

РЕЗУЛЬТАТЫ ЦИФРОВОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В МЕЛКОЙ ВОДЕ МЕЖДУ СУДНОМ И ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ

К.Г. Кебкал, А.Г. Кебкал

НИЦ ВСУ «Государственный океанариум»
г. Севастополь, ул. Эпроновская 7
E-mail: konstantin.kebkal@gmail.com

Представлены результаты экспериментов по цифровой гидроакустической связи в мелководном канале (до 20 м). При передаче данных выполнялась оценка условий распространения сигнала, которые в большинстве случаев характеризовались частотно-селективными замираниями. Средняя скорость передачи данных на расстояние до 430 м составляла 800 бит/с при вероятности битовой ошибки порядка 10⁻³.

Введение. Цифровая гидроакустическая (г/а) связь составляет один из ключевых элементов развития подводной исследовательской и промышленной инфраструктуры. Для развития средств цифровой г/а связи (далее - г/а модемов) на протяжении последних 20 лет разработано множество направлений и подходов [1], каждый из которых предназначен для функционирования в специфических условиях г/а каналов практического интереса. Одно из приоритетных направлений развития г/а модемов состоит в обеспечении передачи цифровой информации в наиболее сложных каналах, в частности, высоко-динамических мелководных каналах горизонтальной топологии. Основное применение таких устройств – обмен данными между автономным подводным аппаратом (АНПА) и судном обеспечения.

В силу высокой сложности каналов такого типа производительность г/а модемов обычно характеризуется небольшими значениями [2], и их применение на практике является сильно ограниченным. По сути, на протяжении многих лет их назначение сводилось лишь к передаче коротких команд управления. В последнее время область применения цифровой г/а связи стала несколько более широкой. Например, г/а модемы Micro-Modem производства WHOI [3], г/а модемы AquaComm производства DSPComm [4], а также г/а модемы серии UWM производства LinkQuest [5] получили дополнительное применение, состоящее в передаче навигационных данных АНПА.

Однако, применение этих модемов обычно ограничивается экспериментальными задачами. Пользователи этих модемов сообщают о значительных сложностях в организации обмена между АНПА и судном [6], низкой надежности доставки (частой потере передаваемых данных) [7], недостаточно высокой скорости передачи [7], [8].

Разработка, выполненная специально для осуществления надежной и сравнительно скоростной цифровой г/а связи между АНПА и судном-носителем в мелководных высоко-динамичных каналах, породила создание г/а модемов серии S2C R производства EvoLogics, Германия. В разработке использовался альтернативный метод расширения спектра сигнала связи [9], позволяющий противостоять эффектам многолучевой интерференции и неоднородных доплеровских смещений принимаемого сигнала. В отличие от других методов, в которых передаваемый сигнал на всем протяжении или, по крайней мере, на отдельных участках характеризовался постоянным значением частоты, этот метод обеспечивал непрерывное (монотонное) изменение частоты/фазы. Благодаря этому, мгновенные частоты многолучевых компонентов принимаемого сигнала, распространяющиеся по лучам разной длины, всегда различались, что существенно ослабляло эффект их взаимного маскирования и позволяло с большей достоверностью восстанавливать искаженные параметры сигнала связи.

Следует отметить, что выполненные ранее исследования производительности таких устройств, например, при осуществлении цифровой связи между АНПА „HUGIN 1000“ и судном, а также между буксируемым объектом и судном, показали практическую возможность передавать данные с высокими скоростями, в частности 10-30 кбит/с [10]. Однако, в обоих случаях канал связи хотя и имел горизонтальную топологию, характеризовался сравнительно большими глубинами места работ и основные показатели сложности имели невысокие значения (количество многолучевых компонентов и избыточные задержки распространения были сравнительно небольшими). В этой работе выполнено исследование производительности г/а модема серии S2C R [11] в условиях существенно более сложного, мелководного канала. Кроме малой глубины, его дополнительная

особенность состояла в вертикальной стратификации летнего типа, обуславливающей значительную рефракцию и дальнейшее увеличение сложности условий связи.

Описание эксперимента. В июле 2008 года в ходе совместных экспериментов НИЦ ВСУ «Государственный океанариум», университета Technical Universität Berlin и немецкой компании Enitech GmbH в Балтийском море проведено экспериментальное исследование производительности г/а модемов в каналах такого типа.

Один из модемов размещался на борту автономного подводного аппарата „DNS Pegel“, другой на борту исследовательского судна „Professor Penck“. Оценка производительности устройства цифровой связи осуществлялась при перемещениях АНПА со скоростями 4-5 узлов.

Эффективная ширина частотной полосы г/а модема составляла 15.5 кГц при значении центральной частоты 63 кГц. Для формирования цифровых сообщений использовалась двукратная относительная фазовая манипуляция. Расширение спектра передаваемого сигнала выполнялось путем внутрисимвольной линейной частной модуляции. Таким образом, каждый символ данных содержал два вида модуляции – одну дискретную для задания цифрового значения этого символа, а вторую непрерывную для расширения спектра сигнала и обеспечения устойчивости к эффектам многолучевости и доплеровских искажений.

Поверхностный модем подключался к компьютеру-источнику данных. Он всегда инициировал сессию обмена, передавая команды управления и запросы на АНПА. Удаленный модем подключался к бортовому компьютеру-получателю, который в ответ на поступающее сообщение формировал собственный пакет данных (о статусе узлов АНПА, данные навигации, показатели бортовых сенсоров) и незамедлительно отправлял его поверхностиному модему. Таким образом, связь осуществлялась в двух направлениях: от поверхностиного модема к удаленному и наоборот. Каждый передаваемый пакет имел размер 470 бит.

При передаче оценивались характеристики канала и параметры производительности модема. Кроме того, выполнялась оценка характера воздействия канала связи на передаваемый сигнал. При оценке характеристик канала для каждого из принимае-

мых пакетов данных учитывалась максимальная избыточная задержка распространения, количество многолучевых компонентов, среднеквадратический разброс задержек распространения, ширина полосы когерентности, время когерентности, показатель целостности принимаемого сигнала. При оценке производительности модемов регистрировались такие параметры, как скорость передачи данных, дальность, выходное отношение сигнал/шум, получаемое через оценку рассеяния измеряемой фазы (информации), и, опосредовано, вероятность битовой ошибки.

Характер воздействия канала связи на передаваемый сигнал оценивался посредством сравнения ширины полосы когерентности канала связи и частотной полосы, занимаемой передаваемым сигналом.

Условия канала связи. Известно, что при связи в мелководном канале горизонтальной топологии наиболее сложный с точки зрения устойчивой передачи данных является интервал дальностей, составляющий несколько сотен метров [2, 12]. Многолучевые компоненты, будучи отраженными копиями передаваемого сигнала, содержат сравнительно много энергии и, поступая на прием, создают условия частотно-селективных замираний. Кроме того, даже при небольшом изменении местоположения приемника (в силу быстрого изменения фазовых соотношений между многолучевыми компонентами) зоны пространственной когерентности сигнала характеризуются малыми размерами. В связи с этим, при движении АНПА в мелководном канале время когерентности принимаемого сигнала обычно является также небольшим.

При проведении экспериментов АНПА перемещался на глубине 7-8 метров со скоростью 4-5 узлов и выполнял маневры по заданной траектории. Поверхностный модем опускался с дрейфующего судна на тросе и во время проведения работ находился на глубине 3 метра. Волнение не превышало 3 балла. Как следует из рисунка За дистанция связи постоянно изменялась, так, что передача выполнялись при непрерывно изменяющихся характеристиках канала. На рис.2а представлены четыре участка, на двух из которых связь осуществлялась на расстояние 340-430 м (участки между 900 и 2050 с, а также между 5300 и 6600 с), а на других двух на расстояние 180-290 м (уч-

стки между 2050 и 5300 с, а также между 6600 и 8100 с).

Как показано на рисунке 2б интервалы времени между измерениями характеристик канала на каждой из дистанций связи обычно составляло 6-12 секунд. Это время обуславливалось необходимостью поддержания онлайнового режима (путем обмена короткими служебными сообщениями).

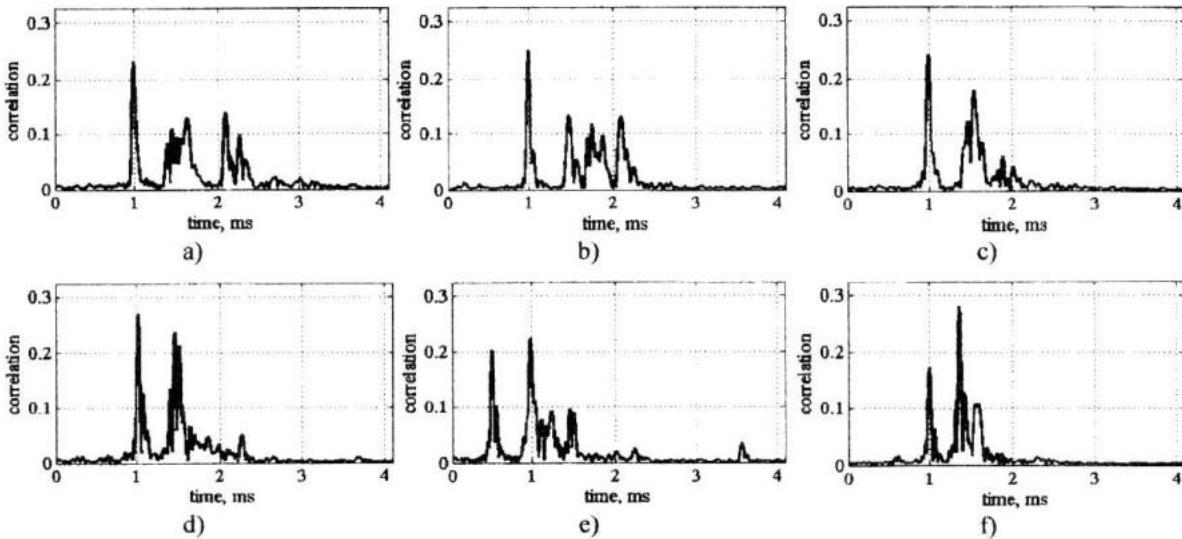


Рисунок 1 – Иллюстрация динамики канала (последовательность оценок профиля избыточной задержки)

Иллюстрация динамики канала связи во время обмена данными представлена на рисунке 1 (по горизонтальной оси – отсчеты по времени, по вертикальной – степень тесноты связи с опорным сигналом в отсчетах по уровню). Интервалы времени между оценками профиля избыточной задержки распространения составляли около 6 с (последовательность профилей на рис. 1а – рис. 1f), при этом, как следует из рисунков, профили существенно различались. Различия состояли как в продолжительности избыточной задержки распространения, так и в количестве, временной расстановке и энерговесомости каждого из лучей. Поскольку основное влияние на характеристики принимаемого сигнала оказывают наиболее энерговесомые лучи, далее при анализе характеристик канала, лучи условно делились на «значимые» и «малозначимые» (значимость луча определялась по превышению уровня -10 дБ по отношению к уровню доминирующего луча).

Как следует из рис. 2с при передаче данных на расстояния 180 ... 430 м количество значимых многолучевых компонентов являлось сравнительно большим. В подав-

ляющем большинстве случаев число таких компонентов находилось в пределах 5 ... 8. Временами их количество возрастало до 12. Максимальная задержка распространения сигнала характеризовалась быстрыми изменениями и составляла преимущественно 1 ... 4 мс (рис. 2д). Однако, следует, отметить, что максимальная избыточная задержка распространения сигнала, представленная выше и измеряемая как время между приемом первого и последнего многолучевых компонентов с уровнем не ниже -10 дБ по отношению к уровню наиболее энерговесомого (доминирующего) луча, не обязательно является наилучшим показателем сложности канала связи. Различные каналы с одинаковым значением максимальной избыточной задержки могут иметь весьма различные профили интенсивности избыточной задержки распространения сигнала внутри интервала этой задержки. Поэтому, в качестве альтернативы, для оценки сложности условий связи (в т.ч. полосы когерентности) для каждого переданного пакета данных рассчитывалось также среднеквадратическое значение разброса избыточных задержек распростране-

ния сигнала по множеству лучей. Это значение (σ_t) оценивалось как квадратный корень из второго центрального момента

функции, описывающей профиль интенсивности многолучевого распространения сигнала в канале связи.

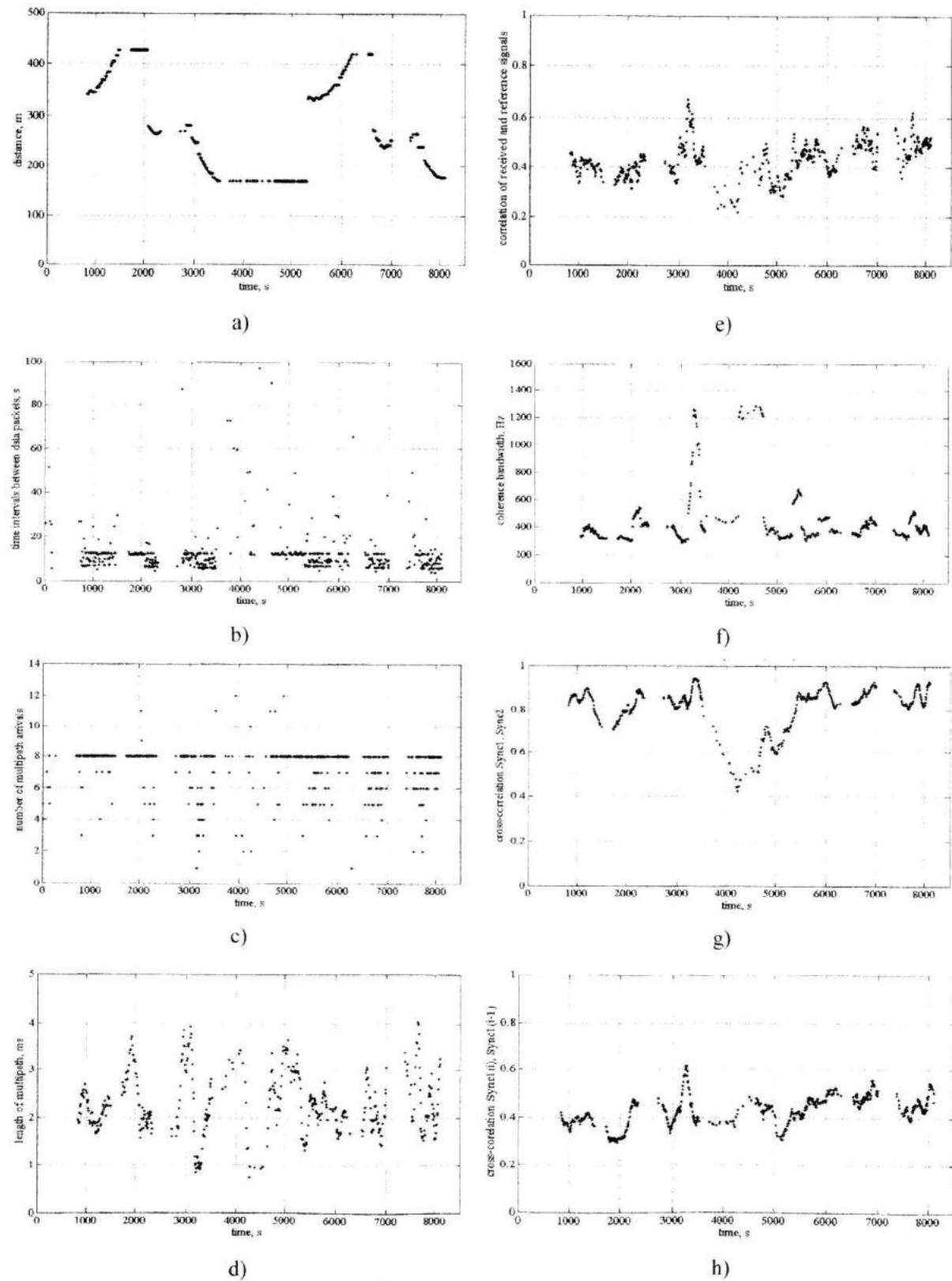


Рисунок 2 – Характеристики канала связи

Далее, с использованием σ_t , с помощью приближения $f_{ch}=1/5\sigma_t$ [13] выполнялась оценка полосы когерентности канала (рис. 2f). Как следует из рисунка, в большинстве случаев полоса когерентности лежала в пределах 300 ... 500 Гц.

Такая оценка полосы когерентности имеет большое практическое значение, поскольку может быть более показательной, чем оценка частотной эффективности, которая обычно рассчитывается производителями г/а модемов на основе максимальной скорости передачи данных, достигаемой в идеализированных каналах, характеризуемых белым шумом. Также, такая оценка может служить опорной величиной для сравнения разных моделей гидроакустических модемов, работающих в разных частотных диапазонах, использующих разные методы формирования передаваемых сигналов связи, и.т.д. (Фактически, путем сравнения минимальной частотной полосы, требуемой для передачи информационного сигнала, с шириной полосы когерентности канала связи в следующем разделе выполнена количественная оценка эффективности работы модема в заданных условиях межсимвольной интерференции и динамики характеристик канала.)

Важным показателем сложности канала связи является также показатель целостности принимаемого сигнала (оценивался через коэффициент корреляции принимаемого сигнала с опорным). Изменение целостности представлено на рис. 2e. Как следует, подавляющее большинство сигналов характеризуются невысоким коэффициентом корреляции (в большинстве случаев менее 0.5) по причине сильного «разрушения» в канале распространения.

Специальных исследований по оценке времени когерентности канала не выполнялось (т.е. времени, за которое происходит значительное изменение сигнала по отношению к своему предшественнику). Однако, по результатам измерений канала, выполняемых по поступлении на прием каждого из синхросигналов, некоторые заключения о такой оценке все же могут быть сделаны. На рис. 2g представлена динамика коэффициента корреляции между сигналами, поступающими на прием с интервалом 12 мс (передача пар синхроимпульсов обусловлена структурой секции синхронизации

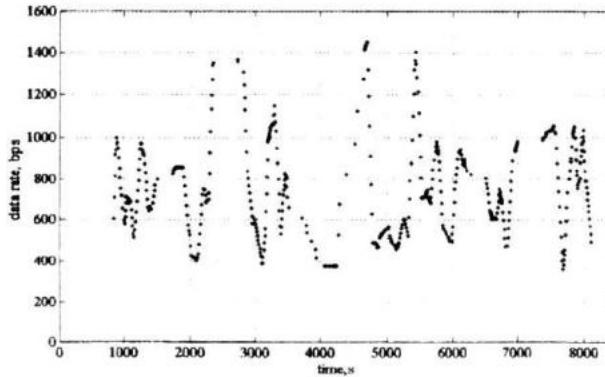
передаваемого пакета). Как видно из графика, за такое короткое время канал изменился настолько, что измеренные коэффициенты корреляции снижались до значений 0.7 ... 0.9. Дополнительно, на рис. 2h представлена динамика коэффициента корреляции между синхросигналами, поступающими на прием с интервалом 6-12 секунд (обусловлено периодом обмена служебными пакетами между АНПА и судном). Как следует из графика, степень тесноты связи между сигналами, принимаемыми с таким интервалом существенно меньше. Коэффициент корреляции между ними в подавляющем большинстве случаев лежит в пределах 0.3 ... 0.5. Тогда, также как в [14], пользуясь приближением для времени когерентности, на котором корреляция должна быть не меньше 0.5, получим оценку времени когерентности, которая в исследованном канале не превышала 6 с.

Производительность модема. В ходе эксперимента выполнено 56 попыток передачи данных, содержащих команды управления и запросы на АНПА, данные о статусе устройств АНПА, навигационные данные и показатели бортовых сенсоров. Из них зарегистрировано 9 случаев ошибки передачи (9 сообщений, квитированных как ошибочные, запрашивались приемником для повторной передачи). Основная причина ошибки состояла в сбое синхронизации в присутствии полосовой помехи. Для исключения потерь данных, встроенный алгоритм автоматической досылки поврежденных пакетов запрашивал у источника повторную передачу поврежденных пакетов. В результате, в каждом из 9 проанализированных случаев одной повторной передачи было достаточно для успешного завершения обмена. (В случае, если бы одной попытки было недостаточно, алгоритм автоматической досылки выполнял бы дальнейшие попытки доставки данных до получения подтверждения или истечения установленного пользователем разрешенного числа попыток).

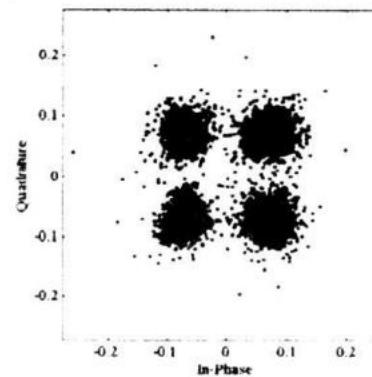
Размер единичного сообщения составлял 470 бит. Всего в результате обмена успешно доставлено 44180 бит информации. Путем наложения оценок фазы (22090 значений) выполнена визуализация рассеяния информационного параметра (фазы) и представлена на рис. 3b. Несмотря на то, что

каждое из сообщений передавалось при различающихся характеристиках канала, алгоритм адаптации скорости связи к текущим характеристикам канала обеспечивал приблизительно одинаковое соотношение между полосой когерентности канала и

значением, обратным длительности символа данных в передаваемом пакете. Благодаря такой адаптации, характер влияния канала на сигнал был подобным для всех принимаемых пакетов, что обеспечивало условия сравнимости обрабатываемых данных.



a)



b)

Рисунок 3 – Характеристики производительности

Путем оценки параметров статистического распределения, полученного по полной выборке оценок фазы, рассчитано эквивалентное выходное отношение сигнал/шум, которое составило 7.9 дБ. Для выбранного метода фазовой манипуляции ожидаемая вероятность битовой ошибки, оцененная с помощью известных зависимостей [13], и соответствующая такому отношению сигнал/шум, составляла менее 10^{-3} .

Фактическая вероятность битовой ошибки впрямую не оценивалась. Однако, на основании характеристик использованного помехозащищенного кода, в частности кода Голея (23,12), и соответствующих зависимостей (см. [13], с. 394), можно оценить порядок величины вероятности битовой ошибки. Например, на основании того, что зарегистрированный выходной поток (после исправления ошибок), имеющий длину порядка 10^4 полностью соответствовал потоку, отправляемому в канал, т.е. не содержал ни одной ошибки, вероятность ошибочного приема канального символа следует оценивать, как значительно меньшую, чем 10^{-2} (см. [13], с. 392). Очевидно, эта оценка согласуется с оценкой вероятности битовой ошибки, оцененной с помощью эквивалентного выходного отношения сигнал/шум.

На рис. 3а представлен график изменения скорости передачи данных. Скорость изменялась в широких пределах, обычно в

пределах 500 ... 1500 бит/с, в среднем составила около 800 бит/с. При сравнении с данными упомянутых выше исследований [6], [7], [8] для сложных динамических каналов наибольшего практического интереса этот результат в несколько раз превышает ранее достигнутый.

Следует обратить также внимание на результаты анализа полученной скорости передачи данных с привязкой к показателям сложности канала. Известно [15], что одним из важнейших показателей сложности г/а канала связи является отношение среднеквадратического разброса избыточной задержки распространения многолучевого сигнала к длительности передаваемого символа данных, или, в частотных координатах, отношение ширины полосы когерентности канала к ширине частотной полосы, занимаемой информационным сигналом до расширения спектра (скоростью передачи символов данных). В проведенном эксперименте из сравнения рис.3а и рис.2f следует, что скорость передачи символов данных превышала полосу когерентности приблизительно в два раза. С одной стороны, это свидетельствует о характере воздействия канала распространения на передаваемый сигнал в виде частотно-селективных замираний. С другой, зарегистрированные значения этого отношения продемонстрировали значительное повышение производительности г/а модемов,

реализующих метод монотонного расширения спектра [11] по сравнению с устройствами связи, использующими некогерентные методы формирования сигналов связи с несущими постоянной частоты. (Как отмечалось выше, в условиях сложных динамических каналов обычно используются именно устройства связи с некогерентной обработкой).

Заключение. Исследование производительности устройств цифровой г/а связи в динамических мелководных каналах горизонтальной топологии показало возможность осуществлять надежную передачу значительных объемов данных между АНПА и судном обеспечения.

Оценочные значения скорости передачи данных составили в среднем около 800 бит/с при интенсивности битовой ошибки порядка 10^{-3} . (Применение алгоритмов блочного кодирования, в частности кода Голея (23,12) обеспечивало надежное восстановление поврежденных битов.)

Реализация метода формирования сигнала связи, основанного на монотонном расширении спектра, является предпочтительным для организации устойчивого обмена данными в г/а каналах повышенной или высокой сложности.

Л и т е р а т у р а

1. Кебкал К.Г. Современные технологии цифровой гидроакустической связи для использования в гидроакустических каналах повышенной сложности. Международная конференция по подводным технологиям SubSeaTech2009, Июнь 2009, Санкт-Петербург, Россия.
2. Kilfoyle D. B., Baggeroer A.B. The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry IEEE Journal of Oceanic Engineering // Vol. 25, No.1. – January 2000. – P. 4 – 27.
3. Singh S., Grund M., Bingham B., Eustice R., Singh H., Freitag L. Under-water Acoustic Navigation with the WHOI Micro-Modem // IEEE Conference Proceedings OCEANS 2006 – Sept. 2006. – P. 1 – 4.
4. Jurdak R., Baldi P., Videira C.L. Software-driven sensor networks for short-range shallow water applications. // Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, The Nether-lands. Vol. 7, No. 5. – July 2009. – P. 837 – 848.

5. Yu X. Wireline quality underwater wireless communication using high speed acoustic modems. // MTS/IEEE Conference Proceedings OCEANS 2000. Vol. 1. – Sept. 2000. – P. 417 – 422.

6. Brignone L., Alves J., Opderbecke J. GREX sea trials: first experiences in multiple underwater vehicle coordination based on acoustic communication. // IEEE Proceedings OCEANS'09 Bremen, Germany, May 2009.

7. Valera A., Lee P., Tan H.-P., Seah W., Liang H.. Implementation and Evaluation of Multihop ARQ for Reliable Communications in Underwater Acoustic Networks. Proceedings OCEANS'09 IEEE Bremen, Germany, May 2009.

8. Thiede C. et al. An overall Pressure Tolerant Underwater Vehicle: DNS Pegel. // IEEE Conference Proceedings OCEANS'09 Bremen, Germany, May 2009.

9. Кебкал К.Г., Кебкал А.Г., Яковлев С.Г. Метод цифровой передачи данных в горизонтально-стратифицированных подводных акустических каналах // Акустический журнал. – Т. 50, № 2. – М.: 2004. – С. 220 – 230.

10. Kebkal K., Kebkal A., Bannasch R. Performance of S2C Acoustic Modem in Horizontal Underwater Acoustic Channels. // Proceedings of the 2nd International Conference & Exhibition on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results. – Heraklion, Greece. – June 2007. – P.1351 – 1358.

11. Кебкал К.Г., Баннаш Р. Способ передачи информации и система для реализации способа. Патент WO 01/47203 A2 (PCT/EP0013033)

12. Kima S.-M., Byuna S.-H., Lima Y.-K. Experimental Analysis of Statistical Characteristics of a Very Shallow Underwater Acoustic Channel. // IEEE Proceedings OCEANS'08, Paris, France, June 2008.

13. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и применение, 2-е издание. / Пер. с англ. / Б. Скляр. – М.: Издательский дом «Вильямс» – 2003. – 1104 с.

14. Pahlavan K., Levesque A.H. Wireless Information Networks. Ch. 3, 4. John Wiley and Sons, New York, 1995.

15. Rappaport T.S. Wireless Communications. Ch. 3, 4. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1996.