

## Раздел IV. Радиотехника, телекоммуникации и акустика

УДК 621.396

**В.П. Федосов, А.А. Легин, А.В. Ломакина**

### **АЛГОРИТМЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ТЕХНОЛОГИИ MIMO-OFDM, ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ**

*На сегодняшний день активное развитие техники и появление мощных инструментов цифровой обработки сигналов привело к тому, что беспроводные технологии связи получают все более широкое распространение в различных областях. В связи с растущей популярностью беспроводных технологий к ним повышаются требования в отношении увеличения пропускной способности канала и уменьшения вероятности появления ошибок в передаваемом сообщении. Применение беспроводных технологий представляет интерес применительно не только к радиосвязи, но и для осуществления беспроводной акустической связи. Решение этой задачи может обеспечить применение методов и алгоритмов обработки пространственно-временных сигналов. Это актуально для обеспечения связи надводных объектов с глубоководными аппаратами, которые применяются для проведения научно-исследовательских океанологических исследований, спасательных работ, погружение к затонувшим лодкам и т.д. Наличие беспроводного канала связи позволяет передавать исследовательские данные или видеоизображение с видеокамер, расположенных на глубоководном аппарате. Передача видеоизображения требует обеспечения высоких скоростей передачи данных, что довольно сложно осуществить в условиях затухания, переотражения и искажения полезного сигнала в канале связи. Преодолеть ограничения увеличения пропускной способности и обеспечить работу беспроводного канала в условиях многопутного распространения сигналов можно путем применения технологии MIMO и OFDM. Представлены алгоритмы беспроводной передачи данных для подводного акустического канала связи, имеющие высокую спектральную эффективность. Для их анализа проведено моделирование вероятности битовой ошибки в зависимости от заданного отношения сигнал/шум (ОСШ). Так, для полосы сигнала 64 кГц вероятность битовой ошибки при ОСШ = 10 дБ равна  $10^{-3}$ . Результаты исследования показали, что технология MIMO OFDM является весьма привлекательным решением для обеспечения высокоскоростной передачи данных в подводном акустическом канале.*

*Антенная решетка (АР); MIMO (Multiple Input Multiple Output); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); акустическая связь; беспроводная связь; пропускная способность; вероятность битовой ошибки (BER).*

**V.P. Fedosov, A.A. Legin, A.V. Lomakina**

### **THE ALGORITHM IS BASED ON MIMO-OFDM TECHNOLOGY FOR THE REALIZATION OF DIGITAL HYDROACOUSTIC COMMUNICATION CHANNEL**

*To date, the active development of technology and the appearance of powerful instruments for digital signal processing has resulted to the fact that wireless communication technologies are becoming more widely used in various fields. Due to the growing popularity of wireless technologies to them increased requirements for increasing bandwidth and reducing the likelihood of errors in the transmitted message. Solve these problems allows the use of processing techniques*

*space-time signals. The purpose of this article is to find methods and algorithms for solving the problem of increasing capacity and maintenance of wireless speaker channel in a multipath propagation, using technologies such as MIMO and OFDM. MIMO technology is used for underwater acoustic communications recently to increase the data rate for channels with bandwidth – limited. In this article we will discuss methods of implementing the acoustic communication channel based on the spatio-temporal signals where spatial multiplexing by using technology OFDM. The article presents algorithms for wireless data communication for underwater acoustic communications channel which have high spectral efficiency. For their analyzing is simulated bit error rate depending on the given signal / noise ratio (SNR). Thus, for a 64 kHz bandwidth signal bit-error probability when SNR = 10 dB is equal to  $10^{-3}$ . The simulation results show that MIMO OFDM is a promising technology for high-speed data transmission in underwater acoustic channels.*

*Antenna array (AA); MIMO (Multiple Input Multiple Output); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); acoustic communication; wireless communication; capacity; Bit Error Rate (BER).*

**Постановка задачи.** Целью проведенного исследования является поиск методов и алгоритмов для решения проблемы увеличения спектральной эффективности и обеспечения работы беспроводного акустического канала в условиях многопутного распространения сигналов, используя такие технологии как MIMO и OFDM [1–5]. Исследуется возможность осуществления передачи видеоизображений с камер, расположенных на глубоководном аппарате.

Передача видеоизображения в реальном масштабе времени требует высоких скоростей передачи данных, что сложно осуществить обычными системами связи в подводном канале. Это связано с тем, что увеличение пропускной способности требует использования высоких частот для передачи данных. В статье выполнена оценка затухания сигналов высоких частот в подводной среде с удалением от источника сигналов, что ограничивает дальность канала связи. Моделируемые в работе сигналы подвержены переотражениям от дна, поверхности и других подводных объектов, которые приводят к замираниям принятого сигнала.

**Методы решения.** В таких условиях метод MIMO позволяет увеличить пропускную способность без расширения спектра сигнала. При этом пропускная способность увеличивается за счет одновременной передачи различных потоков данных через различные элементы антенной решетки (АР), при этом сигналы, излучаемые каждым из элементов, занимают одну полосу частот [5-7, 19-20]. Хотя эти сигналы и распространяются в одной среде, за счет пространственной обработки они могут быть разделены приемником, который также использует АР.

Технология OFDM является сочетанием модуляции и мультиплексирования и повышает устойчивость канала связи против частотно-избирательных замираний, вызванных многопутным распространением сигналов. Сигнал OFDM представляет собой множество ортогональных поднесущих, которые входят в состав одного основного сигнала, при этом каждая поднесущая модулируется своим битовым потоком. При прохождении канала связи отдельные поднесущие OFDM сигнала могут быть искажены, что приведет к потере информационных битов, входящих в состав передаваемого пакета, однако применение технологии помехоустойчивого кодирования на передатчике позволяет их восстановить на приемной стороне [3–5].

Обычно, система с многопутным распространением может вызвать замирания сигнала в канале, которое рассматривается как вредный фактор, относящийся к беспроводной связи [9]. Тем не менее, исследования показывают, что в системе MIMO, при наличии многопутности может быть в некоторых случаях благоприятным явлением для беспроводной связи. В передатчике последовательный поток символов данных после необходимой пространственно-временной обработки отправляется на элементы передающей АР, а затем передаются на приемник. В приемнике принятые символы данных извлекают с помощью различных пространственно-

временных технологий обнаружения. Для того чтобы гарантировать эффективное разделение различных потоков данных, элементы AP должны быть разнесены на достаточном расстоянии (обычно больше половины длины волны несущей) для того, чтобы предотвратить слишком высокую корреляцию между принимаемыми сигналами на различных антеннах [11]. Рис. 1 иллюстрирует систему MIMO.

Как показано на рис. 1 [10], сигналы передаются от антенн, а после распространяются по беспроводному каналу, например, в условиях городской застройки, и принимаются в приемных антеннах. Каждая приемная антенна получает суперпозицию сигналов от передающей антенны.

OFDM является модуляцией с множеством поднесущих. В OFDM канал делится на множество ортогональных подканалов и высокоскоростные сигналы передачи данных преобразуется в параллельные низкоскоростные подпотоки [12–14, 18]. Чтобы быть переданными, эти подпотоки модулируются в каждом подканале.

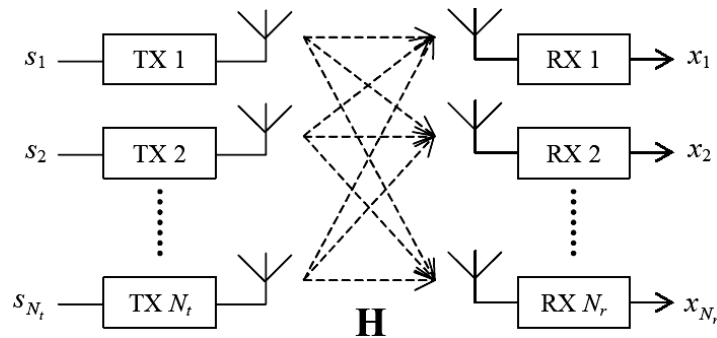


Рис. 1. Схематическое представление системы MIMO

OFDM является эффективным средством в борьбе против частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции (ISI) [8]. Используя в качестве подканалов ортогональные поднесущие можно значительно улучшить спектральную эффективность. Как правило, в OFDM добавляется защитный интервал определенной длины (GI), что позволяет бороться с межсимвольной интерференцией, в случае когда длительность GI больше максимального разброса задержек многопутного радиоканала. Обычно защитный интервал заполнен циклическим префиксом (CP) [9, 15].

Основное преимущество технологии OFDM заключается в том, что Быстрое Преобразование Фурье (БПФ) / Обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ) может быть использовано для осуществления модуляции и демодуляции ортогональных подканалов [23]. Для работы N-точечного БПФ, нужно  $N \times \log(N)$  комплексных умножений, вместо  $N^2$ , которое необходимо будет при прямом осуществлении.

**Модель канала.** В то время как сигнал в канале распространения проходит от передающей антенны к приемной антенне, характеристики сигнала меняются из-за следующих факторов: 1) расстояние между двумя антеннами, 2) пути принятых сигналов и 3) окружающая среда (отражения от различных поверхностей и дна) на всем пути [16]. Влияние канала распространения на прохождение сигнала может быть охарактеризовано с помощью передаточной характеристики.

Для MIMO-OFDM в частотной области принятый сигнал  $\mathbf{y}$  и передаваемый сигнал  $\mathbf{x}$  может быть выражен как [1]

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n},$$

где  $\mathbf{H}$  – матрица передачи канала;  $\mathbf{y}$  –  $N_R \times 1$  вектор принятого сигнала;  $\mathbf{x}$  –  $N_T \times 1$  вектор переданного сигнала и  $\mathbf{n}$  –  $N_R \times 1$  вектор шумов приемника.

Уравнение, представленное ниже, описывает систему ММО с  $N_T$  передающими антеннами и  $N_R$  приемными:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{N_R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & & h_{2N_T} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ h_{N_R1} & h_{N_R2} & \dots & h_{N_RN_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N_T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{N_R} \end{bmatrix},$$

где элементы  $N_R \times N_T$  канальной матрицы  $\mathbf{H}$  в позициях  $(i, j)$  обозначают канал от  $j$ -го передатчика к  $i$ -ой приемной антенне [17].

Пространственная корреляция всегда проявляется на практике, поскольку каналы между различными антеннами часто коррелированы. В идеальных системах радиосвязи путь между передатчиком и приемником (LoS) называют путем прямой видимости. Наличие пространственной корреляции подтверждено экспериментально [11, 14]. Пространственная корреляция снижает производительность системы ММО. Тогда выгода от наличия независимых каналов уменьшается. В работе [11] предполагается, что корреляционные матрицы для передатчика и приемника могут быть разделены. В литературе [14] вводится модель Кронекера для моделирования пространственной корреляции, которая широко используется. В модели Кронекера корреляция между передающими антеннами и приемными антеннами предполагается независимой и раздельной [14]. Модель корреляции канала Кронекера может быть представлена в виде

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_{N_R}^{1/2} \mathbf{H}_\omega (\mathbf{R}_{N_T}^{1/2})^T,$$

где  $\mathbf{R}_{N_R}$  и  $\mathbf{R}_{N_T}$  – корреляционные матрицы приемных и передающих антенн, тогда как  $\mathbf{H}_\omega$  представляет собой независимый одинаково распределенный (i.i.d.) канал Рэля с замираниями (при отсутствии прямого пути распространения).

**Результаты моделирования.** Для обеспечения высоких скоростей передачи необходимо, чтобы частота несущей и ширина спектра полезного сигнала были как можно больше. Однако, затухание акустических сигналов в водной среде значительно увеличивается, что приведет к ограничению дальности действия систем связи. В связи с этим необходимо найти компромисс между дальностью действия системы связи и используемого частотного диапазона [25–28].

Для начала необходимо рассмотреть, как изменяется коэффициент затухания акустических колебаний в зависимости от частоты. Диапазон рассматриваемых частот выберем от 10 до 300 кГц. Рассмотрение диапазона частот ниже 10 кГц не целесообразно в связи с тем, что обеспечить высокие скорости передачи данных невозможно, а частоты выше 300 кГц имеют сильное затуханием и тем самым ограничивают дальность действия.

Энергетической характеристикой звуковой волны является интенсивность звука. Это физическая величина, которая характеризует мощность, переносимую звуковой волной в направлении источника.

Интенсивность акустического поля на расстоянии  $r$  от источника определяется следующим соотношением

$$I_2 = I_1 e^{-\alpha r},$$

где  $I_1$  – интенсивность акустического поля источника;  $I_2$  – интенсивность акустического поля на расстоянии  $r$  от источника;  $\alpha$  – затухание акустических сигналов в среде.

Затухание акустических волн зависит от различных параметров, таких как: температура, соленость, гидростатическое давление, частота сигнала. Исследования зависимости затухания проводились многими учеными, которые позволили определить эмпирические формулы которые позволяют рассчитывать зависимость коэффициента затухания от параметров среды распространения (в нашем случае, воды).

Одними из наиболее известных формул являются формулы Торпа и Шулькина-Марша [22]. Формула Торпа наиболее точно описывает зависимость коэффициента затухания от частоты для значения частот менее 5 кГц и имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{0,11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 3 \cdot 10^{-4} f^2, \quad (1)$$

где  $f$  – частота акустического сигнала.

Для нашего диапазона частот больше подходит формула Шулькина-Марша, которая позволяет определить коэффициент затухания не только от частоты, но и от температуры, солёности воды и гидростатического давления. Формула для расчёта имеет вид (без учёта гидростатического давления)

$$\alpha = \left( A \frac{Sf_T f^2}{f_T^2 + f^2} + B \frac{f^2}{f_T^2} \right), \quad (2)$$

где  $f$  – частота акустического сигнала в кГц;  $f_T = 21,9 \cdot 10^{(6-1520(T+27,3))}$  – частота релаксации в кГц;  $T$  – температура С;  $A = 2,05 \cdot 10^{-2}$ ,  $B = 2,95 \cdot 10^{-2}$  – эмпирические коэффициенты;  $S$  – солёность воды в %.

Рассмотрим зависимость коэффициента затухания от частоты (рис. 2), при значении температуры воды  $10^\circ\text{C}$  (в качестве водной среды выберем морскую воду, для нее солёность равна 35 %).

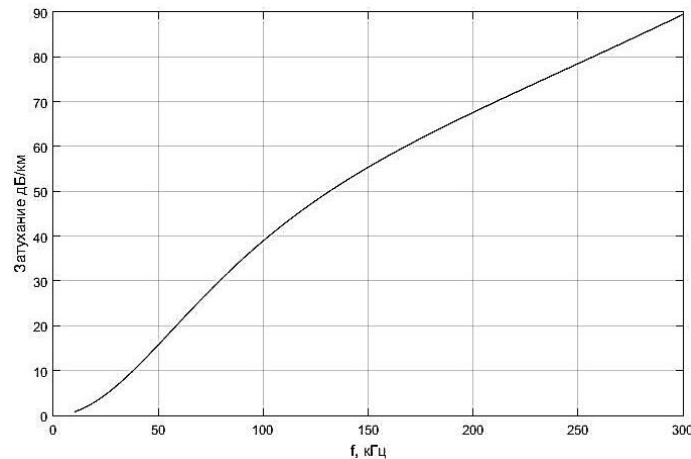


Рис. 2. Зависимость коэффициента затухания от частоты при температуре  $T = 10^\circ\text{C}$

На рис. 2 показан график зависимости коэффициента затухания от частоты при различных значениях температуры морской воды.

Изменение глубины приводит к увеличению гидростатического давления, которое в свою очередь приводит к уменьшению затухания. Формула Шулькина-Марша с учётом влияния гидростатического давления имеет следующий вид [23]

$$\alpha = \left( A \frac{Sf_T f^2}{f_T^2 + f^2} + B \frac{f^2}{f_T^2} \right) (1 - 6,54 \cdot 10^{-4} p), \quad (3)$$

где  $p$  – гидростатическое давление в  $\text{кг/см}^2$ .

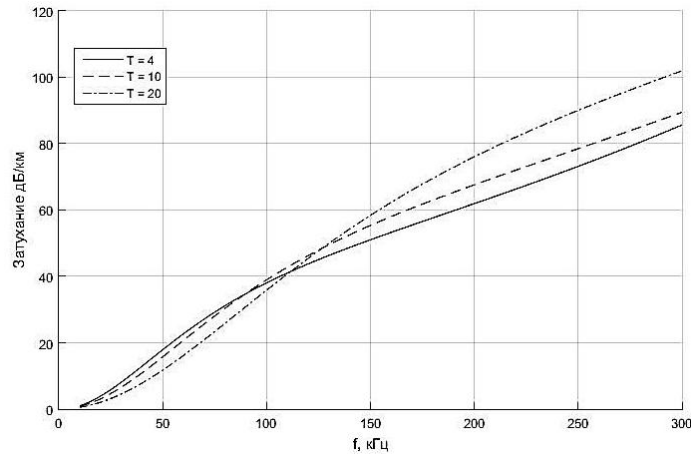


Рис. 3. Зависимость коэффициента затухания от частоты при температуре  $T = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Гидростатическое давление можно определить по известной из физики формуле

$$p = \rho gh, \quad (4)$$

где  $h$  – глубина в м;  $g = 9,8\text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  – плотность жидкости (для морской воды  $1020\text{--}1030\text{ кг/м}^3$ ).

При этом необходимо учесть, что формула (4) дает значение гидростатического давления в Па, а в формуле (3) его размерность выражена в  $\text{кг/см}^2$ . График зависимости коэффициента затухания от частоты и глубины, при температуре морской воды  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  представлен на рис. 4. Отметим, что данные на этом графике показаны без учета изменения температуры с изменением глубины.

Передача видеоизображения по беспроводному каналу связи требует обеспечения необходимой скорости передачи цифрового потока данных. За основу возьмем видео поток, который использует стандарт видео сжатия MPEG-4 [24], позволяющий достичь высокой степени сжатия информации, сохранив при этом высокое качество изображения. Стандарт имеет так называемые «уровни», указывающие максимальное разрешение изображения, частоту кадров и битрейт для различных профилей. Остановимся на уровне 1.2 данного стандарта и выберем основной профиль, применяемый для цифрового видеопотока стандартной четкости. Максимальная скорость потока при этом будет равна  $384\text{ кбит/с}$ , разрешение и частота кадров при этом может быть равна  $320 \times 240 @ 20$  либо  $352 \times 288 @ 15,2$ . Таким образом, канал связи должен обеспечивать минимальную скорость передачи  $384\text{ кбит/с}$ , с учетом наличия сигналов синхронизации (пилот сигналов) и служебной информации выберем требуемую скорость передачи данных канала связи равную  $450\text{ кбит/с}$ .

Рассчитаем ориентировочные параметры OFDM сигнала и количество элементов антенной решетки, необходимые для реализации беспроводного канала связи с требуемой пропускной способностью при этом не будет учитываться отношение сигнал/шум в канал, которое приводит к снижению пропускной способности. Для начала необходимо выбрать частоту несущего колебания. При этом необходимо учесть, что с увеличением частоты возрастает затухание. Остановимся на значении частоты несущего колебания  $f = 75\text{ кГц}$ , при этом затухание сигнала будет составлять  $28\text{ дБ/км}$ , полосу сигнала выберем равную  $\Delta f = 64\text{ кГц}$ .

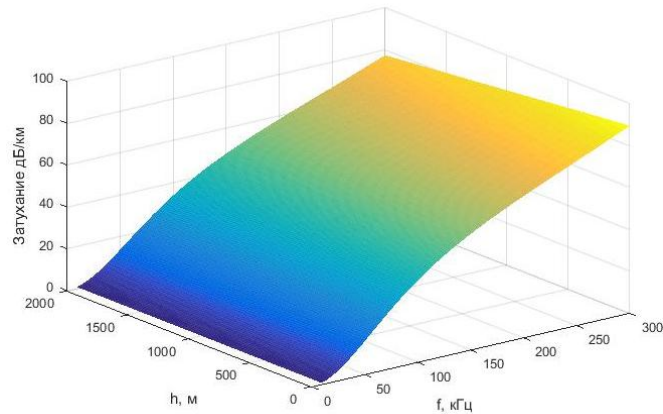


Рис. 4. Зависимость коэффициента затухания от частоты акустического сигнала и глубины, при температуре морской воды  $10^{\circ}\text{C}$

Следующим шагом является выбор количества поднесущих OFDM сигнала. Поскольку для получения OFDM сигнала используется аппарат быстрого обратного преобразования Фурье (ОБПФ), необходимо чтобы их количество было кратно степени 2. Выберем количество поднесущих равное 2048. Разделим выбранную ширину спектра сигнала OFDM на количество поднесущих и получим ширину спектра для каждой поднесущей

$$\Delta f_{\text{поднес}} = \frac{\Delta f}{2048} = 31,2 \text{ Гц},$$

где  $\Delta f$  – ширина спектра OFDM сигнала.

Зная ширину спектра одной поднесущей, рассчитаем минимальную длительность OFDM символа, определяющую скорость передачи данных на каждой поднесущей

$$T_s = \frac{2}{\Delta f_{\text{поднес}}} = \frac{2}{31,2} = 64,1 \text{ мс}.$$

Для модуляции каждой поднесущей могут использоваться различные виды модуляции: BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM и т.д. Применение многопозиционных видов модуляции позволяют увеличить пропускную способность канала связи, однако и больше подвержены воздействию шумов. В качестве модуляции выберем многопозиционную фазовую манипуляцию 8PSK, которая позволяет передавать 3 бита за один период символа OFDM.

Итак, скорость передачи данных с помощью OFDM сигнала будет равна

$$R_s = mF_s N = 3 \cdot 15,6 \cdot 2048 = 95,8 \text{ кбит/с},$$

где  $m$  – количество передаваемых бит с помощью 8PSK;  $F_s$  – длительность OFDM символа;  $N$  – количество поднесущих.

Теоретически, применяя технологию MIMO, можно увеличить пропускную способность канала связи пропорционально увеличению количества элементов антенной решетки. Для рассматриваемого случая, чтобы достичь требуемой пропускной способности 450 кбит/с, необходимое количество элементов антенной решетки равно  $450/96 = 5$  элементам.

Моделирование подводного акустического канала связи проводилось в среде Matlab. В качестве модели канала была выбрана модель Релея-Райса. Шум в канале задавался как Аддитивный Белый Гауссовский Шум (АБГШ). Параметры модели сигнала в подводном канале связи приведены в табл. 1.

Таблица 1

Количество передающих антенн	5
Количество приемных антенн	5
Частота дискретизации	500 кГц
Несущая частота	75 кГц
Защитный интервал	16 мс
Ширина спектра OFDM сигнала	31,2 Гц
Минимальная длительность OFDM символа	64,1 мс
Полоса сигнала	64 кГц
Количество поднесущих OFDM	2048
Количество путей	6
Тип модуляции	QPSK-8

На рис. 5 представлена зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для системы MIMO 5x5.

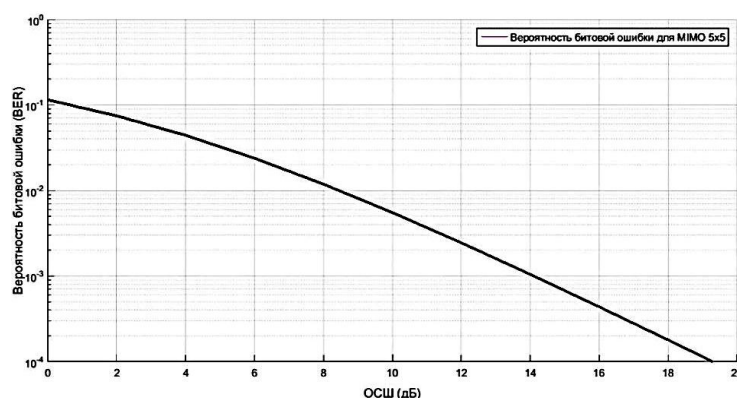


Рис. 5. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум (ОСШ) для подводного акустического канала

**Выводы.** Выполнен анализ эффективности алгоритмов, основанных на технологии MIMO-OFDM, для реализации беспроводного канала связи с подводными объектами для передачи данных (преимущественно видеоизображений), которые требуют высокой пропускной способности канала. Рассчитана зависимость коэффициента затухания от параметров среды распространения и частоты несущей используемых сигналов. Проведен приближенный расчет требуемых параметров OFDM сигнала (количество и применяемый вид модуляции поднесущих) и требуемое количество антенн. Из полученных результатов следует, что для обеспечения высокой пропускной способности при использовании сигналов высокой частоты, необходимо увеличивать количество элементов приемных и передающих АР. Выбор частотного диапазона осуществлялся по большей степени не с учетом обеспечения большой дальности действия канала связи, а обеспечения требуемой пропускной способности. Однако в этом диапазоне частот можно осуществить связь с объектами, находящимися на глубине порядка одного километра. Зависимость коэффициента затухания сигнала от частоты приводит к неравномерному затуханию сигнала в пределах рабочей полосы частот, что необходимо учитывать на приемной стороне для компенсации такой неравномерности. Результаты, полученные для подводного канала связи, показали, что использование технологии MIMO OFDM позволяет обеспечить высокую скорость передачи данных и сравнительно небольшую битовую ошибку для акустического канала связи



[5]. Для проверки достоверности результатов моделирования необходимо проведение дальнейших практических исследований для оценки возможности применения адаптивных алгоритмов [1–4] в реальных условиях.

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации госзадания №2014/74 «Разработка систем диагностики состояния биологических и технических объектов с использованием алгоритмов анализа нестационарных сигналов». Исследования проводились в ФГАОУ ВО ЮФУ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федосов В.П., Муравицкий Н.С. Адаптивная приемная антенная решетка для обработки пространственно-временных сигналов в MIMO-системе беспроводной передачи данных // Антенны. – 2011. – № 8. – С. 35-43.
2. Федосов В.П., Емельяненко А.В., Гладушенко С.Г., Поморцев П.М. Методы и алгоритмы многоканальной пространственной обработки широкополосных сигналов // Нелинейный мир. – 2012. – Т. 10, № 11. – С. 731-737.
3. Федосов В.П., Емельяненко А.В. Сравнительная эффективность беспроводного доступа на основе пространственной адаптации на выходах антенной решетки при использовании MIMO OFDM в релейском канале // Антенны. – 2013. – № 10 (197). – С. 045-049.
4. Федосов В.П., Кучерявенко С.В., Муравицкий Н.С. Повышение эффективности радиосвязи в релейском канале на основе антенных решеток // Антенны. – 2008. – № 11. – С. 98-104.
5. Baosheng Li, Jie Huang, Shengli Zhou, Ball K., Stojanovic M., Freitag L., Willett P. MIMO-OFDM for High-Rate Underwater Acoustic Communications // Oceanic Engineering, IEEE Journal. – 2009. – Vol. 34, Issue 4. – P. 634-644.
6. Shiu D., Foschini G.J., Gans M.J., Kahn J.M. Fading Correlation and Its Effect on the Capacity of Multielement Antenna Systems // IEEE Transactions on Communications. – 2000. – Vol. 48. – P. 502-513.
7. Paulraj, Arogyaswami J., Gore, D.A., Nabar R.U., Bolcskei H. Switching between diversity and multiplexing in MIMO systems // Proceedings of the IEEE. – No. 92 (2). – P. 198-218.
8. Raleigh G.G. and Cioffi J.M. Spatio-temporal coding for wireless communication // IEEE Trans. on Communications. – March 1998. – Vol. 46, No. 3. – P. 357-366.
9. Bolcskei H., Gesbert D., and Paulraj A.J. On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems // IEEE Trans. Commun. – Feb. 2002. – Vol. 50, No. 2. – P. 225-234.
10. LeFloch B., Alard M., Berrou C. Coded orthogonal frequency division multiplex // Proc. of IEEE. – Vol. 83, No. 6. – P. 982-996.
11. Bolcskei H. and Paulraj A.J. Space-frequency coded broadband OFDM systems // Proc. IEEE WCNC – Chicago, IL, Sept. 2000. – P. 1-6.
12. Foschini G.J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas // Bell Lab.Tech. J. – 1996. – No. 1 (2). – P. 41-59.
13. Shiu Da-Shan, Foschini G.J., Gans M.J., Kahn J.M. Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems // IEEE Transactions on Communications. – 2000. – Vol. 48, No. 3. – P. 502-513.
14. Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB // John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. – 2010.
15. A.van Zelst, Schenk T.C.W. Implementation of a MIMO OFDM based wireless LAN system // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2004. – Vol. 52, No. 2.
16. Li Y. (G.), Winters J. H., Sollenberger N.R. MIMO-OFDM for wireless communications: signal detection with enhanced channelestimation // IEEE Trans. on Comm. – 2002. – Vol. 50. – P. 1471-1477.
17. Roque D., Siclet C. Performances of Weighted Cyclic Prefix OFDM with Low-Complexity Equalization // IEEE Communications Letters. – No. 17 (3). – P. 439-442.
18. Kermaal J., Schumacher L., Pedersen K.L., Mogensen P., Frederiksen F. A Stochastic MIMO Radio Channel Model With Experimental Validation // IEEE Journal on Selected Areas Communications. – 2002. – Vol. 20. – P. 1211 -1226.
19. Trefethen L.N., Bau D. Numerical Linear Algebra // SIAM. – 1997.

20. Zelst A. Space division multiplexing algorithms // Proc. of the 10th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). – 2000. – Vol. 3. – P. 1218-1221.
21. Слюсар В. Системы ММО: принципы построения и обработка сигналов // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2005. – № 8.
22. Coleri S., Ergen M., Puri A., Bahai A. Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems // IEEE Transactions on Broadcasting. – Sep. 2002.
23. Урик Роберт Дж. Основы гидроакустики: Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1987. – 448 с.
24. Рожин Ф.В., Тонаканов О.С. Общая гидроакустика. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. – 160 с.
25. H.264 or MPEG-4 Part 10, Advanced Video Coding (MPEG-4 AVC).
26. Гусев В.Г. Системы пространственно-временной обработки гидроакустической информации. – Л.: Судостроение, 1988. – 264 с.
27. Конданев В.П., Пискарев С.П. Методика оптимизации характеристик системы передачи цифровой информации по гидроакустическому каналу в условиях однолучевого приема // Акустический журнал. – 1996. – Т. 42, № 4. – С. 573-576.
28. Курьянов Б.Ф., Пенкин М.М. Цифровая акустическая связь в мелком море для океанологических применений // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56, № 2. – С. 245-255.
29. Волков А.В., Курьянов Б.Ф., Пенкин М.М. Цифровая гидроакустическая связь для океанологических применений // Материалы VII Международной научно-технической конференции "Современные средства и методы океанологических исследований". – М., 2001. – С. 182-191.

#### REFERENCES

1. Fedosov V.P., Muravitskiy N.S. Adaptivnaya priemnaya antennaya reshetka dlya obrabotki prostranstvenno-vremennykh signalov v MIMO-sisteme besprovodnoy peredachi dannykh [Foster adaptive antenna array for processing spatio-temporal signals in MIMO-system of wireless data transmission], *Antenny* [Antennas], 2011, No. 8, pp. 35-43.
2. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V., Gladushenko S.G., Pomortsev P.M. Metody i algoritmy mnogokanal'noy prostranstvennoy obrabotki shirokopolosnykh signalov [Methods and algorithms of multichannel processing of broadband signals], *Nelineynyy mir* [Nonlinear World], 2012, Vol. 10, No. 11, pp. 731-737.
3. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V. Srovnitel'naya effektivnost' besprovodnogo dostupa na osnove prostranstvennoy adaptatsii na vykhodakh antennoy reshetki pri ispol'zovanii MIMO OFDM v releevskom kanale [Comparative efficiency of wireless access on the basis of spatial adaptation at the outputs of the antenna array using MIMO OFDM in Rayleigh channel], *Antenny* [Antennas], 2013, No. 10 (197), pp. 045-049.
4. Fedosov V.P., Kucheryavenko S.V., Muravitskiy N.S. Povyshenie effektivnosti radiosvyazi v releevskom kanale na osnove antennoykh reshetok [Improving the efficiency of radio communications in Rayleigh channel based on antenna arrays], *Antenny* [Antennas], 2008, No. 11, pp. 98-104.
5. Baosheng Li, Jie Huang, Shengli Zhou, Ball K., Stojanovic M., Freitag L., Willett P. MIMO-OFDM for High-Rate Underwater Acoustic Communications, *Oceanic Engineering, IEEE Journal*, 2009, Vol. 34, Issue 4, pp. 634-644.
6. Shiu D., Foschini G.J., Gans M.J., Kahn J.M. Fading Correlation and Its Effect on the Capacity of Multielement Antenna Systems, *IEEE Transactions on Communications*, 2000, Vol. 48, pp. 502-513.
7. Paulraj, Arogyaswami J., Gore, D.A., Nabar R.U., Bolcskei H. Switching between diversity and multiplexing in MIMO systems, *Proceedings of the IEEE*, No. 92 (2), pp. 198-218.
8. Raleigh G.G. and Cioffi J.M. Spatio-temporal coding for wireless communication, *IEEE Trans. on Communications*, March 1998, Vol. 46, No. 3, pp. 357-366.
9. Bolcskei H., Gesbert D., and Paulraj A.J. On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems, *IEEE Trans. Commun.*, Feb. 2002, Vol. 50, No. 2, pp. 225-234.
10. LeFloch B., Alard M., Berrou C. Coded orthogonal frequency division multiplex, *Proc. of IEEE*, Vol. 83, No. 6, pp. 982-996.
11. Bolcskei H. and Paulraj A.J. Space-frequency coded broadband OFDM systems, *Proc. IEEE WCNC – Chicago, IL, Sept. 2000*, pp. 1-6.
12. Foschini G.J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multiple antennas, *Bell Lab. Tech. J.*, 1996, No. 1 (2), pp. 41-59.
13. Shiu Da-Shan, Foschini G.J., Gans M.J., Kahn J.M. Fading correlation and its effect on the capacity of multielement antenna systems, *IEEE Transactions on Communications*, 2000, Vol. 48, No. 3, pp. 502-513.

14. *Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang.* MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. 2010.
15. *A.van Zelst, Schenk T.C.W.* Implementation of a MIMO OFDM based wireless LAN system, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, Vol. 52, No. 2.
16. *Li Y. (G.), Winters J. H., Sollenberger N.R.* MIMO-OFDM for wireless communications: signal detection with enhanced channelestimation, *IEEE Trans. on Comm.*, 2002, Vol. 50, pp. 1471-1477.
17. *Roque D., Siclet C.* Performances of Weighted Cyclic Prefix OFDM with Low-Complexity Equalization, *IEEE Communications Letters*, No. 17 (3), pp. 439-442.
18. *Kermoal J., Schumacher L., Pedersen K.I., Mogensen P., Frederiksen F.* A Stochastic MIMO Radio Channel Model With Experimental Validation, *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, 2002, Vol. 20, pp. 1211 -1226.
19. *Trefethen L.N., Bau D.* Numerical Linear Algebra, *SIAM*, 1997.
20. *Zelst A.* Space division multiplexing algorithms, *Proc. of the 10th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, 2000, Vol. 3, pp. 1218-1221.
21. *Slyusar V.* Системы MIMO: принципы построения и обработка сигналов [MIMO systems: principles of construction and signal processing], *Elektronika. Nauka. Tekhnologiya. Biznes* [Elektronika: Science, Technology, Business], 2005, No. 8.
22. *Coleri S., Ergen M., Puri A., Bahai A.* Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems, *IEEE Transactions on Broadcasting*, Sep. 2002.
23. *Urik Robert Dzh.* Основы гидроакустики [Fundamentals of hydroacoustics]: Translation from English. Leningrad: Sudostroenie, 1987, 448 p.
24. *Rozhin F.V., Tonakanov O.S.* Общечая гидроакустика [General underwater acoustics]. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1988, 160 p.
25. H.264 or MPEG-4 Part 10, Advanced Video Coding (MPEG-4 AVC).
26. *Gusev V.G.* Системы пространственно-временной обработки гидроакустической информации [System of spatial-temporal processing sonar information]. Leningrad: Sudostroenie, 1988, 264 p.
27. *Kondanov V.P., Piskarev S.P.* Методика оптимизации характеристик системы передачи цифровых данных по гидроакустическому каналу в условиях одностороннего приема [The method of optimization of characteristics of systems of digital information transmission on the hydroacoustic channel in terms of single beam reception], *Akusticheskij zhurnal* [Akusticheskij Zhurnal], 1996, Vol. 42, No. 4, pp. 573-576.
28. *Kur'yanov B.F., Penkin M.M.* Цифровая акустическая связь в мелком море для океанологических применений [Digital acoustic communication in shallow waters for Oceanographic applications], *Akusticheskij zhurnal* [Akusticheskij Zhurnal], 2010, Vol 56, No. 2, pp. 245-255.
29. *Volkov A.V., Kur'yanov B.F., Penkin M.M.* Цифровая гидроакустическая связь для океанологических применений [Digital hydroacoustic link for Oceanographic applications], *Materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Sovremennye sredstva i metody okeanologicheskikh issledovaniy"* [VII materials of International scientific-technical conference "Modern methods and tools of Oceanological investigations"]. Moscow, 2001, pp. 182-191.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Соколов.

**Федосов Валентин Петрович** – Южный федеральный университет; e-mail: vpfed@mail.ru; 347928, Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

**Легин Андрей Алексеевич** – e-mail: legin.andrey@gmail.com; тел.: 89518374483; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

**Ломакина Анна Владимировна** – e-mail: avemelyanenko@sfned.ru; тел.: 89515050232; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

**Fedosov Valentin Petrovich** – Southern Federal University; e-mail: vpfed@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632; the department of theoretical foundations of radio technology; dr. of eng. sc.; professor.

**Legin Andrey Alexeevich** – e-mail: legin.andrey@gmail.com; phone: +79518374483; the department of theoretical foundations of radio technology; postgraduate student.

**Lomakina Anna Vladimirovna** – e-mail: avemelyanenko@sfned.ru; phone: +79515050232; the department of theoretical foundations of radio technology; postgraduate student.