

А.С. ВЕРШИНИН
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ
ДАННЫХ МАКЕТА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МОДЕМА**

Вершинин А.С. Экспериментальная оценка скорости передачи данных макета гидроакустического модема.

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ существующих в настоящее время на рынке гидроакустических модемов. Приведены теоретические расчеты дальности действия разработанного гидроакустического модема. Представлены результаты экспериментальной проверки макета гидроакустического модема в бассейне.

Ключевые слова: гидроакустический модем, эксперимент, автономный обитаемый подводный аппарат, модуляция.

Vershinin A.S. Experimental Estimation of the Data Transfer Rate of a Hydroacoustic Modem Model.

Abstract. The paper deals with a comparative analysis of the hydroacoustic modems currently available on the market. Theoretical calculations of the operating range of the developed hydroacoustic modem are given. The results of the experimental verification of the hydroacoustic modem model in the pool are presented.

Keywords: hydroultrasonic modem experiment; autonomous underwater vehicle; modulation.

1. Введение. В настоящее время в подводной среде передача информации осуществляется с помощью акустических сигналов. Актуальность создания надежной системы передачи информации в подводной среде с помощью акустических волн обусловлена бурным развитием исследований глубин мирового океана с помощью автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА). Для управления подводными аппаратами необходимо организовать беспроводную линию связи под водой, например, между надводным судном и АНПА. Для оперативного управления АНПА [1] и передачи телеметрии требуется канал передачи информации не менее нескольких Кб/сек.

Цель статьи — сделать сравнительный анализ существующих модемов и представить результаты экспериментальной оценки скорости передачи данных в гидроакустическом канале.

В настоящее время на рынке представлены гидроакустические модемы фирм Aquatec [2, 3], Sonardyne [4, 5], LinkQuest [6-10], Концерн «Океан прибор» [11-12] и др.

Возможности современных модемов позволяют передавать данные со скоростями до 48 кбит/с на дистанциях до 1-2 км (модем S2CR 40/80 фирмы EvoLogics GmbH), либо до 7-10 км со скоростью 2,5 кбит/с (UWM10000) [13]. В указанных разработках используются фазовая манипуляция, технология модуляции S2C [14], частотная модуляция и др. Заявленные скорости передачи информации достигаются при определенных условиях в гидроакустическом канале. Однако ре-

альные условия разнообразны и такие явления, как рефракция, рассеяние, реверберация и др. [15-18] приводят к тому, что акустический сигнал на приемной стороне является искаженным. Искажения принимаемого сигнала значительно снижают скорость передачи данных по гидроакустическому каналу.

Одним из путей снижения влияния искажений принимаемого сигнала на качество демодуляции является разработка алгоритмического обеспечения для цифрового синтеза сигналов в передатчике и их цифровой обработки в приемнике [19]. Таким образом, разработка перспективных и модернизация существующих отечественных гидроакустических модемов для АНПА может быть основана на синтезе сложных сигналов в передатчике и алгоритмов их обработки в приемнике. В таблице 1 приведен сравнительный анализ гидроакустических модемов.

Таблица 1. Сравнительный анализ гидроакустических модемов

Название	Страна	Модуляция	Параметры	Скорость передачи информации
AQUAmodem (Aquatec)	США	MFSK	Глубина 3000 м дальность 3 км	300 бит/с
UCOM Dir LMF (Sonardyne)	Англия	QPSK	Глубина 3000 м дальность 3 км	10 кбит/с
EvoLogics S2C M Mini	Германия	S2C	Глубина 1000-2000 м Дальность 1000-3500 м	13,9-31,2 кбит/с
Modems S2C R 12/24			Глубина 6000 м Дальность 6000 м	до 9,2 кбит/с
Develogic Modular Hydro Acoustic Modem	Германия	OFDM-MDPSK	Глубина 1950 м 6000 м Дальность 30 000 м	7000 бит/с 3400 бит/с 145 бит/с
Модем Концерн «Океан прибор» НИИ «Штиль»	Россия	OFDM	Дальность 1300 м BER 10^{-3} - 10^{-9}	13,95 кбит/с
Разрабатываемый гидроакустический модем	Россия	QAM	Глубина 6000 м дальность 30 км BER 10^{-6}	до 25,5 кбит/с (но не менее 6,5 кбит/с, зависит от гидроакустического канала)

Основными техническими характеристиками гидроакустического модема являются: дальность действия, скорость передачи данных, полоса частот излучаемых сигналов, центральная частота.

2. Расчет параметров. Для оценки ожидаемой дальности действия модема использовались статистические модели зависимости ослабления акустического сигнала с увеличением дистанции между передатчиком и приемником, а также статистические модели помех, возникающих в подводной среде. Эти модели использовались для вычисления средней дальности действия модема по совокупности различных реализаций подводного канала. Расчетная средняя дальность действия модема представлена на рисунке 1.

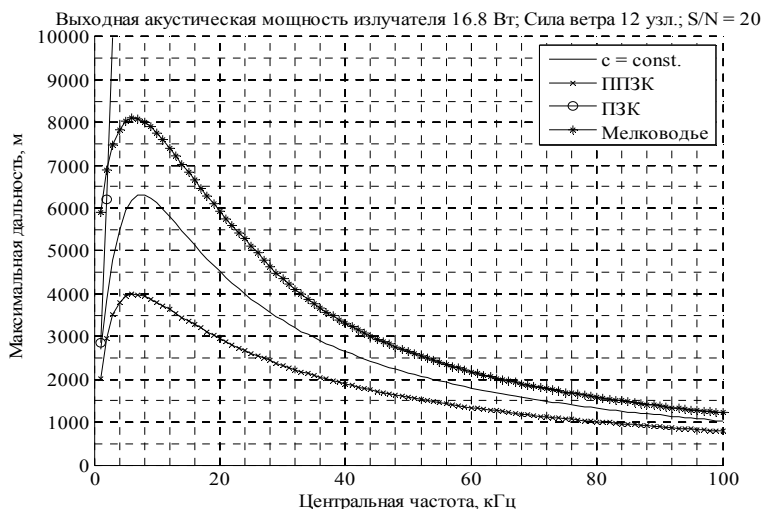


Рис. 1. Зависимость дальности от частоты

Предварительные оценки зависимости дальности действия от центральной частоты излучения сигналов показали, что для излучения акустических сигналов целесообразно использовать центральную частоту около $f_0 = f_{\text{опт}} \sim 9-11$ кГц. На основании этих оценок можно показать, что ожидаемая в среднем дальность действия подводной связи (без учета зон тени) при акустической мощности излучателя 16,8 Вт составляет:

- около 150 км в подводном звуковом канале (ПЗК).
- от 4 км до 8 км — приповерхностный звуковой канал и мелководье (ППЗК).

Для оценки ожидаемой средней скорости передачи информации выполнялись расчеты на основе соотношений, связывающих скорость передачи информации, полосу частот и скорость кодирования. Для экспериментов в открытом водоеме был использован излучатель, с помощью которого можно достичь полосы частот 10 кГц, и разработан передатчик, обеспечивающий соотношение сигнал/шум, при

котором возможно использование модуляции QAM-16 [20] (4 бита в символе), тогда скорость передачи информации = $640 \text{ несущих} * 4 \text{ бита} * 16 \text{ символов} = 40960 \text{ бит/секунду} = 40 \text{ Кб/сек}$ при полосе 10 кГц. Если учитывать помехоустойчивое кодирование со скоростью кодера $2/3$, то скорость снизится до $25,5 \text{ Кб/сек}$.

В таблице 2 приведены значения скоростей передачи информации для различной полосы частот в ППЗК.

Таблица 2. Параметры гидроакустического модема

Полоса, кГц	Модуляция, скорость кодирования	Скорость передачи информации
2	QPSK, $\frac{1}{2}$	1,2 Кбит/сек
4	QPSK, $\frac{1}{2}$	2,4 Кбит/сек
10	QPSK, $\frac{2}{3}$	8,0 Кбит/сек
10	QAM-16, $\frac{2}{3}$	25,5 Кбит/сек

3. Экспериментальная оценка. Экспериментальная оценка скорости передачи данных макета гидроакустического модема в бассейне проводилась для полосы 10 кГц. Существенным ограничением в скорости передачи данных макета гидроакустического модема является полоса пропускания излучателя.

Для экспериментальной оценки скорости передачи данных макета гидроакустического модема был разработан макет, с помощью которого проверялись используемые в модеме алгоритмы цифрового формирования и демодуляции сигналов. Для преобразования аналогового сигнала в акустические колебания использовался излучатель, основанный на пьезопленке. Схема эксперимента приведена на рисунке 2.

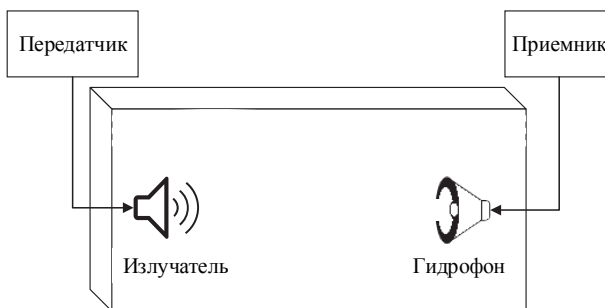


Рис. 2. Схема эксперимента

Проверка разработанного макета осуществлялась в бассейне $25 \times 8 \times 2,5$ метров. Расположение передатчика и приемника при экспериментальной проверке модема показано на рисунке 3.

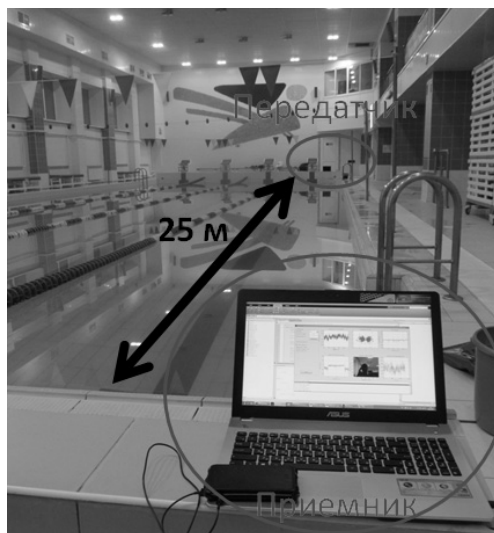


Рис. 3. Фотография эксперимента в бассейне 25 м

При проверке работоспособности модема в бассейне на расстоянии 25м получены технические характеристики, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3. Технические характеристики макета модема в бассейне на расстоянии 25м

Отношение сигнал/шум, дБ	20
Кол-во ошибок, %	0,5
Полоса сигнала, кГц	10
Модуляция	QAM-16
Скорость помехоустойчивого кодирования	2/3
Скорость передачи данных, Кбит/сек	25

Указанные в таблице 2 количественные характеристики отличаются не более чем на 5 % от результатов, полученных при моделировании работы алгоритмов гидроакустического модема. Вероятно, это обусловлено несовершенством модели гидроакустического канала, которое заключается, прежде всего, в различии значений реальных задержек и амплитуд отраженных сигналов от значений, генерируемых моделью гидроакустического канала.

4. Заключение. Испытания макета гидроакустического модема показали, что применяемые математические модели передатчика и приемника, а также гидроакустического канала позволяют с достаточной для

практики точно оценить ожидаемую скорость передачи данных и битовую вероятность ошибки.

Перспективными направлениями исследований в этой области являются: применение и синтез цифровых способов обработки сигналов, увеличение дальности связи, использование эффективных сигнально-кодовых конструкций, разработка новых принципов организации связи и т.д.

В результате проведенных исследований для разработки модема выбрана многочастотная модуляция, которая позволяет повысить скорость передачи информации в гидроакустическом канале и устранить искажения из-за многолучевого гидроакустического канала за счет цифровой обработки сигналов. Экспериментальная проверка работоспособности макета гидроакустического модема в бассейне подтвердила адекватность используемых при проектировании математических моделей.

Литература

1. *Лантин С.В.* Гидроакустическая связь как средство управления силами военно-морского флота. Состояние, перспективы развития // Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения: материалы конференции. 2005. URL: http://shtil.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59 (дата обращения: 4.04.2016).
2. *Han S.* Evaluation of underwater optical-acoustic hybrid network // China Communications. 2014. vol. 11. no. 5. pp. 49–59.
3. *Pusey G., Duncan A.* An investigation of oceanographic parameters affecting acoustic modem performance for horizontal data transmission // Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results. Greece. 2009. pp. 1303–1308.
4. *Bowen A.D.* An un-tethered roV for routine access and intervention in the deep sea // Oceans-San Diego: IEEE. 2013. pp. 1–7.
5. *Khalighi M.A.* Underwater wireless optical communication; recent advances and remaining challenges // Proceedings of IEEE 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). 2014. pp. 1–4.
6. *Yu X.* Wireline quality underwater wireless communication using high speed acoustic modems // Proceedings of IEEE Conference and Exhibition. 2000. vol. 1. pp. 417–422.
7. *Wills J., Ye W., Heidemann J.* Low-power acoustic modem for dense underwater sensor networks // Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks. 2006. pp. 79–85.
8. *Yan H.* A DSP implementation of OFDM acoustic modem // Proceedings of the second workshop on Underwater networks. 2007. pp. 89–92.
9. *Chitre M.* Underwater acoustic communications in warm shallow water channels. Ph.D. Thesis // National University Of Singapore. 2006. 149 p.
10. *Benson B.* Design of a low-cost underwater acoustic modem // ESL. 2010. vol. 2. no. 3. pp. 58–61.
11. *Кранц В.З., Сечин В.В.* О повышении скорости передачи системы связи со сложными сигналами в условиях многолучевого распространения // Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения: материалы конференции. 2007. URL: http://shtil.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59 (дата обращения: 4.04.2016).

12. *Ефимов С.Г.* Универсальный метод формирования дискретного шумоподобного сигнала с требуемыми параметрами // Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения: материалы конференции. 2003. URL: http://shtil.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59 (дата обращения: 4.04.2016).
13. *Wang J.* Data collection with multiple mobile actors in underwater sensor networks // Proceedings of IEEE 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCS'08). 2008. pp. 216–221.
14. *Toso G.* Field experiments for dynamic source routing: S2C EvoLogics modems run the SUN protocol using the DESERT Underwater libraries // Proceedings of IEEE Conference on Oceans'12. 2012. pp. 1–10.
15. *Lynch J.F.* Acoustic ducting, reflection, refraction, and dispersion by curved nonlinear internal waves in shallow water // IEEE OES. 2010. vol. 35. no 1. pp. 12–27.
16. *Sato H., Fehler M.C., Maeda T.* Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth // Berlin: Springer. 2012. 496 p.
17. *Smirnov I.P., Gurbatov S.N., Khil'ko A.A.* Formation of high-frequency surface reverberation by excitation of directed acoustic pulses in oceanic waveguides // Radiophysics and quantum electronics. 2006. vol. 49. no 5. pp. 333–343.
18. *Abraham D.A., Lyons A.P.* Reverberation envelope statistics and their dependence on sonar bandwidth and scattering patch size // IEEE OES. 2004. vol. 29. no. 1. pp. 126–137.
19. *Antoniu A.* Digital signal processing // Toronto: McGraw-Hill. 2006. 965 p.
20. *Sklyar B.* Digital communication. Theoretical Bases and Practical Application, 2nd ed. // Moscow: Williams. 2003. 1104 p.

References

1. *Lapin S.V.* *Gidroakusticheskaja svjaz' kak sredstvo upravlenija silami voenno-morskogo flota. Sostojanie, perspektivy razvitiya Gidroakusticheskaja svjaz' i gidroakusticheskie sredstva avarijno-spasatel'nogo naznachenija: materialy konferencii. 2005.* [Hydroacoustic communication as a management tool forces the Navy. Condition, prospects of development communications and hydroacoustic sonar rescue purposes: conference materials. 2005]. Available at: http://shtil.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59 (accessed: 4.04.2016). (In Russ.).
2. *Han S.* Evaluation of underwater optical-acoustic hybrid network. *China Communications*. 2014. vol. 11. no. 5. pp. 49–59.
3. *Pusey G., Duncan A.* An investigation of oceanographic parameters affecting acoustic modem performance for horizontal data transmission. Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results. Greece. 2009. pp. 1303–1308.
4. *Bowen A. D.* An un-tethered roV for routine access and intervention in the deep sea. Oceans-San Diego: IEEE. 2013. pp. 1–7.
5. *Khalighi M. A.* Underwater wireless optical communication; recent advances and remaining challenges. Proceedings of IEEE 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). 2014. pp. 1–4.
6. *Yu X.* Wireline quality underwater wireless communication using high speed acoustic modems. Proceedings of IEEE Conference and Exhibition. 2000. vol. 1. pp. 417–422.
7. *Wills J., Ye W., Heidemann J.* Low-power acoustic modem for dense underwater sensor networks. Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks. 2006. pp. 79–85.
8. *Yan H.* A DSP implementation of OFDM acoustic modem. Proceedings of the second workshop on Underwater networks. 2007. pp. 89–92.
9. *Chitre M.* Underwater acoustic communications in warm shallow water channels. Ph.D. Thesis. National University of Singapore. 2006. 149 p.

10. Benson B. Design of a low-cost underwater acoustic modem. *ESL*. 2010. vol. 2. no. 3. pp. 58–61.
11. Kranc V.Z., Sechin V.V. *O povyshenii skorosti peredachi sistemy svyazi so slozhnymi signalami v usloviyah mnogoluchevogo rasprostraneniya*. [On increasing the transmission rate of the communication system with complex signals in multipath conditions]. *Gidroakusticheskaja svyaz' i gidroakusticheskie sredstva avarijno-spasatel'nogo naznachenija: materialy konferencii* [Hydroacoustic sonar communication and means of rescue purposes: Materials Conference]. 2007. Available at: http://shtil.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59 (дата обращения: 4.04.2016).
12. Efimov S.G. *Universal'nyj metod formirovaniya diskretnogo shumopodobnogo signala s trebuemyimi parametrami* [Universal method of forming a discrete noise-like signal with the required parameters]. *Gidroakusticheskaja svyaz' i gidroakusticheskie sredstva avarijno-spasatel'nogo naznachenija: materialy konferencii* [Hydroacoustic sonar communication means rescue purposes: Materials Conference]. 2003. Available at: http://shtil.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59 (accessed: 4.04.2016). (In Russ.).
13. Wang J. Data collection with multiple mobile actors in underwater sensor networks. Proceedings of IEEE 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCS'08). 2008. pp. 216–221.
14. Toso G. Field experiments for dynamic source routing: S2C EvoLogics modems run the SUN protocol using the DESERT Underwater libraries. Proceedings of IEEE Conference on Oceans'12. 2012. pp. 1–10.
15. Lynch J.F. Acoustic ducting, reflection, refraction, and dispersion by curved nonlinear internal waves in shallow water. *IEEE OES*. 2010. vol. 35. no 1. pp. 12–27.
16. Sato H., Fehler M.C., Maeda T. Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth. Berlin: Springer. 2012. 496 p.
17. Smirnov I.P., Gurbatov S.N., Khil'ko A.A. Formation of high-frequency surface reverberation by excitation of directed acoustic pulses in oceanic waveguides. *Radiophysics and quantum electronics*. 2006. vol. 49. no 5. pp. 333–343.
18. Abraham D.A., Lyons A.P. Reverberation envelope statistics and their dependence on sonar bandwidth and scattering patch size. *IEEE OES*. 2004. vol. 29. no. 1. pp. 126–137.
19. Antoniou A. Digital signal processing. Toronto: McGraw-Hill, 2006. 965 p.
20. Sklyar B. Digital communication. Theoretical Bases and Practical Application, 2nd ed. Moscow: Williams. 2003. 1104 p.

Вершинин Александр Сергеевич — к-т техн. наук, младший научный сотрудник института неразрушающего контроля, Национальный исследовательский томский политехнический университет. Область научных интересов: радиолокация, радионавигация, цифровая обработка сигналов, антенно-фидерные устройства, адаптивные системы, системы синхронизации, системы связи. Число научных публикаций — 30. as_vershinin@mail.ru; пр. Ленина, 30, Томск, 634050; п.т.: +79138049464.

Vershinin Alexander Sergeevich — Ph.D., junior researcher of nondestructive testing institute, National Research Tomsk Polytechnic University. Research interests: radar, radio navigation, digital signal processing, antenna-feeder devices, adaptive systems, synchronization systems, communication systems. The number of publications — 30. as_vershinin@mail.ru; 30, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation; office phone: +79138049464.

Поддержка исследований. Работа выполнена за счет средств субсидии в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

Acknowledgements. The work is performed out of the grant funds in the framework of the Program for competitive growth of Tomsk Polytechnic University.

РЕФЕРАТ

Вершинин А.С. Экспериментальная оценка скорости передачи данных макета гидроакустического модема.

В настоящее время на рынке существует большое количество гидроакустических модемов, работающих на глубинах до 3000 метров и обеспечивающих скорость передачи данных достаточную для телеметрии, управления подводными аппаратами и передачи фотоснимков. Для исследования морского/океанического дна требуется погружать необитаемые подводные аппараты на глубину до 10000 метров, при этом необходимо обеспечить надежную связь с приемлемой скоростью передачи данных для управления подводным аппаратом. Добиться устойчивой связи на такой глубине довольно сложно.

Перспективными направлениями в этой области являются переход на цифровые способы обработки сигналов, увеличение дальности связи, использование эффективных сигнально-кодовых конструкций, разработка новых принципов организации связи и т.д. Проведенные проверки разработанного макета гидроакустического модема подтверждают его работоспособность.

В статье приведен сравнительный анализ существующих в настоящее время на рынке гидроакустических модемов. Приведены теоретические расчеты дальности действия разработанного гидроакустического модема. Представлены результаты экспериментальной проверки макета гидроакустического модема в бассейне.

SUMMARY

Vershinin A.S. Experimental Estimation of the Data Transfer Rate of a Hydroacoustic Modem Model.

Currently on the market there is a large number of hydroacoustic modems operating at depths of up to 3000 meters and providing a data rate sufficient for telemetry, underwater vehicles control and pictures transfer. To investigate the sea / ocean floor it is required to immerse the uninhabited underwater vehicles to a depth of 10,000 meters. Doing this, it is necessary to ensure reliable communication at reasonable data rates in order to control underwater vehicle. Achieving stable communication at such a depth is a difficult task.

The promising directions in this area include the transition to digital methods of signal processing; increasing the communication range; use of effective signal-code structures; development of new principles of organizing communication, etc. The conducted tests of the designed hydroacoustic modem model confirm its performance.

The paper presents a comparative analysis of the hydroacoustic modems currently available on the market. Theoretical calculations of the operating range of the developed modem are given. The results of the experimental verification of the hydroacoustic modem model in the pool are presented.