УДК 621.391.8

DOI: 10.17223/19988605/54/5

С.В. Душин, В.С. Алешин, С.С. Шаврин, М.П. Фархадов, И.Ю. Куров**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДНЕГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН
ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ**

Рассматриваются условия передачи информации по гидроакустическим каналам связи в диапазоне частот 48–64 кГц в поверхностных водах. Приведены анализ и моделирование характеристик типового канала, позволяющие оценить затухание и задержку сигнала, многолучевое распространение, рассеяние, нестационарность характеристик канала, доплеровское смещение. Произведены теоретическая оценка скорости передачи данных и моделирование работы системы передачи с одним приемником и одним передатчиком, которые построены на основе мультиплексирования с ортогональным частотным разделением сигналов. Результаты представлены для двух различных техник демодуляции данных сигналов.

Ключевые слова: гидроакустические каналы связи; нестационарные каналы; передача данных в поверхностных водах; моделирование систем связи.

Освоение человеком подводного пространства Мирового океана и пресноводных водоемов невозможно без эффективных средств связи с подводными объектами. Так, уже сегодня существует необходимость в надежной связи с подводными лодками, буровым оборудованием, малыми и средними автономными и телеуправляемыми необитаемыми подводными аппаратами (ТНПА и АНПА), малыми обитаемыми подводными аппаратами [1].

Многообразие типов подводных объектов обуславливает необходимость как в стационарной, так и в мобильной подводной связи. Стационарная связь с подводными объектами может быть обеспечена при помощи наземных технологий проводной связи, адаптированных для работы под водой. При этом адаптация осуществляется сравнительно просто – путем применения подводных кабелей, обеспечения оборудования связи корпусами и разъемами для работы на соответствующей глубине, а также дистанционного питания оборудования. Куда более сложная ситуация складывается с беспроводной мобильной подводной связью. Как известно, радиоволны испытывают сильное затухание в воде, поэтому использование напрямую современных радиотехнических систем для связи под водой невозможно. В связи с этим в качестве основного канала связи с подводными объектами применяется гидроакустический канал, а также ограниченно используются оптический канал (для связи на малые расстояния) и радиоканалы на сверхнизких частотах (для дальней связи с крупногабаритными мобильными объектами) [1, 2].

Несмотря на то, что гидроакустические каналы связи на сегодня являются наиболее востребованными и подходящими каналами для беспроводной связи с подводными объектами, их характеристики не позволяют организовать такие же надежные и высокоскоростные каналы связи, как наземные радиоканалы. Данное обстоятельство обусловлено целым рядом эффектов распространения акустических волн в водной среде. Для гидроакустических каналов наиболее важными условиями являются: используемые частоты, глубина погружения объектов и направление передачи (по горизонтали или вертикали), химический состав воды, температура воды, характер движения объектов, расстояния до дна и поверхности воды, интенсивность волнения поверхности воды.

Связь с малогабаритными объектами, такими как ТНПА, АНПА и водолазы, подразумевает относительно небольшую дальность передачи (до 500 м), поэтому для обеспечения достаточно широкой полосы пропускания канала рационально использовать средние (20–100 кГц) или высокие (более 100 кГц) частотные диапазоны. При этом средний частотный диапазон обладает рядом преимуществ

в сравнении с более высокими частотами, хотя и уступает им в возможной полосе пропускания. В частности, он характеризуется сравнительно низким затуханием сигнала и менее выраженными эффектами рассеяния волны. При этом средний частотный диапазон, так же как и высокие частоты, свободен от многих видов биогенных и техногенных шумов, характерных для низких частот (ниже 20 кГц). В совокупности это делает средний частотный диапазон удобным для передачи таких видов трафика, как голос и (или) звук, телеметрия, команды управления и фотоизображения.

В данной работе мы анализируем характеристики и приводим результаты моделирования гидроакустического канала связи в поверхностных водах в диапазоне с полосой пропускания 48–64 кГц, а также приводим результаты моделирования работы систем связи с модуляцией с ортогональным частотным разделением сигналов (OFDM) по данному каналу.

1. Особенности гидроакустических каналов связи в поверхностных водах в среднем частотном диапазоне

Малогобаритные ТНПА и АНПА широко используются для обследования дна и толщи воды в акваториях и прибрежных зонах. При этом аппарат погружается на сравнительно небольшие глубины (как правило, до 100 м) и на небольшом удалении от места оператора или базы (до 500 м). Таким образом, особенностью канала связи с ними является сравнительно небольшое расстояние между приемником и передатчиком и каждого из них от поверхности воды и дна водоема. Общие геометрические свойства типового канала связи представлены на рис. 1.

Рис. 1. Основные условия распространения гидроакустического сигнала в поверхностных водах

Fig. 1. Conditions of a hydroacoustic signal propagation in shallow water

Как известно, скорость распространения акустической волны в морской воде составляет порядка 1500 м/с и зависит в основном от давления, температуры и, как следствие, от глубины [3, 4]. Это приводит к двум основным эффектам. Во-первых, сигнал существенно задерживается даже при прохождении относительно небольших расстояний. Например, при расстоянии между приемником и передатчиком, равном 100 м, задержка распространения сигнала (прямого луча) составит около 67 мс, а отраженные от дна и поверхности воды сигналы (см. рис. 1) будут задержаны на еще большее время. Во-вторых, зависимость скорости от глубины оказывает существенное влияние на рефракцию волны и является причиной образования приповерхностного подводного звукового канала (ППЗК) [5]. Волна в таком канале распространяется по дуге окружности, радиус которой составляет десятки километров [5], поэтому при организации связи на малые расстояния данный эффект не является существенным.

Затухание в гидроакустическом канале возрастает с ростом частоты и зависит от солености, рН-фактора и температуры воды. Коэффициент поглощения волны средой на выбранной частоте может быть рассчитан по эмпирическим формулам Форпа [6] или Франсуа–Гаррисона [7]. Для рассматриваемого в данной работе диапазона частот (48–64 кГц) предпочтительно использовать формулу Франсуа–Гаррисона, дающую более точный результат для средних и высоких частот. В общем виде она выглядит следующим образом:

$$a(f) = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2 \text{ дБ/км}, \quad (1)$$

где: $a(f)$ – удельное затухание; f – частота в килогерцах; P и A – корректирующие коэффициенты; f_1, f_2 – частоты релаксации.

С учетом поглощения волны средой распространения и ослабления за счет распространения волны в пространстве, затухание волны может быть рассчитано по формуле [8]:

$$A(d, f) = k \cdot 10 \log(d) + d \cdot a(f) \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где $A(d, f)$ – затухание в децибелах, k – коэффициент распространения, зависящий от направленности излучения (для сферического распространения $k = 2$); d – расстояние в метрах.

Так как в рассматриваемом случае приемник и передатчик располагаются на небольшом удалении от дна и поверхности воды, отраженные от них сигналы (см. рис. 1) играют важную роль в формировании импульсной характеристики (ИХ) канала связи, а сам канал характеризуется многолучевым распространением [3]. При этом относительно низкая скорость распространения акустической волны в водной среде приводит к тому, что отраженный сигнал приходит на приемник со значительным запозданием относительно основного (прямого) сигнала. Дополнительно к этому волна испытывает рассеяние при прохождении препятствий, что усложняет форму ИХ канала. При этом длина волны на частоте, например, 60 кГц составляет 2,5 см, поэтому рассеяние волны будет происходить даже при прохождении препятствий сравнительно небольшого размера (сопоставимого с длиной волны). Значимое влияние на вид ИХ канала также может оказывать наличие подводных течений и вызванных ими турбулентностей вблизи источника и приемника акустических сигналов.

Важной особенностью гидроакустического канала в поверхностных водах является нестационарность его характеристик, так как в естественных условиях его элементы находятся в движении. Главными источниками нестационарности являются колебания поверхности воды, линейные перемещения передатчика и приемника в пространстве, флуктуации положения приемника и передатчика под действием течений и волнений надводной части системы связи. Это приводит, с одной стороны, к изменению импульсной характеристики канала во времени, а с другой – к доплеровскому смещению спектра сигнала на приеме. Помимо этого, эффект Доплера в сравнительно широкополосных гидроакустических каналах может вызвать еще одно деструктивное для передачи информации, особенно для сложных сигналов, явление – деформацию спектра передаваемого сигнала. Деформация спектра будет проявляться в виде расширения или сужения спектра передаваемого сигнала пропорционально скорости передатчика относительно приемника в соответствии с выражением:

$$\Delta F_d = \Delta F \frac{1 \pm \frac{V_{\text{пр}}}{V_{\text{зв}}}}{1 \mp \frac{V_{\text{ист}}}{V_{\text{зв}}}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{пр}}$ – скорость приемника относительно среды, $V_{\text{ист}}$ – скорость источника относительно среды, $V_{\text{зв}}$ – скорость распространения звука в среде.

Гидроакустические каналы отличаются разнообразием источников шумов биогенного, техногенного, атмосферного характера. В среднем частотном диапазоне наибольшей мощностью обладают шумы, вызванные движением поверхности воды из-за ветра в атмосфере, и тепловые шумы [9]. Эмпирическая формула для оценки спектральной плотности мощности шума для глубокой воды представлена в [9, 10]. В поверхностных водах спектральная плотность шумов в среднем на 9 дБ выше

в сравнении с глубокой водой [10]. Таким образом, оценку спектральной плотности мощности уровня шума в поверхностных водах в среднем частотном диапазоне можно записать следующим образом:

$$N \approx N_B + N_T = (50 + 7,5\sqrt{w} + 20\lg(f) - 40\lg(f + 0,4)) + (-15 + 20\lg(f)) + 9 \text{ дБмкПа/Гц}, \quad (4)$$

где w – скорость ветра в м/с, f – частота в килогерцах.

При этом соотношение сигнал / шум в канале рассчитывается по формуле:

$$SNR = L_{tx} - A - L_{noise}, \quad (5)$$

где L_{tx} – уровень акустического давления выходного сигнала передатчика (на расстоянии 1 м), A – затухание в канале, L_{noise} – уровень шума в канале, рассчитанный для всей полосы пропускания канала.

2. Моделирование характеристик канала связи в среднем частотном диапазоне с полосой пропускания 48–64 кГц

В целом задача моделирования стационарных гидроакустических каналов исследована достаточно подробно и решается, например, при помощи широко известного программного обеспечения с открытым исходным кодом Bellhop [11]. Однако ключевой особенностью гидроакустических каналов является нестационарность их характеристик и наличие эффекта Доплера, моделирование которых в условиях широкополосности канала является весьма сложной математической задачей. Для моделирования нестационарного гидроакустического канала мы используем открытое программное обеспечение Acoustic Channel Simulator [12], которое позволяет провести вычислительно эффективную оценку эволюции параметров канала во времени, допуская независимость коэффициента поглощения от частоты внутри полосы пропускания канала. Для рассматриваемого частотного диапазона 48–64 кГц отношение ширины канала к центральной частоте составляет менее 0,3, что позволяет применить данное допущение [Ibid.].

Рассмотрим канал с типовыми для задачи связи с ТНПА и АНПА в акватории Черного моря номинальными параметрами (параметры при отсутствии движения): длина канала – 200 м, глубина погружения приемника – 50 м, глубина погружения передатчика – 60 м, глубина водоема – 100 м. При моделировании учитываются дрейф приемника относительно передатчика, движение поверхности воды и линейное перемещение приемника относительно передатчика (см. рис. 1). Дрейф приемника и передатчика моделируется как колебательный процесс со случайным фазовым шумом и амплитудой 0,2 м/с. Линейное перемещение приемника относительно передатчика изменяется в процессе моделирования от –1,2 до 1,2 м/с.

Рассчитанное по формуле (1) значение коэффициента поглощения на километр для центральной частоты канала (56 кГц) и типичных для Черного моря условий [3] ($pH = 8$, температура $+10^\circ\text{C}$, соленость 17‰) равно 9,47 дБ/км. Для сферического распространения волны (коэффициент распространения $k = 2$) и длины канала 200 м затухание в канале равно 47,92 дБ, что соотносится с результатами моделирования, представленными на рис. 2. При этом движение элементов канала и многолучевое распространение приводят к флуктуации затухания в пределах ± 4 дБ.

На рис. 3, а и 4 представлены импульсная характеристика канала и ее эволюция во времени в течение моделирования. Как видно из рис. 3, а, значимая часть ИХ канала составляет порядка 70 мс и содержит пять выраженных пиков, которые соответствуют отраженным (один или несколько раз) от дна и поверхности воды лучам. При этом в процессе моделирования пики ИХ смещаются на время до 10 мс из-за движения элементов канала (см. рис. 4). Важно отметить, что в силу особенностей геометрии канала длительность ненулевой части импульсной характеристики зависит от глубины водоема, глубин погружения приемника и передатчика, а также длины канала. В частности, по мере увеличения длины канала длительность ненулевой части ИХ будет уменьшаться. Для приведенных выше параметров канала, но при длине канала 1 км, значимая часть импульсной характеристики составит порядка 40 мс, что показано на рис. 3, б. Этот эффект называется *mode stripping*. Таким образом, при передаче на короткие расстояния проблема многолучевости более выражена в сравнении с передачей на средние и дальние расстояния.

Рис. 2. Флуктуации затухания в канале
Fig. 2. Channel attenuation fluctuations

Рис. 3. Ненулевая часть импульсной характеристики канала для длины канала 200 м (а) и длины канала 1 км (б)
(нулевая часть, соответствующая задержке прямого луча, не показана)
Fig. 3. Non-zero part of the channel impulse response for a channel length of 200 m (a) and a channel length of 1 km (b)
(the zero part corresponding to the delay of the direct beam is not shown)

Рис. 4. Изменение ненулевой части импульсной характеристики канала при длине канала 200 м
Fig. 4. Change in the nonzero part of the channel impulse response at a channel length of 200 m

Для центральной частоты канала (56 кГц) и скорости ветра 3 м/с спектральная плотность мощности шума, рассчитанная по формуле (3), равна 53,4 дБмкПа/Гц. Рассчитывая мощность шума в заданной полосе частот, можно получить оценку мощности шума в канале. Для рассматриваемого канала (48–64 кГц) она составляет 98,9 дБмкПа. Как видно, уровень шума в канале и сравнительно небольшое затухание позволяют достичь достаточно высокого соотношения сигнал / шум на выходе канала при использовании излучателей малой и средней мощности. Так, при использовании излучателя с выходным уровнем 170 дБмкПа (соответствует 1 Вт акустической мощности), соотношение сигнал / шум на выходе рассмотренного канала составит 24,1 дБ.

3. Особенности передачи данных по каналу и результаты моделирования системы передачи данных с OFDM сигналом

Для рассмотренного выше канала оценка максимальной скорости пропускания согласно теореме Шеннона–Найквиста, равна 74,4 кбит/с:

$$C = B \cdot \log_2(1 + SNR), \quad (6)$$

где C – пропускная способность канала в бит/с, B – полоса пропускания канала в герцах.

Следует отметить, что для промышленно выпускаемых гидроакустических систем связи такая, казалось бы, невысокая для современных телекоммуникационных систем скорость передачи является довольно высоким показателем [1]. При этом в естественных поверхностных водах их фактическая скорость передачи оказывается значительно меньше максимальной, которая достигается в глубоких водах или лабораторных условиях.

Рис. 5. Функциональная схема OFDM-системы для передачи по гидроакустическому каналу связи
Fig. 5. Functional diagram of an OFDM system for transmission over a hydroacoustic communication channel

Приближение скорости передачи к теоретическому пределу затрудняется главным образом длительной ненулевой частью ИХ канала, которая приводит к возникновению межсимвольной интерференции. Как и в радиотехнических системах, эффективным способом борьбы с межсимвольной интерференцией является применение техник многочастотной модуляции, наиболее востребованной

из которых на сегодня является мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов (OFDM), и их комбинирование с методами разнесенного приема, пространственного мультиплексирования и направления луча (MIMO, антенные решетки). При этом основными проблемами для приема OFDM-сигнала является доплеровское смещение спектра, которое приводит уже к межканальной интерференции, а также нестационарность канала, которая затрудняет оценку его параметров и слежение за ними, настройку системы автоматической регулировки уровней (APU), настройки компенсаторов частотного сдвига и системы тактовой и фреймовой синхронизации. В совокупности это делает задачу применения технологии OFDM и ее адаптацию для специфических условий гидроакустических каналов весьма трудоемкой [13–16].

Для оценки скорости передачи по рассмотренному выше каналу мы рассмотрели модель OFDM-системы с одним входом и одним выходом (single input single output, SISO), представленную на рис. 5. Для сравнения применены различные алгоритмы выравнивания и демодуляции OFDM-сигнала. В частности, исследованы схема приема при помощи прямого преобразования Фурье и выравнивание канала согласно алгоритму наименьших средних квадратов (НМНК, LMS), а также техника дифференциального когерентного приема P-FFT, приведенная в [17]. В субканалах используется QPSK-модуляция.

Рис. 6. Зависимость коэффициента битовых ошибок от длины OFDM-фрейма для разных алгоритмов демодуляции и OFDM-сигнала

Fig. 6. Dependence of the bit error rate from OFDM frame length for different demodulation algorithms and OFDM signal

На рис. 6 представлена зависимость коэффициента ошибок от количества поднесущих в OFDM-сигнале при скорости передачи 28 кбит/с. Как видно, в канале происходит существенное количество ошибок для обоих вариантов демодуляции, а коэффициент ошибок зависит от длины OFDM-фрейма.

Заключение

В работе рассмотрены особенности передачи информации по гидроакустическим каналам связи в поверхностных водах в диапазоне частот 48–64 кГц. Согласно проведенному анализу и результатам моделирования канала, основными проблемами при организации высокоскоростного обмена данными с подвижными объектами на малые расстояния являются длительная ИХ канала, доплеровское смещение сигнала и нестационарность характеристик канала. При этом важно, что при организации связи на малые расстояния эффекты, вызванные многолучевым распространением, выражены значительно сильнее, чем при связи на средние и дальние расстояния.

Для рассмотренного канала с полосой пропускания 48–64 кГц получена теоретическая оценка скорости передачи по теореме Шеннона, составляющая 74,4 кбит/с, а также выполнено моделирование OFDM-системы, которые показывают, что при использовании QPSK-модуляции в каналах и общей скорости передачи 28 кбит/с наблюдается коэффициент ошибок более E_{10-3} (без использования алгоритмов помехоустойчивого кодирования). Результаты моделирования показывают потенциал развития гидроакустических систем связи на короткие расстояния в среднем частотном диапазоне, а выявленные в ходе проведенного моделирования особенности канала позволяют в дальнейшем сконцентрировать внимание на разработке специализированных методов обработки сигналов и оптимизации сигнально-кодовой конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Душин С.В., Фархадов М.П., Шаврин С.С., Алешин В.С. Тенденции и перспективы развития беспроводной подводной связи // DSPA: вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2020. № 2. С. 11–18.
2. Дорошенко В.И., Солнце Л.Е. Особенности связи с глубоководными подвижными морскими аппаратами // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2014. № 4. С. 38–42.
3. Архипкин В.С., Деев М.Г. Особенности поля звука в Черном море // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2008. № 6. С. 30–33.
4. Dushin S.V. Modeling of a high-frequency hydroacoustic communication channel in shallow water of the Black Sea // Proceedings of 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). Moscow, Russia, 2020. P. 1–5.
5. Макаров А.И., Дворников В.Д., Конопелько В.К. Передача информации в гидроакустическом канале // Доклады БГУИР. 2004. № 2. С. 103–117.
6. Thorp W. Deep ocean sound attenuation in the sub and low kilocycle per second region // J. Acoust. Soc. America. 1965. V. 38 (4). P. 648–654.
7. Francois R.E., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption // J. Acoust. Soc. Am. 1982. V. 72 (6). P. 1879–1890.
8. Huang J., Barbeau M., Blouin S., Hamm C., Taillefer M. Simulation and modeling of hydro acoustic communication channels with wide band attenuation and ambient noise // International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems. 2017. V. 32, is. 5. P. 466–485.
9. Burrowes G., Khan J.Y. Short-range underwater acoustic communication networks // Autonomous Underwater Vehicles. 2011. P. 173–198.
10. Sha'ameri A.Z., Al-Aboosi Y.Y., Khamis N.H.H. Underwater acoustic noise characteristics of shallow water in tropical seas // International Conference on Computer and Communication Engineering, Kuala Lumpur, 2014. P. 80–83.
11. Porter M.B. Bellhop code. URL: <https://github.com/avishayp/acoustic-toolbox> (accessed: 10.07.2020).
12. Qarabaqi P., Stojanovic M. Statistical characterization and computationally efficient modeling of a class of underwater acoustic communication channels // IEEE journal of Oceanic Engineering. 2013. V. 38, is. 4. P. 701–717.
13. Tadayon A., Stojanovic M. Low-complexity super resolution frequency offset estimation for high data rate acoustic OFDM systems // IEEE journal of Oceanic Engineering. 2018. V. 99. P. 1–11.
14. Demirors E., Sklivanitis G., Santagati G.E., Melodia T., Batalama S.N. A high-rate software-defined underwater acoustic modem with real-time adaptation capabilities // IEEE Access. 2018. V. 6. P. 18602–18615.
15. Raghavendra M.R., Bhashyam S., Giridhar K. Exploiting hopping pilots for parametric channel estimation in OFDM systems // IEEE Signal Processing Letters. 2005. V. 12, № 11. P. 737–740.
16. Biagi M., Rinauro S., Cusani R. Channel estimation or prediction for UWA? // 2013 MTS/IEEE Oceans. Bergen, 2013. P. 1–7.
17. Aval Y., Stojanovic M. Differentially coherent multichannel detection of acoustic OFDM signals // IEEE J. Oceanic Eng. 2014. V. 40 (2). P. 251–268.

Поступила в редакцию 15 сентября 2020 г.

Dushin S.V., Aleshin V.S., Shavrin S.S., Farkhadov M.P., Kurov I.Y. (2021) USING THE MID-FREQUENCY RANGE OF ACOUSTIC WAVES TO TRANSMIT INFORMATION IN SHALLOW WATERS. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 54. pp. 38–47

DOI: 10.17223/19988605/54/5

Human research of the underwater space of the World's Oceans is impossible without effective underwater communication tools. There is a need for reliable communication with various types of objects: submarines, drilling equipment, small and medium-sized autonomous and remotely controlled unmanned underwater vehicles (ROV and AUV).

Small-sized ROV and AUV as usual work in shallow water (typical depth is in range from a few meters to 100 m) and at a short distance from the operator's place or base (up to 500 m). In these conditions the medium acoustic frequencies are suitable to build high-speed communication links. The main features of medium frequency link in range 48-64 kHz are considered in the paper.

A most important features of hydroacoustic channels in shallow waters are the multi-path propagation and as a result long duration of the channel impulse response, the nonstationarity of its characteristics and Doppler shift of the transmitted signals. The main sources of nonstationarity are motion of the water surface caused by wind, linear movements of the transmitter and receiver installed on mobile objects, sea currents. This leads to a change of the channel impulse response in time and to a Doppler shift of the signal spectrum on the receiver side. Hydroacoustic channels are characterized by a variety of noise sources of biogenic, technogenic, atmospheric nature. In the considered middle frequency range, the most powerful are the noise caused by the movement of the water shallow due to wind in the atmosphere and thermal noise.

The open source software Acoustic Channel Simulator was used to simulate a non-stationary hydroacoustic channel. A channel with nominal parameters (parameters in the absence of movement) typical for the task of communication with ROV and AUV in the Black Sea is considered: the value of the absorption coefficient per kilometer for the central frequency of the channel (56 kHz) and conditions typical for the Black Sea [3] (pH = 8, temperature +10 °C, salinity 17 ‰) is 9.47 dB/km.

For the channel considered, the maximum transmission rate obtained using Shannon-Nyquist theorem is 74.4 kbit/s. But in practice it is hard to achieve the transmission rate close to this value, because of channel features, which lead to inter symbol interference. An effective way to mitigate inter symbol interference is the use of multicarrier modulation techniques, the most used of which today is orthogonal frequency division multiplexing (OFDM).

To estimate the transmission rate over the considered hydroacoustic channel, a model of an OFDM system with simple input and simple output (SISO) was considered. The two different demodulation techniques are investigated. It is Fourier transform with channel estimation using least mean squares (LMS) algorithm and P-FFT differential coherent demodulation technique. The subchannels signals are QPSK modulated. The simulation results show that the bit error rate is about 10^{-2} (without forward error correction) for both considered demodulation schemes, while the overall transmission rate is 28 kbps.

Keywords: hydroacoustic communication channels; non-stationary channels; data transmission in shallow waters; mathematical modeling; communication systems modeling.

DUSHIN Sergey Victorovich (Candidate of Technical Sciences, Senior researcher, Institute of Control Science of RAS, Moscow, Russian Federation).

E-mail: s.dushin@inbox.ru

ALESHIN Viktor Sergeevich (Candidate of Technical Sciences, Lead researcher, Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russian Federation).

E-mail: abc082012@yandex.ru

SHAVRIN Sergey Sergeevich (Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russian Federation).

E-mail: sss@mtuci.ru

FARKHADOV Mais Pasha (Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory, Institute of Control Science of RAS, Moscow, Russian Federation).

E-mail: mais@ipu.ru

KUROV Igor Yurievich (Researcher, Institute of Control Science of RAS, Moscow, Russian Federation).

E-mail: kurov.igor@gmail.com

REFERENCES

1. Dushin, S.V., Farkhadov, M.P., Shavrin, S.S. & Aleshin, V.S. (2020) Trends and prospects for the development of wireless underwater communication. *DSPA: voprosy primeneniya tsifrovoy obrabotki signalov – DSPA: Issues of Digital Signal Processing Application*. 2. pp. 11–18.
2. Doroshenko, V.I. & Solntce, L.E. (2014) Features of communication with deep-sea mobile submersibles. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. Admirala S.O. Makarova – Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet named Admiral S.O. Makarov*. 4 pp. 38–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-4-38-42
3. Arkhipkin, V.S. & Deev, M.G. (2008) Features of the sound field in the Black Sea. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5 – Moscow University Bulletin. Series 5*. 6. pp. 30–33.
4. Dushin, S.V. (2020) Modeling of a high-frequency hydroacoustic communication channel in shallow water of the Black Sea. *Proceedings of 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*. Moscow, Russia. pp. 1–5. DOI: 10.1109/DSPA48919.2020.9213278
5. Makarov, A.I., Dvornikov, V.D. & Konopelko, V.K. (2004) *Peredacha informatsii v gidroakusticheskom kanale [Data transmission in the hydroacoustic channel]*. *Doklady BGUIR – Reports BSUIR*. 2. pp. 103–117.

6. Thorp, W. (1965) Deep ocean sound attenuation in the sub and low kilocycle per second region. *Journal of Acoustical Society of America*. 38(4). pp. 648–654. DOI: 10.1121/1.1909768
7. Francois, R.E. & Garrison, G.R. (1982) Sound absorption based on ocean measurements: Part II. Boric acid contribution an equation for total absorption. *Journal of Acoustical Society of America*. 72(6). pp. 1879–1890. DOI: 10.1121/1.388673
8. Huang, J., Barbeau, M., Blouin, S., Hamm, C. & Taillefer, M. (2017) Simulation and modeling of hydro acoustic communication channels with wide band attenuation and ambient noise. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*. 32(5). pp. 466–485. DOI: 10.1080/17445760.2016.1169420
9. Burrowes, G. & Khan, J.Y. (2011) Short-range underwater acoustic communication networks. *Autonomous Underwater Vehicles*. October. pp. 173–198. DOI: 10.5772/24098
10. Sha'ameri, A.Z., Al-Aboosi, Y.Y. & Khamis, N.H.H. (2014) Underwater acoustic noise characteristics of shallow water in tropical seas. *International Conference on Computer and Communication Engineering, Kuala Lumpur*. pp. 80–83. DOI: 10.1109/ICCCE.2014.34
11. Porter, M.B. (2020) *Bellhop code*. [Online] Available from: <https://github.com/avishayp/acoustic-toolbox> (Accessed: 10th July 2020).
12. Qarabaqi, P. & Stojanovic, M. (2013) Statistical characterization and computationally efficient modeling of a class of underwater acoustic communication channels. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 38(4). pp. 701–717. DOI: 10.1109/JOE.2013.2278914
13. Tadayon, A. & Stojanovic, M. (2018) Low-Complexity Superresolution Frequency Offset Estimation for High Data Rate Acoustic OFDM Systems. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 99. pp. 1–11. DOI: 10.1109/JOE.2018.2869657
14. Demirors, E., Sklivanitis, G., Santagati, G.E., Melodia, T. & Batalama, S.N. (2018) A High-Rate Software-Defined Underwater Acoustic Modem With Real-Time Adaptation Capabilities. *IEEE Access*. 6. pp. 18602–18615. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2815026
15. Raghavendra, M.R., Bhashyam, S. & Giridhar, K. (2005) Exploiting hopping pilots for parametric channel estimation in OFDM systems. *IEEE Signal Processing Letters*. 12(11). pp. 737–740. DOI: 10.1109/LSP.2005.856889
16. Biagi, M., Rinauro, S. & Cusani, R. (2013) Channel estimation or prediction for UWA. *MTS/IEEE OCEANS*. pp. 1–7. DOI: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6607979
17. Aval, Y. & Stojanovic, M. (2014) Differentially coherent multichannel detection of acoustic OFDM signals. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 40(2). pp. 251–268. DOI: 10.1109/JOE.2014.2328411