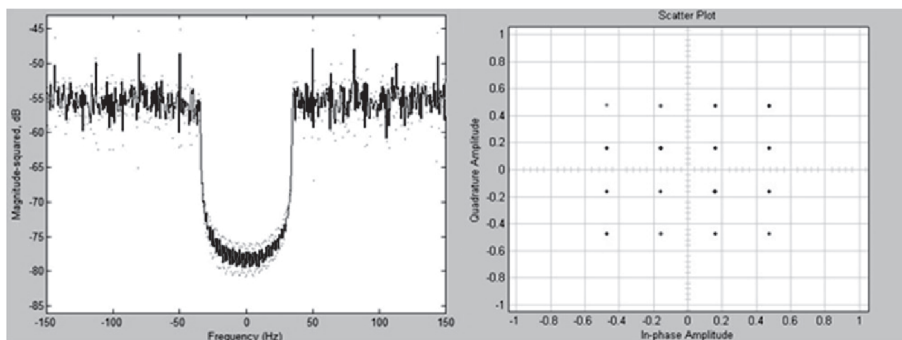


**Рис. 6. Вещественная (1) и мнимая (2) части OFDM-сигнала**

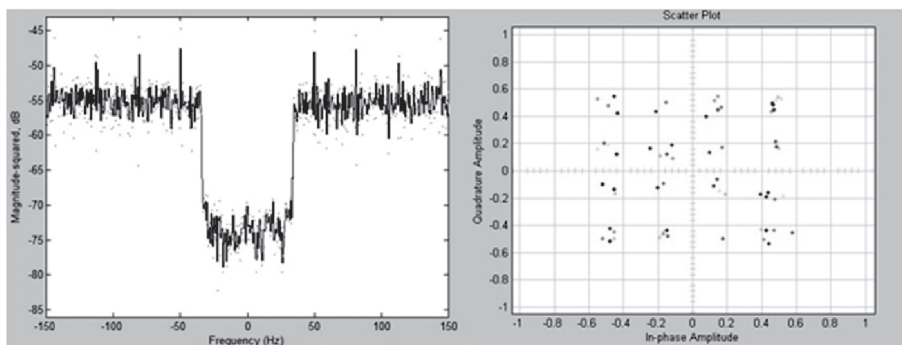
Исследование рэлеевского (Rayleigh Fading Channel) или райсовского (Rician Fading Channel) каналов с частотно селективным замиранием, позволяющее воспроизвести эффект многолучевого распространения, требует значительного усложнения модели, так как в рассматриваемом случае необходимо учитывать рассогласование по фазе поступающих на приемник сигнала отраженных лучей. Таким образом, для правильной синхронизации принимаемого сигнала требуется введение так называемых пилотных (опорных) сигналов с известной комплексной амплитудой, относительно которых происходит корреляционный поиск повторяющихся последовательностей в символах.

Для простоты используем канал с белым гауссовским шумом. Результаты моделирования представлены на рис. 8.

Результаты исследования демонстрируют, что с возрастанием числа бит, передаваемых одной несущей частотой, увеличивается значение  $BER$ , что свидетельствует об увеличении числа ошибок относительно общего числа переданных бит полезной информации. Согласно



*a*



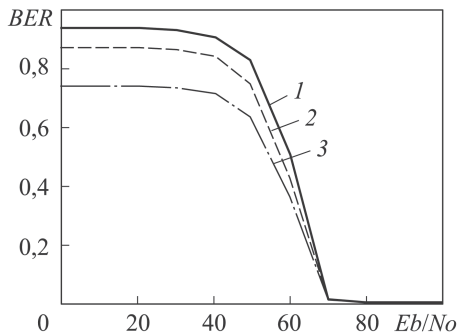
*б*

**Рис. 7.** Спектр сигнала на выходе QAM-демодулятора и сигнальное созвездие при  $SNR = 60$  дБ (*a*) и  $SNR = 29$  дБ (*б*)

зависимостям, приведенным на рис. 8, значение  $BER$  для 16-QAM-модулятора выше, чем для 4-QAM-модулятора. Очевидна зависимость  $BER$  от отношения  $E_b/N_0$ , при котором с увеличением мощности сигнала уменьшается число неверно принятых битов данных.

**Закключение.** Рассмотрены различные подводные средства связи, их достоинства и недостатки. Наиболее универсальным средством связи для подводной коммуникации является акустический канал, который имеет относительно невысокую по сравнению с остальными средствами связи скорость передачи данных. Однако звуковые волны способны распространяться на большие расстояния.

Основная проблема использования акустического канала связи — эффект многолучевого распространения сигнала. Системы на основе OFDM-сигналов позволяют уменьшить влияние искажений, так как



**Рис. 8.** Зависимость  $BER$  от отношения  $E_b/N_0$  для 4-QAM-модулятора (1), 8-QAM-модулятора (2) и 16-QAM-модулятора (3)

в процессе распространения сигнала теряется лишь некоторая часть полезной информации.

Проведено моделирование OFDM-системы в программном продукте MATLAB Simulink. Результаты показали, что использование алгоритма с более высоким значением разряда QAM-модулятора накладывает дополнительные требования к значению  $E_b/N_0$ , так как является более чувствительным к уровню шума в канале, хотя и позволяет передавать информацию с более высокой скоростью.

Дальнейшее исследование будет направлено на построение OFDM-системы, способной функционировать в рэлеевском и райсовском каналах с частотным замиранием сигнала. Кроме того, планируется рассмотреть влияние дополнительных техник кодирования (использование турбо-кода, кода Рида – Соломона и др.) сигнала для уменьшения влияния шумовых искажений.

*Работа выполнена по проекту № 1776 по заданию № 8.1776.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Минобрнауки России.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zhou S., Wang Z. OFDM for underwater acoustic communications. Wiley, 2014. 410 p.
2. Akyildiz I.F., Pompili D., Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. AD HOC NETWORKS, 2005. P. 257–279.
3. Speth M., Fechtel S., Fock G., Meyr H. Optimum receiver design for OFDM-based broadband transmission. II. A case study // IEEE Transactions on Communications. 2001. Vol. 49 (4). P. 571–578.
4. Stojanovic M., Proakis J.G., Catipovic J. Analysis of the impact of channel estimation errors on the performance of a decision-feedback equalizer in fading multipath channels // IEEE Transactions on Communications. 1995. Vol. 43 (234). P. 877–886.
5. Palou G., Stojanovic M. Underwater Acoustic MIMO OFDM: An experimental analysis. Massachusetts Institute of Technology, 2009. 74 p.
6. Xavier J., Moura A. Modulation Analysis for an Underwater Communication Channel. University of Porto, 2012. 102 p.
7. Kim B.C., Lu I.T. Parameter study of OFDM underwater communications system // in Proc. of MTS/IEEE Oceans, Providence, Rhode Island, Sept. 2000. P. 11–14.
8. Chitre M., Ong S.H., Potter J. Performance of coded OFDM in very shallow water channels and snapping shrimp noise // In Proc. of MTS/IEEE OCEANS. 2005. P. 996–1001.
9. Gendron P.J. Orthogonal frequency division multiplexing with on-off-keying: Noncoherent performance bounds, receiver design and experimental results // U.S. Navy Journal of Underwater Acoustics. 2006. Vol. 56. No. 2. P. 267–300.
10. Stojanovic M. Low complexity OFDM detector for underwater channels // In Proc. of MTS/IEEE OCEANS, Boston, MA, Sept. 2006. P. 18–21.
11. Li B., Zhou S., Stojanovic M., Freitag L., Willett P. Non-uniform Doppler compensation for zero-padded OFDM over fast-varying underwater acoustic channels // In Proc. of MTS/IEEE OCEANS, Aberdeen, Scotland, June 2007.

12. Li B., Zhou S., Huang J., Willet P. Scalable OFDM design for underwater acoustic communications. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Connecticut. ICASSP. 2008. P. 5304–5307.
13. Prasad R. OFDM for Wireless Communication Systems. Artceh House Publ., 2003. 280 p.
14. Варгаузин В.А., Цикин И.Б. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 347 с.
15. Прокис Д. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
16. Калашиников К.С., Шахтарин Б.И. Синхронизация OFDM-сигналов во временной и частотной областях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана Сер. Приборостроение. 2011. № 1. С. 18–27.
17. Ворошилин Е.П. Моделирование процессов и явлений в системах связи. Томск: ТУСУР, 2012. 86 с.
18. Langton C. Orthogonal Frequency Division Multiplexing. Intuitive Guide to Principles of Communication. Tutorial 22. 2013. 22 p. URL: <http://complextoreal.com/wp-content/uploads/2013/01/ofdm2.pdf> (дата обращения: 15.10.2014).

## REFERENCES

- [1] Zhou S., Wang Z. OFDM for underwater acoustic communications. Wiley, 2014. 410 p.
- [2] Akyildiz I.F., Pompili D., Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. *AD HOC NETWORKS*, 2005, pp. 257–279.
- [3] Speth M., Fechtel S., Fock G., Meyr H. Optimum receiver design for OFDM-based broadband transmission. II. A case study. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, vol. 49 (4), pp. 571–578.
- [4] Stojanovic M., Proakis J.G., Catipovic J. Analysis of the impact of channel estimation errors on the performance of a decision-feedback equalizer in fading multipath channels. *IEEE Transactions on Communications*, 1995, vol. 43 (234), pp. 877–886.
- [5] Palou G., Stojanovic M. Underwater Acoustic MIMO OFDM: An experimental analysis. Massachusetts Institute of Technology, 2009. 74 p.
- [6] Xavier J., Moura A. Modulation Analysis for an Underwater Communication Channel. University of Porto, 2012. 102 p.
- [7] Kim B.C., Lu I.T. Parameter study of OFDM underwater communications system. *in Proc. of MTS/IEEE Oceans, Providence, Rhode Island*, Sept. 2000, pp. 11–14.
- [8] Chitre M., Ong S.H., Potter J. Performance of coded OFDM in very shallow water channels and snapping shrimp noise. *In Proc. of MTS/IEEE OCEANS*, 2005, pp. 996–1001.
- [9] Gendron P.J. Orthogonal frequency division multiplexing with on-off-keying: Noncoherent performance bounds, receiver design and experimental results. *U.S. Navy Journal of Underwater Acoustics*, 2006, vol. 56, no. 2, pp. 267–300.
- [10] Stojanovic M. Low complexity OFDM detector for underwater channels. *In Proc. of MTS/IEEE OCEANS*, Boston, MA, Sept. 2006, pp. 18–21.
- [11] Li B., Zhou S., Stojanovic M., Freitag L., Willett P. Non-uniform Doppler compensation for zero-padded OFDM over fast-varying underwater acoustic channels. *In Proc. of MTS/IEEE OCEANS*, Aberdeen, Scotland, June 2007.
- [12] Li B., Zhou S., Huang J., Willet P. Scalable OFDM design for underwater acoustic communications. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Connecticut. ICASSP, 2008, pp. 5304–5307.
- [13] Prasad R. OFDM for Wireless Communication Systems. Artceh House Publ., 2003. 280 p.

- [14] Vargauzin V.A., Tsikin I.B. Metody povysheniya energeticheskoy i spektral'noy effektivnosti tsifrovoy radiosvyazi [Methods of improving power and spectral efficiency of digital radiocommunications]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2013. 347 p.
- [15] Prokis D. Tsifrovaya svyaz' [Digital communications]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2000. 800 p.
- [16] Kalashnikov K.S., Shakhtarin B.I. The Time and Frequency Synchronization of OFDM Signals. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2011, no. 1, pp. 18–27 (in Russ.).
- [17] Voroshilin E.P. Modelirovanie protsessov i yavleniy v sistemakh svyazi [Process and phenomenon simulation in communications systems]. Tomsk, TUSUR Publ., 2012. 86 p.
- [18] Langton C. Orthogonal Frequency Division Multiplexing. Intuitive Guide to Principles of Communication. Tutorial 22. 2013. 22 p. URL: <http://complex-oreal.com/wp-content/uploads/2013/01/ofdm2.pdf> (accessed: 15.10.2014).

Статья поступила в редакцию 26.01.2015

Шахтарин Борис Ильич — д-р техн. наук, профессор кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Shakhtarin B.I. — D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Autonomous Information and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University.  
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Федотов Александр Александрович — аспирант кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Fedotov A.A. — Ph.D. student, Department of Autonomous Information and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University.  
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Балахонов Кирилл Андреевич — аспирант кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Balakhonov K.A. — Ph.D. student, Department of Autonomous Information and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University.  
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Калашников Константин Сергеевич — канд. техн. наук, инженер ООО “НПП “Цифровые решения””.  
ООО “НПП “Цифровые решения”, Российская Федерация, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 15.

Kalashnikov K.S. — Ph.D. (Eng.), engineer, ООО Scientific Production Enterprise Digital Solution.  
ООО Scientific Production Enterprise Digital Solution, Krasnokazarmennaya ul. 15, Moscow, 111250 Russian Federation.

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Шахтарин Б.И., Федотов А.А., Балахонов К.А., Калашников К.С. Применение сигналов с ортогонально частотным разделением в гидроакустическом канале // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 5. С. 30–43.

**Please cite this article in English as:**

Shakhtarin B.I., Fedotov A.A., Balakhonov K.A., Kalashnikov K.S. The usage of OFDM-based signals in underwater acoustic channel. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2015, no. 5, pp. 30–43.

---

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет книга**

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Изложены принципы действия, характеристики и примеры построения информационных устройств робототехнических систем. Даны основы расчета кинестетических, локационных, визуальных и тактильных датчиков; показаны способы их сопряжения с системами управления роботов. Приведены алгоритмы обработки сенсорной информации. Рассмотрены варианты реализации различных сенсорных функций в бионических системах.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, читаемому в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности “Роботы и робототехнические системы”, а также по специальностям, связанным с разработкой информационного обеспечения технических систем. Представляет интерес для аспирантов и специалистов, занимающихся созданием и применением средств робототехники.

