

## ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-832-841

### COMPARATIVE ANALYSIS OF INDUSTRIAL UNDERWATER ACOUSTIC MODEMS

**T. K. Sharafutdinova**

Kuznetsov Naval Academy, St. Petersburg, Peterhof, Russian Federation

*The results of the current level of development of data transmission technology using underwater acoustic modems are presented in the paper. Underwater acoustic modems are widely used in the communication networks of underwater robotic vehicles. Such systems are designed to solve various problems in the study and monitoring of sea areas. The specificity of data transmission in an underwater acoustic channel is considered. The effects arising from the low speed of sound propagation in the underwater environment are described. Possibility of distortion due to multipath propagation and the Doppler Effect is indicated. An overview of existing underwater acoustic modems is presented. The main characteristics of underwater acoustic modems, such as bandwidth, range, data rate, modulation type, etc., are highlighted. The most important parameters that determine the tactical and technical characteristics of the modems are range and data rate. The empirical dependence of the data rate on the distance is revealed. The current maximum data rate in the underwater acoustic channel is given. The data given by the modem manufacturers correspond to the case of an ideal channel. The best manufacturers of the underwater acoustic modems are indicated. The features of the most common types of modulation are considered. Modulation using Sweep Spread Carrier technology is described in detail. This modulation allows you to compensate for the effect of multipath propagation and take into account the Doppler shift due to the motion subscribers of the underwater acoustic network. Spectrum spreading technology is considered. The applying of modulation using spread-spectrum technology improves the noise immunity of underwater acoustic modems. The need to formalize the calculation of the signal-to-noise ratio for the hydro acoustic data transmission channel is emphasized. The prospects for the development of data transmission technology using underwater acoustic modems are determined.*

*Keywords: underwater acoustic modem, underwater robotic vehicle, data rate, range, spread-spectrum technology.*

**For citation:**

Sharafutdinova, Taisiia K. "Comparative analysis of industrial underwater acoustic modems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 832–841. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-832-841.

УДК 681.883

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МОДЕМОВ

**Т. К. Шарафутдинова**

ВМПИ ВУНЦ ВМФ ВМА им. Н. Г. Кузнецова,  
Санкт-Петербург, Петергоф, Российская Федерация

*В статье изложены результаты анализа современного уровня развития технологии передачи данных с использованием гидроакустических модемов, которые получили широкое распространение в подсистеме связи подводных робототехнических комплексов, предназначенных для решения различных задач по исследованию и мониторингу морских акваторий. Рассмотрена специфика передачи данных в подводном акустическом канале. Описаны эффекты, возникающие вследствие низкой скорости распространения звука в подводной среде. Указана возможность искажений вследствие многолучевого распространения*

и доплеровского эффекта. Представлен обзор существующих подводных акустических модемов, в котором выделены их основные характеристики, такие как частотный диапазон, дальность действия, скорость передачи данных, тип модуляции и др. Показано, что одними из наиболее важных параметров, определяющих тактико-технические характеристики модемов, являются дальность действия и скорость передачи данных. Выявлена эмпирическая зависимость скорости передачи данных от дистанции. Приводится максимальная на сегодняшний день скорость передачи данных в подводном акустическом канале. Подчеркивается, что приведенные производителями данные соответствуют случаю идеального канала. Отмечены лучшие по приведенным характеристикам производители. Рассмотрены особенности наиболее распространенных типов модуляции. Подробно описана модуляция по технологии Sweep Spread Carrier, позволяющая бороться с эффектом многолучевого распространения и учитывать доплеровское смещение при движении абонентов гидроакустической сети. Рассмотрена технология расширения спектра. Показано, что применение модуляции по технологии расширения спектра позволяет повысить помехоустойчивость гидроакустических модемов. Подчеркивается необходимость формализации расчета соотношения сигнал – шум для гидроакустического канала передачи данных. Определены перспективы развития технологии передачи данных с использованием гидроакустических модемов.

*Ключевые слова:* гидроакустический модем, подводный робототехнический комплекс, скорость передачи данных, дальность действия.

**Для цитирования:**

Шарафутдинова Т. К. Сравнительный анализ промышленных гидроакустических модемов / Т. К. Шарафутдинова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 832–841. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-832-841.

### **Введение (Introduction)**

В настоящее время подводная робототехника является быстро развивающейся областью прикладной науки и техники. Подводные робототехнические комплексы, предназначенные для решения различных задач по исследованию и мониторингу морских акваторий, могут быть использованы для обследования подводных объектов и локальных районов дна, батиметрической съемки, океанографических исследований и геологической разведки морского дна, поиска затонувших объектов, экологического мониторинга и других работ [1]–[3]. В подобного рода комплексах для передачи данных применяют гидроакустические модемы.

Разработка архитектуры и протоколов обмена в системах, использующих гидроакустический канал связи, является актуальной прикладной задачей. Ключевыми параметрами, которые в значительной мере определяют тактико-технические характеристики подводных робототехнических комплексов, являются дальность действия и скорость передачи данных используемого каналобразующего оборудования.

*Целью работы* является сравнительный анализ промышленных гидроакустических модемов и выявление эмпирических зависимостей скорости передачи данных от дальности действия для наиболее распространенных типов модуляции. Гидроакустические модемы условно можно разделить на две категории в зависимости от их рабочих частот: низкочастотные и высокочастотные (рис. 1). Низкочастотные модемы используются преимущественно на больших дистанциях связи в низком частотном диапазоне, что приводит к низкой скорости передачи данных. Высокочастотные модемы обеспечивают широкую полосу частот и большие скорости, однако высокочастотные колебания быстрее затухают при распространении в водной среде. Для того чтобы увеличить дальность действия гидроакустического модема, необходимо понизить рабочую частоту, вследствие чего будет сужаться доступная полоса частот.

В работе [4] приводится доказательство того, что расширение радиуса действия модемов при одновременном повышении скорости обмена (или хотя бы сохранение скорости обмена на достаточном уровне) возможно лишь за счет увеличения числа гидроакустических модемов (узлов гидроакустической сети), образующих сеть подводной связи и работающих на сравнительно высоких частотах.



Рис. 1. Две категории модемов

На этапе разработки протоколов обмена и проектирования архитектуры наличие эмпирических описаний функциональной зависимости скорости передачи как функции от расстояния позволяет существенным образом упростить процесс системной интеграции и оптимизации.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Предлагаемое исследование содержит результаты анализа современного уровня развития технологии передачи данных с использованием гидроакустических модемов. Приведены характеристики промышленных гидроакустических модемов следующих производителей: LinkQuest<sup>1</sup>, DSPComm<sup>2</sup>, EvoLogics<sup>3</sup>, Unavlab<sup>4</sup>, Teledyne Benthos<sup>5</sup>, WHOI<sup>6</sup>, Aquasent и др. [4]–[6]. Эти данные были использованы для сравнительного анализа влияния используемого типа модуляции на зависимость: *скорость – дальность*. Кроме того, были получены универсальные эмпирические описания функциональной зависимости скорости передачи данных как функции от дальности для всего диапазона используемых в настоящее время на практике решений.

В силу актуальности направления известно большое количество научно-исследовательских разработок [7]–[10], которые доводятся, в лучшем случае, до уровня создания опытных образцов. В соответствии с поставленной задачей в предлагаемой статье рассматриваются параметры только промышленных модемов.

### Результаты (Results)

В таблице приведены данные по гидроакустическим модемам различных производителей, откуда следует, что производители модемов не приводят данные по отношению сигнал/шум (Signal to Noise Ratio — SNR) для указанных ранее моделей. Таким образом, данные характеристики следует интерпретировать для случая идеального канала. Расстояние и скорость передачи данных, указанные для модемов, являются максимальными расстоянием и скоростью, достижимыми в идеальных условиях. Тем не менее табличные данные являются полезными в качестве «стартовой точки» для сравнительного анализа используемых, а значит, и проверенных практикой решений.

<sup>1</sup> LinkQuest, Inc. Underwater acoustic modems. URL: <https://www.link-quest.com/html/models1.htm>.

<sup>2</sup> DSPComm devices features. URL: <https://www.dspcommgen2.com/aquacomm-underwater-wireless-modem>.

<sup>3</sup> EvoLogics acoustic Modems features. URL: <https://evologics.de/acoustic-modems>.

<sup>4</sup> UnavLab. Передача данных под водой. URL: <https://www.unavlab.com/produktsiya/peredacha-dannyh-pod-vodoj>.

<sup>5</sup> Acoustic Communications. URL: <http://www.teledynemarine.com/acoustic-modems>.

<sup>6</sup> Woods Hole Oceanographic Institution. URL: <http://acomms.whoi.edu/micro-modem>.

**Технические характеристики гидроакустических модемов**

Производитель, модель (страна)	Частотный диапазон, кГц	Дальность передачи, м	Скорость передачи, кбит/с	Потребляемая мощность, Вт	Модуляция
<b>LinkQuest (США)</b>					
UWM1000	26,77–44,62	350	19,2	TM 1–2; RM 0,75; SM 0,008	BASS
UWM2000	26,77–44,62	1500	19,2	TM 2–8; RM 0,8; SM 0,008	
UWM2000H	26,77–44,62	1200	17,8	TM 2–8; RM 0,8; SM 0,008	
UWM2200	53,55–89,25	1000	38,4	TM 6; RM 1; SM 0,012	
UWM3000	7,5–12,5	3000	5	TM 3–12; RM 0,8; SM 0,008	
UWM4000	12,75–21,25	4000	9,6	TM 7; RM 0,8; SM 0,008	
UWM10000	7,5–12,5	10000	5	TM 40; RM 0,9; SM 0,009	
<b>Aquasent (США)</b>					
AM-AUV	21–27	5000	0,375	TM 25; RM 0,8; SM 0,12	OFDM
AM-D2000	9–15	5000	0,750		
AM-OFDM-13A	21–27	5000	1,5		
<b>EvoLogics (Германия)</b>					
S2C M HS	120–180	300	62,5	TM 8.5; RM 0.8; SM 0,005	S2C
S2C R 48/78	48–78	1000	31,2	TM 60; RM 0,8; SM 0,0025	
S2C R 42/65	42–65	1000	31,2	TM 40; RM 0,8; SM 0,0025	
S2C R 18/34	18–34	3500	13,9	TM 65; RM 0,8; SM 0,0025	
S2C R 15/27	15–27	6000	9,2	TM 65; RM 0,8; SM 0,0025	
S2C R 12/24	13–24	6000	9,2	TM 57; RM 0,8; SM 0,0025	
S2C R 7/17	7–17	8000	6,9	TM 45; RM 0,8; SM 0,0025	
<b>Unavlab (Россия)</b>					
uWave	10–30	1000	0,078	TM 6; RM 0,33	–
Redline	5–15	8000	0,080	TM 10; RM 0,4	
RedGTR	5–15	8000	–	TM 25; RM 0,33	
<b>DSPComm (Великобритания)</b>					
Aquacomm	16–30	5000	0,48	TM 24; RM 2,4; SM 0,150	DSSS/ OFDM
Aquacomm Gen2	16–30	8000	1	TM 60; RM 6; SM 0,02	
<b>Teledyne Benthos (США)</b>					
ATM-900 Series	9–14 (LF)	2000–6000	0,08 (FHSS)	TM 20; RM 0,72; SM 0,012	FHSS, MFSK, PSK
	16–21 (MF)	2000–6000	0,14–2,4 (MFSK)	TM 28; RM 0,72; SM 0,012	
	22–27 (Band C)	2000–6000	2,65–15,36 (PSK)	TM 30; RM 0,72; SM 0,012	
<b>WHOI (США)</b>					
Micron Modem	20–28	500	0,04	TM 7,92; RM 0,72	FH / FSK

Примечания: TM — Transmit Mode — режим передачи; RM — Receive Mode — режим приема; SM — Sleep Mode — спящий режим.

Характеристики (скорость / дальность) зависят от следующих факторов: состояния среды; наличия шума; протоколов, применяемых на различных уровнях; типа используемой модуляции на физическом уровне и др. Водная среда как среда передачи накладывает ряд существенных ограничений на доступные для использования максимальные частоты. При дальности масштаба более 1 км такое ограничение частоты наблюдается на уровне  $F_{\max} < 50$  кГц. Это связано, в первую очередь, с существенным рассеянием сигнала с повышением частоты, что приводит к наличию ограничений на максимально достижимые даже в теории скорости передачи данных. Однако для ряда практически важных применений не требуется большой дальности. Это потенциально открывает возможность увеличения частоты и, соответственно, скорости передачи данных. Промышленный модем этого класса S2C M HS (EvoLogics) использует частоты 120–180 кГц, обеспечивая скорость передачи данных 62,5 кБит/с на расстоянии 300 м.

Один из ведущих американских производителей LinkQuest для передачи данных со скоростью до 38,4 кбит/с на расстоянии 1 км использует в модемах UWM2200 частоты 53,55–89,25 кГц. На рис. 2 приведена зависимость *скорость – дальность* для различных типов модуляции.

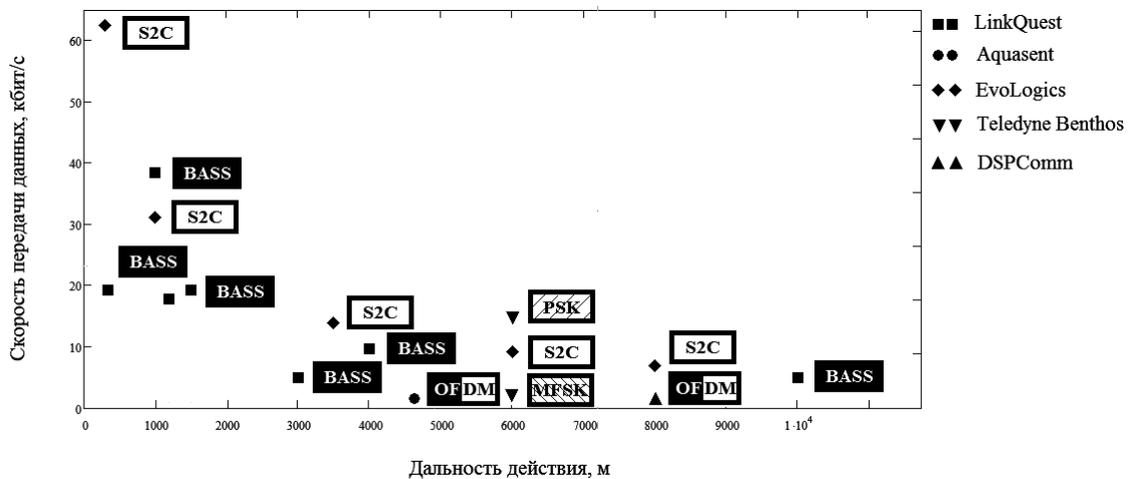


Рис. 2. Соотношение между скоростью передачи данных и дальностью действия при различных типах модуляции

Данные, приведенные в таблице и на рис. 2, были обработаны с целью получения эмпирических зависимостей. По известным точкам была выполнена аппроксимация для двух типов модуляции S2C и BASS производителей EvoLogics и LinkQuest соответственно (рис. 3).

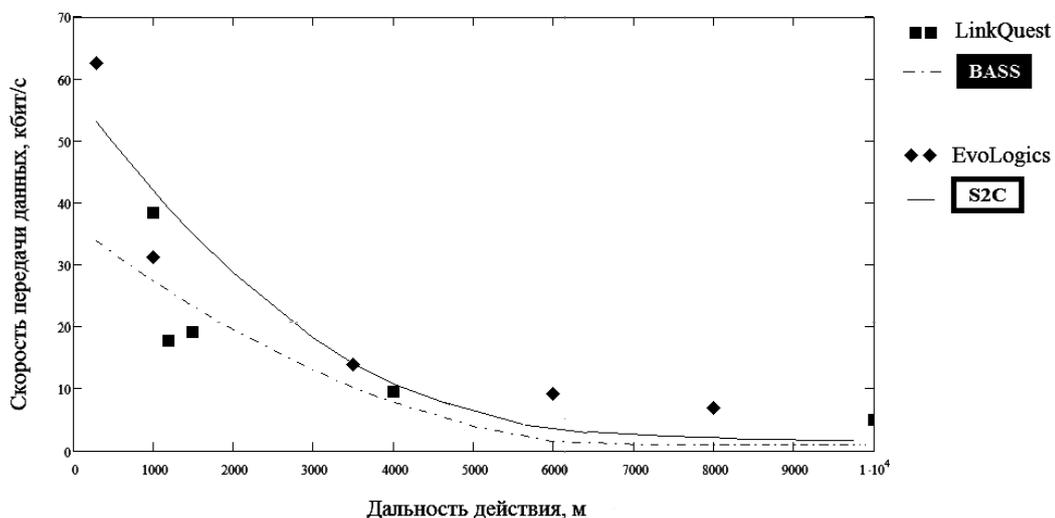


Рис. 3. Зависимость скорости передачи данных от дальности действия для модемов с модуляцией S2C и BASS

Аппроксимация позволяет более наглядно показать зависимость скорости передачи данных от дальности действия модемов. Полученные характеристики подтверждают эмпирическое правило: скорость передачи данных уменьшается приблизительно на 2–5 кбит/с на расстоянии, равном 1 км. При этом максимально достигнутая скорость передачи данных составляет 62,5 кбит/с.

При этом следует отметить, что в приведенных на рис. 3 зависимостях не учитываются отношения сигнал / шум и поэтому они относятся к случаю идеального канала. Скорость передачи данных напрямую зависит от свойств окружающей среды: более высокий уровень шума, более высокая многолучевость, и, как следствие, более низкая скорость передачи данных.

### Обсуждение (Discussion)

Как следует из рис. 2, наилучшие соотношения *скорость – дальность* имеют модемы производителей EvoLogics и LinkQuest. Представляется целесообразным рассмотреть их особенности. В модемах EvoLogics на физическом уровне используется модуляция по технологии S2C (Sweep Spread Carrier). Технология частотной развертки несущей подразумевает использование сигнала, известного в русскоязычной технической литературе под названием *сигнал с линейной частотной модуляцией*.

Модуляция S2C строится на бионических принципах коммуникации дельфинов, вся совокупность акустической сигнализации которых может быть разделена на три категории:

- 1) широкополосные щелчки (Clicks), излучаемые, как правило, сериями;
- 2) тональные сигналы (свисты — Whistles);
- 3) импульсно-тональные сигналы (Burst-Pulses).

В работе [11] показано, что «свисты» представляют собой узкополосные частотно-модулированные сигналы длительностью до нескольких секунд, частота их основного тона обычно находится в пределах 3–25 кГц.

Запатентованная модуляция S2C [12] предназначена для борьбы с проблемой многолучевого распространения в подводном акустическом канале. Эта проблема возникает при передаче через неоднородные среды, в которых отправленный сигнал может отражаться от различных поверхностей и / или искажаться либо рассеиваться на ее границах. В неоднородной среде сигнал распространяется не только по прямому пути, но и при переотражении от объектов, т. е. более длинными путями.

Многолучевое распространение может вызывать ряд нежелательных эффектов. Сигналы, доходя до приемника разными путями, будут испытывать, соответственно, разные временные задержки. Таким образом, каждый из компонентов многолучевого распространения вносит свой «вклад» в приемник, где они перекрываются. Подобное перекрытие компонентов может привести к искажениям, а в наиболее неблагоприятном случае — к потере информации.

Особенность частотной модуляции заключается в использовании импульсных сигналов, несущая частота которых в течение определенной ширины импульса непрерывно изменяется в определенном диапазоне (рис. 4). Такие сигналы обеспечивают благоприятное распределение энергии в полосе пропускания, что делает их устойчивыми к помехам, способствует хорошему распознаванию и улучшению отношения сигнал / шум [13].

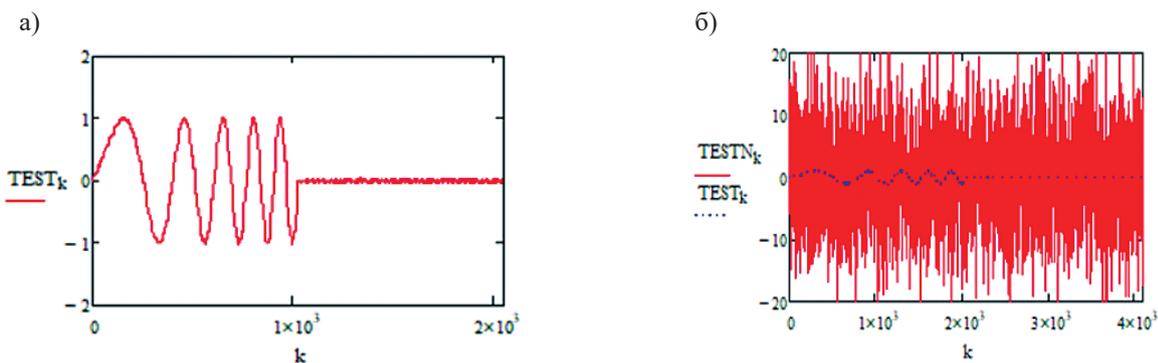


Рис. 4. Эталонный (а) и зашумленный (б) сигнал с линейной частотной модуляцией

Метод S2C дополнительно предполагает возможность распознавания и анализа доплеровского сдвига путем измерения отклонения преобразованной несущей частоты от ожидаемого номинального значения. Такая конфигурация особенно полезна для связи между быстро движущимися абонентами гидроакустической связи. Данный метод обеспечивает значительное улучшение обработки, позволяя четко разделить появление акустических волн при многолучевом распространении за счет преобразования их временных задержек в перераспределение частот.

Основная важная особенность рассматриваемого метода заключается в том, что фильтрация происходит не во времени, а в частотной области. Используя свойство распространения акустических сигналов под водой с относительно низкой скоростью, этот метод позволяет распределить все приходы многолучевого распространения в частотно-временной области путем преобразования их временных задержек в частотные перераспределения при условии применения достаточно крутых разверток.

В модемах LinkQuest используется запатентованная технология BASS (Broadband Acoustic Spread Spectrum). Информация о данном типе модуляции в открытой печати не приводится. Для возможности оценки деталей рассмотрим описание технологии Spread Spectrum как более общего класса методов, к которому относится BASS. Технология расширения спектра (Spread Spectrum) — это класс методов передачи одного сигнала с использованием относительно широкого сегмента спектра. В данной технологии сигнал занимает полосу частот существенно большую, чем необходимо для передачи информации с данной скоростью при использовании данного типа модуляции. Непосредственно расширение спектра производится с помощью некоторого расширяющего кода. В приемнике происходит обратное сужение спектра с использованием синхронизированной копии расширяющего кода [14]. Данная технология имеет ряд важных преимуществ по сравнению с другими типами связи, которые используют единственный узкий канал. Поскольку сигналы работают в относительно широкой полосе частот, они не чувствительны к узкополосным помехам. Неавторизованному пользователю может быть чрезвычайно сложно перехватить и декодировать содержимое сигнала. Также технология расширения спектра устойчива к многолучевому распространению.

Компанией LinkQuest представлена линейка устройств с различными параметрами дальности действия и полосами занимаемых частот. Скорость передачи данных этих модемов достигает значения 38,4 кбит/с. Максимальная дальность действия 10 км достигается в модеме UWM10000 при скорости передачи данных 5 кбит/с. В модемах имеется функция автоматической адаптации скорости. Несмотря на то, что модем работает со стандартной высокой скоростью передачи данных, он автоматически переключается на более низкую скорость передачи данных в условиях помех. Когда шумовые условия улучшаются, модем снова переключается на высокую скорость передачи данных [15].

### Заключение (Conclusion)

Сравнительный анализ акустических модемов показывает, что производительность системы зависит от соответствующих типов модуляции, аппаратной реализации, рабочего диапазона частот и потребляемой мощности. Коммерческие модели могут достигать большой дальности действия с высоким потреблением энергии, что, как следствие, оказывает влияние на размеры устройства. Модели с низкой скоростью передачи данных, как правило, имеют меньшие размеры и легко могут быть установлены на подводных роботах. Таким образом, приведенные данные позволяют утверждать следующее:

- в настоящее время наилучшее соотношение *скорость – дальность* обеспечивают гидроакустические модемы производителей EvoLogics и LinkQuest;
- лучшими и проверенным на практике являются модуляции S2C и BASS;
- эмпирическое правило для идеального канала: скорость передачи данных по гидроакустическому каналу уменьшается приблизительно на 2–5 кбит/с на каждый километр дальности при максимальной достигнутой в настоящее время скорости передачи данных, составляющей 62,5 кбит/с. При использовании предлагаемого эмпирического правила для разрабатываемых гидроакустических

модемов следует учитывать ряд существенных ограничений. Важно, что предельная дальность передачи данных существенным образом зависит от соотношения SNR.

В таблице (с. 835) приведены данные производителей, которые не предоставляют информацию об условиях тестирования. В этой ситуации естественно считать, что приведенные данные соответствуют передаче по идеальному каналу с соотношением  $SNR \gg 1$ . Следует отметить, что для заданного уровня шумов увеличение дальности обеспечивается при увеличении мощности для передачи сигнала, но это относится к вновь разрабатываемой каналообразующей аппаратуре. Кроме того, скорость передачи данных в цифровом формате зависит от соотношения BER (Bit Error Rate) — параметра, оказывающего существенное влияние на реализацию транспортного уровня протокола: передачу сигнала с контролем целостности данных, подтверждением, перезапросом и т. д.

Представленные в исследовании данные позволяют утверждать, что для создания отечественной гидроакустической аппаратуры в настоящее время актуальными научно-техническими задачами являются следующие:

- разработка и формализация методики расчета соотношения *сигнал – шум* для гидроакустического канала передачи данных;
- создание методики и стендового оборудования для тестирования;
- разработка безразмерных моделей передачи данных, обеспечивающих возможность сокращения размеров стендового оборудования за счет проведения тестов на малых уровнях используемой мощности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубченко Э. С. Перспективы использования автономных подводных необитаемых аппаратов для обеспечения ВМФ гидрографической и океанологической информацией / Э. С. Зубченко, А. М. Шарков // Навигация и гидрография. — 2014. — № 37. — С. 59–65.
2. Инзарцев А. В. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике / А. В. Инзарцев [и др.] // Подводные исследования и робототехника. — 2007. — № 2(4). — С. 5–14.
3. Быкова В. С. Стенд для отработки системы управления автономного необитаемого подводного аппарата / В. С. Быкова [и др.] // Материалы конференции «Управление в морских системах» (УМС-2020). 13-я мультиконференция по проблемам управления. — СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. — С. 42–44.
4. Кебкал К. Г. Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования / К. Г. Кебкал, А. И. Машонин, Н. В. Мороз // Гирроскопия и навигация. — 2019. — Т. 27. — № 2 (105). — С. 106–135. DOI 10.17285/0869–7035.2018.27.2.106–135.
5. Пат. 2655702 Российская Федерация, МПК H04R 1/44. Гидроакустическое устройство / А. В. Дикарев, С. М. Дмитриев; заяв. и патентообл. ООО «Лаборатория подводной связи и навигации». — № 2017110037; заявл. 27.03.2017; опубл. 29.05.2018. Бюл. № 16. — 10 с.
6. Annalakshmi G. Underwater Acoustic Modem — Challenges, Technology and Applications — A Review Survey / G. Annalakshmi, M. Sakthivel Murugan // Oceanography & Fisheries Open Access Journal. — 2017. — Vol. 2. — Is. 4. — Pp. 60–69. DOI: 10.19080/OFOAJ.2017.02.555592.
7. Benson B. Design of a low-cost underwater acoustic modem / B. Benson, Y. Li, B. Faunce, K. Domond, D. Kimball, C. Schurgers, R. Kastner // IEEE Embedded Systems Letters. — 2010. — Vol. 2. — Is. 3. — Pp. 58–61. DOI: 10.1109/LES.2010.2050191.
8. Sendra S. Underwater wireless communications in freshwater at 2.4 GHz / S. Sendra, J. Lloret, J. J. Rodrigues, J. M. Aguiar // IEEE Communications Letters. — 2013. — Vol. 17. — Is. 9. — Pp. 1794–1797. DOI: 10.1109/LCOMM.2013.072313.131214.
9. Вершинин А. С. Сравнительный анализ гидроакустических модемов / А. С. Вершинин // Молодой ученый. — 2015. — № 12 (92). — С. 156–161.
10. Demirors E. A high-rate software-defined underwater acoustic modem with real-time adaptation capabilities / E. Demirors, G. Sklivantis, G. E. Santagati, T. Melodia, S. N. Batalama // IEEE Access. — 2018. — Vol. 6. — Pp. 18602–18615. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2815026.
11. Агафонов А. В. Свисты и импульсно-тональные сигналы: две системы акустической коммуникации афалин: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.10: защищена 15.02.2018; утв. 10.01.2018 / Александр Владиславович Агафонов. — М.: ФГБУ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, 2017. — 178 с.

12. Pat. 6985749 B2 United States, H04B1/707, H04B14/026, H04L1/04, H04L25/4902, H04L27/10, H04L27/32, H04L5/02, H04B2001/6912. Method and devices for transmitting and receiving information / R. Bannash, K. Kebkal. — US20030022651A1; Declared 30.01.2003; publ. 10 Jan. 2006.

13. *Kebkal K. G.* Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation / K. G. Kebkal, R. Bannasch // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 2002. — Vol. 112. — Is. 5. — Pp. 2043–2052. DOI: 10.1121/1.1504855.

14. *Сергиенко А. Б.* Цифровая связь / А. Б. Сергиенко. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. — 165 с.

15. *Yu X.* Wireline Quality Underwater Wireless Communication Using High Speed Acoustic Modems / X. Yu // *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37158)*. — IEEE, 2000. — Vol. 1. — Pp. 417–422. DOI: 10.1109/OCEANS.2000.881294.

## REFERENCES

1. Zubchenko, E. S., and A. M. Sharkov. “Perspektivy ispol’zovaniya avtonomnykh podvodnykh neobitaemykh apparatov dlya obespecheniya VMF gidrograficheskoy i okeanologicheskoy informaciej.” *Navigaciya i gidrografiya* 37 (2014): 59–65.

2. Inzartsev, A. V., A. V. Kamornyi, O. Yu. L’vov, Yu. V. Matvienko, and N. I. Rylov. “Primenenie avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata dlya nauchnykh issledovaniy v Arktike.” *Podvodnye issledovaniya i robotekhnika* 2(4) (2007): 5–14.

3. Bykova, V. S., I. V. Pashkevich, L. A. Martynova, and A. I. Mashonin. “Stend for testing the control system of an autonomous unmanned underwater vehicle.” *Materialy konferentsii «Upravlenie v morskikh sistemakh» (UMS-2020). 13-ya mul’तिकонференциya po problemam upravleniya*. SPb.: “Kontsern “Tsentral’nyi nauchno-issledovatel’skii institut “Elektroprigor”, 2020. 42–44.

4. Kebkal, K. G., A. I. Mashoshin, and N. V. Morozs. “Solutions for underwater communication and positioning network development.” *Gyroscopy and Navigation* 2(105) (2019): 106–135. DOI: 10.17285/0869–7035.2018.27.2.106–135.

5. Dikarev, A. V., and S. M. Dmitriev. RU 2 655 702, IPC H04R 1/44. Gidroakusticheskoe ustrojstvo. Russian Federation, assignee. Publ. 29 May 2018.

6. Annalakshmi, G., and S. Sakthivel Murugan. “Underwater Acoustic Modem-Challenges, Technology and Applications-A Review Survey.” *Oceanography & Fisheries Open Access Journal* 2.4 (2017): 60–69. DOI: 10.19080/OFOAJ.2017.02.555592.

7. Benson, Bridget, Ying Li, Brian Faunce, Kenneth Domond, Don Kimball, Curt Schurgers, and Ryan Kastner. “Design of a low-cost underwater acoustic modem.” *IEEE Embedded Systems Letters* 2.3 (2010): 58–61. DOI: 10.1109/LES.2010.2050191.

8. Sendra, Sandra, Jaime Lloret, Joel J. P. C. Rodrigues, and Javier M. Aguiar. “Underwater wireless communications in freshwater at 2.4 GHz.” *IEEE Communications Letters* 17.9 (2013): 1794–1797. DOI: 10.1109/LCOMM.2013.072313.131214.

9. Vershinin, A. S. “Svravnitel’nyj analiz gidroakusticheskikh modemov.” *Young Scientist* 12(92) (2015): 156–161.

10. Demirors, Emrecan, George Sklivanitis, G. Enrico Santagati, Tommaso Melodia, and Stella N. Batalama. “A high-rate software-defined underwater acoustic modem with real-time adaptation capabilities.” *IEEE Access* 6 (2018): 18602–18615. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2815026.

11. Agafonov, A. V. *Svisty i impul’sno-tonal’nye signaly: dve sistemy akusticheskoy kommunikacii afalin*. PhD diss. M.: FGBU Institut okeanologii im. P.P. Shirshova RAN, 2017.

12. Bannash, R., and K. Kebkal. US 6985749 B2, IPC H04B1/707, H04B14/026, H04L1/04, H04L25/4902, H04L27/10, H04L27/32, H04L5/02, H04B2001/6912. Method and devices for transmitting and receiving information. United States, assignee. Publ 10 Jan. 2006.

13. Kebkal, Konstantin G., and Rudolf Bannasch. “Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation.” *The Journal of the Acoustical Society of America* 112.5 (2002): 2043–2052. DOI: 10.1121/1.1504855.

14. *Sergienko, A. B.* *Cifrovaya svyaz’*. SPb.: SPbGETU «LETI», 2012.

15. Yu, Xiaolong. “Wireline quality underwater wireless communication using high speed acoustic modems.” *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37158)*. Vol. 1. IEEE, 2000. 417–422. DOI: 10.1109/OCEANS.2000.881294.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Шарафутдинова Таисия Константиновна** —  
преподаватель  
ВМПИ ВУНЦ ВМФ ВМА им. Н. Г. Кузнецова  
198514, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
г. Петергоф, ул. Разводная, д. 15.  
e-mail: [sharafutdinova.taya@yandex.ru](mailto:sharafutdinova.taya@yandex.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Sharafutdinova, Taisiia K.** —  
Lecturer  
Kuznetsov Naval Academy  
15 Razvodnaya Str., St. Petersburg, Peterhof,  
198514, Russian Federation  
e-mail: [sharafutdinova.taya@yandex.ru](mailto:sharafutdinova.taya@yandex.ru)

*Статья поступила в редакцию 21 октября 2021 г.  
Received: October 21, 2021.*