

УДК 681.883.45

К.Г. Кебкал, А.Г. Кебкал

*Научно-исследовательский центр Вооруженных Сил Украины  
«Государственный океанариум», Севастополь*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ОТ СЛОЖНОСТИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

Представлены результаты экспериментов по передаче цифровой информации в мелководных гидроакустических каналах большой протяженности. Сигналы связи характеризовались монотонным расширением спектра в диапазоне 8 – 16 кГц. Экспериментальные значения номинальной скорости передачи данных составляли 4,3 – 4,7 кбит/с при вероятности битовой ошибки порядка  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$ . Достигнутая производительность позволяет утверждать о возможности устойчивого обмена данными между подводным объектом и поверхностным носителем в каналах протяженностью 4 – 6 км.

**Ключевые слова:** подводная телеметрия, цифровая связь, бескабельная подводная связь, гидроакустическая связь.

### Введение

В работах [1 – 3] разработан способ формирования гидроакустического (г/а) сигнала связи, позволяющий достигать высокой устойчивости передачи данных в условиях каналов с высоким уровнем реверберации. Посредством сигналов, характеризующихся монотонным расширением спектра, показана возможность осуществлять скоростную передачу больших объемов цифровой информации на расстоянии 4 – 5 км. В работе [4] были представлены результаты эксперимента по передаче цифровой информации в г/а каналах с высокой динамикой лучей и большой продолжительностью избыточной задержки распространения многолучевых компонентов на дистанцию связи, превышающую 6,5 км.

**Цель данной статьи** состоит в анализе производительности устройств цифровой г/а связи, реализующих способ монотонного расширения спектра передаваемого сигнала, в протяженных (горизонтальных) каналах и, при прочих равных условиях, установлении зависимости скорости передачи данных от основных (интегральных) показателей сложности канала связи.

### Экспериментальные исследования

Суть экспериментальных исследований заключалась в передаче цифровой информации в мелководных г/а каналах различной протяженности с последующим анализом производительности устройств цифровой г/а связи с использованием вычислительных средств пакета MathLab v7.

*Условия проведения эксперимента.* Экспериментальный материал получен 10 сентября 2007 и 5 августа 2006 года в открытом морском районе (внешний рейд бухты Казачья и траверз пос. Андреевка). Погодные условия были сравнимыми, во всех

экспериментах использовался один и тот же приемопередающий тракт. В первом случае, на внешнем рейде б. Казачья, глубина места работ составляла 55 – 60 м. Устройство г/а связи, подключенное к источнику данных, устанавливалось с малотоннажного плавсредства на глубине 35 м. Другое устройство, подключенное к получателю данных, устанавливалось с судна (ВМ «Почаев») на глубине 30 м. Во втором случае, на траверзе пос. Андреевка, глубина места составляла 65 – 70 м. Устройство г/а связи, подключенное к источнику данных, устанавливалось с малотоннажного плавсредства на глубине 40 м, а устройство, подключенное к получателю, устанавливалось с ВМ «Почаев» на глубине 30 м.

Максимальная дальность передачи в первом эксперименте составляла 4511 м, во втором 5690 м, и в третьем 6541 м. Работы производились в следующих условиях. Сила ветра составляла 2 – 4 м/с. Волнение 2 балла. Уровень шумов моря в месте проведения эксперимента составлял 35 – 37 дБ (в одногерцовой полосе в районе резонанса) и определялся ветром и импульсными сигналами биологического происхождения. Канал распространения сигнала характеризовался сравнительно высокой изменчивостью: из качки и дрейфа плавсредств в процессе приема и излучения заглупление устройств связи постоянно изменялось. Мгновенные скорости взаимных перемещений передающего и принимающего устройств составляли 1 – 2 м/с.

Для излучения и приема акустических сигналов использовался широкополосный пьезокерамический преобразователь ИТС1042 фирмы ИТС Transducers (США), имеющий в режиме излучения гладкую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) в полосе частот от 8 кГц до 16 кГц с неравномерностью до 6 дБ по краям АЧХ. Преобразователь имел слабо

выраженный резонанс в области 11 кГц и характеризовался ненаправленной приемоизлучающей диаграммой (с неравномерностью не более 2 дБ в районе резонансной частоты). Уровень излучения сигнала составлял 191 дБ по отношению к 1 мкПа/м.

Все устройства, входящие в состав электроакустического тракта, устанавливались в герметичном контейнере, изготовленном из алюминий-магниевого сплава. Для снижения уровня шумов преобразователь подключался непосредственно к выходу коммутатора приема-передачи, к одному из входов которого подключался вход предварительного усилителя, а ко второму - усилитель мощности. Питание усилителя мощности обеспечивалось преобразователями постоянного напряжения собственного исполнения. Основное питание +24 В подавалось по кабелю от внешнего аккумулятора, расположенного на борту плавсредства.

Для формирования сигналов излучения и обработки принятых г/а сигналов использовались переносные компьютеры на основе процессоров Intel Pentium IV. Компьютеры оснащались быстродействующими устройствами ввода-вывода аналоговой информации фирмы National Instruments. Выходной аналоговый сигнал подавался от компьютера по кабелю на вход усилителя мощности. Через коммутатор приема-передачи усиленный сигнал поступал на г/а преобразователь для излучения в воду. В качестве приемного преобразователя использовался такой же пьезокерамический излучатель, как на приеме. Сигнал с гидрофона усиливался, подвергался фильтрации и подавался на вход аналогоцифрового преобразователя. Дискретизация производилась с частотой 250 кГц. Функции устройства предварительной обработки, временной селекции, демодуляции данных и регистрации принимаемой информации выполнял такой же компьютер, как и на передающей стороне.

*Структура и параметры передаваемых сигналов.* В качестве информационных пакетов передавались бинарные последовательности, состоящие из 960 – 1920 информационных символов. Бинарные последовательности производились стандартным генератором квази-случайных чисел с фиксированными начальными условиями запуска. Символы данных формировались с использованием двукратной относительной фазовой манипуляции (ДФМ). Несущий сигнал характеризовался монотонным расширением спектра [1] и представлял собой последовательность разверток несущей (частотно-модулированных фрагментов) с линейным изменением частоты, следующих без пауз друг за другом. Частотный диапазон развертки несущей ограничивался 8 кГц снизу и 16 кГц сверху. Длительности разверток несущей, используемых в различных испытаниях, лежали в пределах 0,4 – 2 мс. Длительности символов равнялись длительностям разверток.

Поскольку передача информации производилась посредством относительной фазовой манипуляции, значение передаваемого символа определялось разностью начальных фаз соседних импульсов. Значения разностей, лежащих в пределах 0 – 90°, соответствовали символьным нулям (битовая комбинация 00), разности 90 – 180° соответствовали символьным единицам (комбинация 01), разности 180 – 270° символьным двойкам (комбинация 10), разности 270 – 360° символьным тройкам (комбинация 11).

Частотный градиент и длительность фрагмента несущей выбирались так, что наложения многолучевых компонентов текущего фрагмента с многолучевыми компонентами предыдущих фрагментов исключались или являлись незначительными. Удовлетворение этого условия позволяло устранить или ослабить межсимвольную интерференцию. Также как и в [4], для настройки параметров несущей непосредственно перед передачей данных передавалась зондирующая последовательность, по которой оценивалась структура многолучевости канала связи. Она состояла из двух сигналов с линейным изменением частоты, занимающих частоты 8 – 16 кГц, и имеющих продолжительность 2048 мкс.

*Характеристики канала.* В процессе обмена данными взаимное положение приемника и передатчика медленно изменялось. Для наблюдения за изменяющимися свойствами канала связи производилась регулярная оценка импульсного отклика. Примеры импульсного отклика представлены на рис. 1, а – в. В целом канал распространения сигнала характеризовался быстрым изменением свойств (продолжительностью и силой реверберации). При этом регистрировалась значительная флуктуация мощности многолучевых компонентов в пределах 5–8 дБ, однако временные задержки поступления многолучевых компонентов оставались стабильными в течение интервала времени, необходимого для передачи блока данных. В зависимости от дистанции связи отношение сигнал/шум на принимающей стороне составляло 14 – 17 дБ. В каждом случае девиация вокруг среднего обычно составляла 2 – 4 дБ.

На рис. 2, а, 3, а и 4, а представлены кривые изменения дистанции связи во время передачи данных. Изменение было связано с дрейфом плавсредств, с которых вывешивались устройства связи (изменения дистанции производились по задержкам распространения акустического сигнала в канале).

В первых двух экспериментах количество многолучевых компонентов изменялось в пределах от 2 до 4 (рис. 2, б, 3, б). В эксперименте по связи на 4511 м длительность избыточной задержки распространения изменялась в сторону уменьшения (рис. 2, в) от 1 мс до 700 мкс. В эксперименте по связи на 5690 м сначала происходило некоторое увеличение длительности избыточной задержки

распространения от 350 мкс до 650 мкс, а потом, на завершающем участке ее снижение до 200 мкс (рис. 3, в). Отношение сигнал/шум на принимающей стороне составляло 13 – 17 дБ.

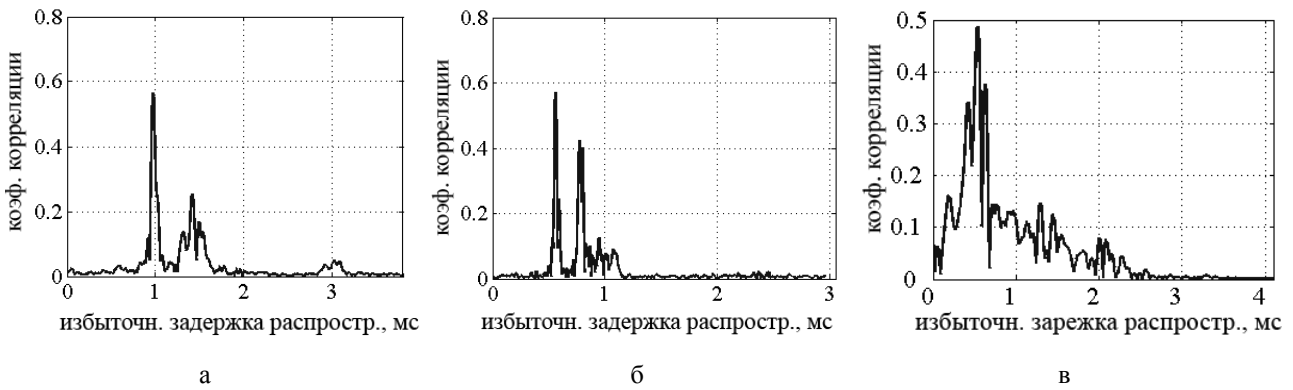


Рис. 1. Импульсный отклик канала связи

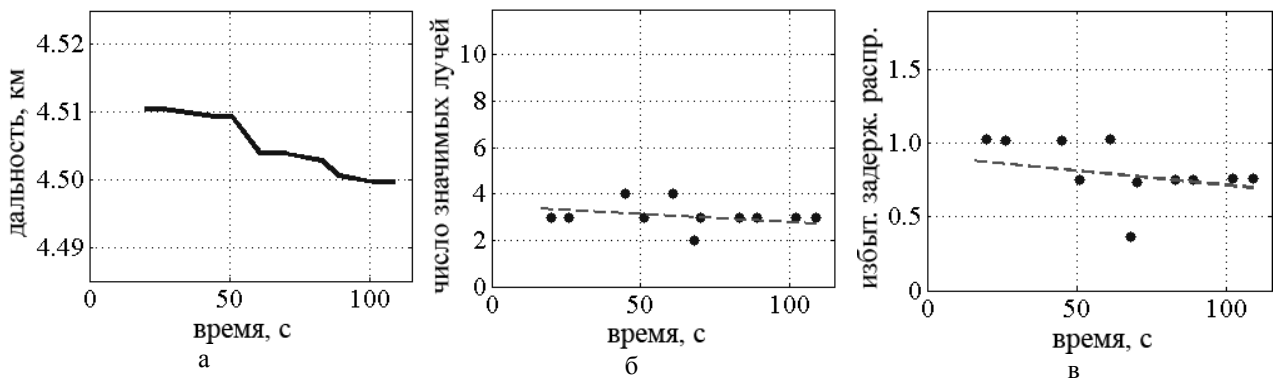


Рис. 2.

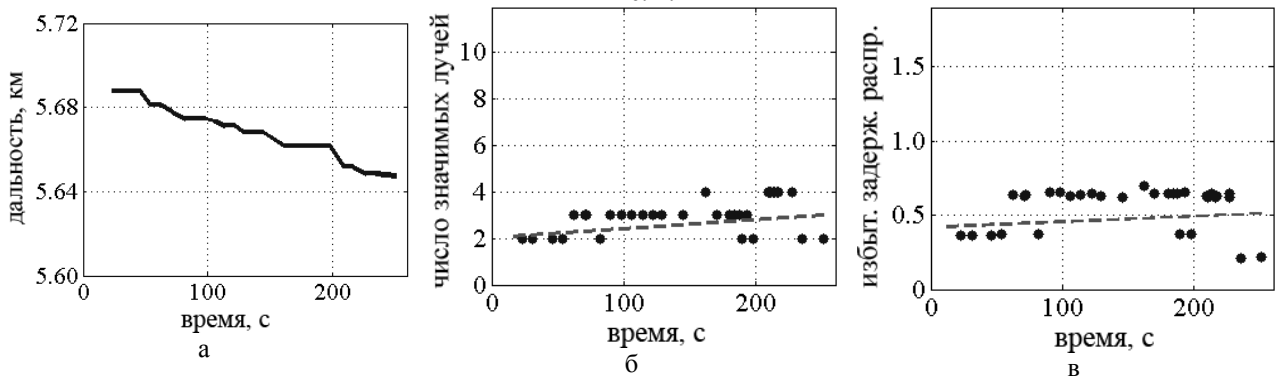


Рис. 3.

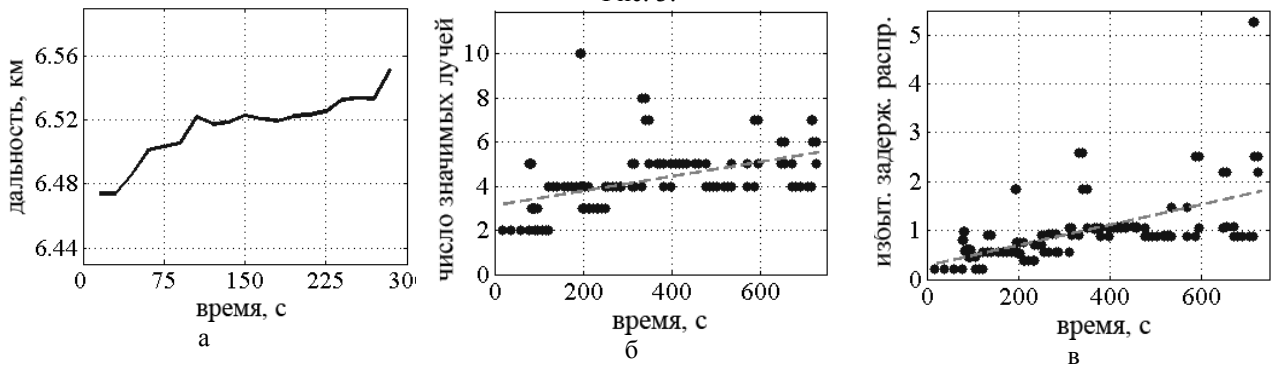


Рис. 4. Условия канала связи

В эксперименте по связи на 6541 м количество многолучевых компонентов было существенно большим. Оно изменялось от 2 – 3 в начале до 4 – 7 в конце эксперимента (рис. 4, б). Длительность избыточной задержки распространения

характеризовалась возрастающим трендом от 400 мкс до 1,1 мс (рис. 4, в). Канал распространения характеризовался быстрым изменением продолжительности и уровня

реверберации, регистрировалась значительная флуктуация мощности многолучевых компонентов (5 - 8 дБ). Временные задержки поступления многолучевых компонентов оставались стабильными в течение времени передачи блока данных. Отношение сигнал/шум на принимающей стороне составляло 14 дБ с девиацией вокруг среднего около 3,2 дБ.

*Обработка сигнала на приеме.* После стандартных процедур усиления, фильтрации и дискретизации принимаемого сигнала выполнялась демодуляция и последующая оценка значений цифровых символов данных. Для демодуляции принимаемый сигнал умножался на опорный в комплексной форме. В качестве последнего использовалась локально сформированная копия несущей с идентичными параметрами развертки. В результате умножения образовывались суммарная и разностная составляющие, причем при точной синхронизации разностная составляющая содержала центральное значение промежуточной частоты равное нулю для синхронного многолучевого компонента и ряд ненулевых спектральных линий, соответствующих смещенным по времени и частоте многолучевым компонентам-помехам. Результат перемножения интегрировался на интервале длительности символа данных.

Таким образом, осуществлялась согласованная фильтрация принимаемого сигнала. Отношение выходов согласованного фильтра (мнимой части к действительной) представляло собой тангенс начальной фазы синхронного компонента принимаемого сигнала. После вычисления арктангенса и вычитания результата из значения фазы предыдущего символа, разность фаз поступала на модуль оценки текущего символа данных. Функция этого модуля сводилась к определению номера квадранта, в котором находилось искомое значение относительного фазового смещения, и, на этой основе, к определению цифрового значения принятого символа данных (от 0 до 3 в соответствии с ДОФМ).

*Оценка производительности.* Для получения статистически репрезентативной оценки производительности устройства цифровой г/а связи производилась многократная передача блоков данных с последующим подробным анализом результатов их приема. Всего было передано 138 блоков данных, которые содержали 12008 цифровых символов (24016 бит информации). На рис. 5, б, 6, б и 7, б изображено наложение значений относительных фаз каждого из символов принимаемой последовательности данных, причем на рис. 5, б это сделано для дистанции связи 4511 м, на рис. 6, б для дистанции связи 5690 м, а на рис. 7, б для дистанции связи 6541 м. Несмотря на различный характер рассеяния в пределах каждого из четырех угловых секторов в обоих экспериментах цифровые значения фазоманипулированных символов хорошо различимы.

Для оценки статистической вероятности битовой

ошибки на приемной стороне проводилось вычитание известной битовой последовательности источника данных (с передающей стороны) из последовательности, обработанной приемным устройством и поступившей к получателю сообщения (на приемной стороне). Во время передачи данных на дальности 4511 м и 5690 м битовые последовательности были получены полностью, без ошибок. При передаче данных на дальность 6541 м обнаружено две битовые ошибки, что дает статистическую оценку вероятности битовой ошибки при передаче цифровой информации в данных условиях связи, которая составляет  $2/6440 = 3,11 \cdot 10^{-4}$ .

Для оценки теоретических значений вероятности битовой ошибки на приеме выполнен расчет статистических характеристик рассеяния оценок фазы (при допущении нормального распределения) вокруг значений фаз символов, формируемых на передающей стороне. Основываясь на рассчитанных статистических характеристиках для каждого из экспериментов, выполнена оценка плотности вероятности отклонения относительного фазового угла от ожидаемого значения, а также выполнена оценка вероятности отклонения относительной фазы за допустимые пределы (вероятность выхода за пределы допустимого квадранта). При передаче данных на дальности 4511 м; 5690 м; 6541 м теоретическая оценка вероятности битовой ошибки составляла  $2,53 \cdot 10^{-6}$ ;  $1,21 \cdot 10^{-6}$ ;  $1,06 \cdot 10^{-4}$ , соответственно.

Следует отметить, что статистическая и теоретическая оценки вероятности битовой ошибки, полученные в эксперименте по передаче данных на максимальное расстояние, в частности  $3,11 \cdot 10^{-4}$  и  $1,06 \cdot 10^{-4}$ , имеют близкие значения. Это с одной стороны подтверждает допущение о нормальном распределении рассеяния начальной фазы принимаемого (многолучевого) сигнала, характеризующегося монотонным расширением спектра, а с другой стороны, эти оценки определяют порядок величины вероятности битовой ошибки при работе в г/а каналах практического интереса.

На рис. 5, а и 6, а представлены диапазоны достигнутых значений скорости передачи данных в эксперименте по связи на дальности 4511 и 5690 м. Средние значения составляют соответственно 4,5 и 4,8 кбит/с. В процессе передачи данных скорость оставалась приблизительно одинаковой.

На рис. 7, а представлен диапазон достигнутых значений скорости передачи данных в эксперименте по связи на максимальную дальность. Среднее значение составляет 4,1 кбит/с. При этом тренд изменения скорости обмена направлен в сторону понижения (тренд изображен пунктиром). Понижение скорости объясняется усложнением г/а канала в процессе передачи данных, а именно увеличением числа многолучевых компонентов и увеличением времени многолучевого рассеяния (рис. 4, б, в).

Как показано в [5] такие показатели сложности канала связи, как число лучей и продолжительность максимальной избыточной задержки распространения (продолжительность реверберации), не всегда являются удобными для сравнения производительностей одного и того же устройства связи в разных условиях г/а каналов. Поэтому, в качестве более удобного показателя, также как в [5], был выполнен расчет среднеквадратического разброса задержек распространения сигнала. Это показатель находился

в диапазоне значений 615 – 629 мкс в первом эксперименте, 348 – 360 мкс во втором эксперименте, и 210 – 1115 мкс в третьем эксперименте. Третий эксперимент характеризовался наибольшей продолжительностью и количеством переданных данных. Поэтому, для получения приведенной ниже зависимости использовались материалы, полученные на участке последней трети эксперимента (репрезентативный участок, содержащий данные для наибольших значений показателя сложности канала связи).

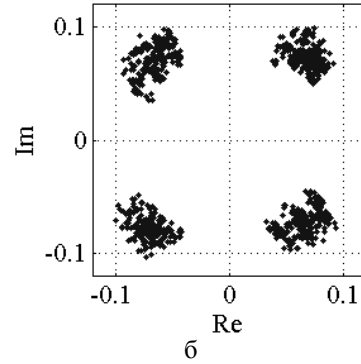
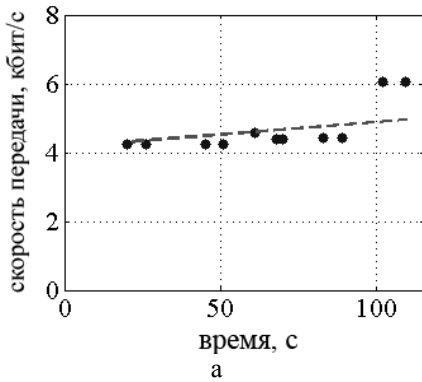


Рис. 5.

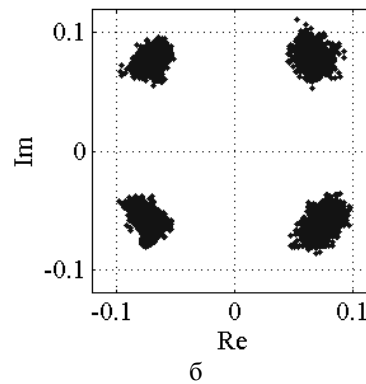
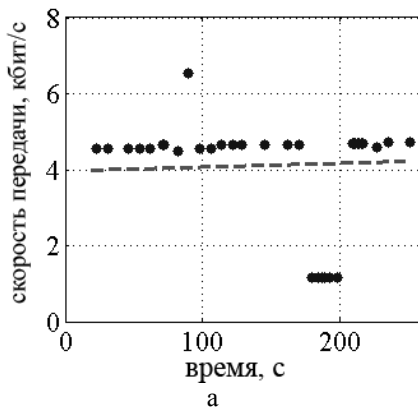


Рис. 6.

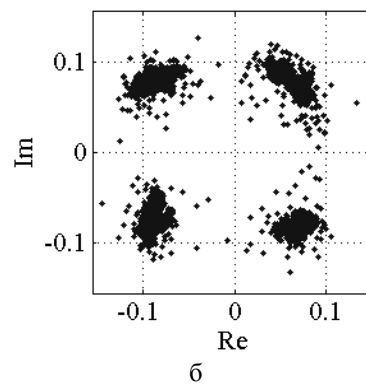
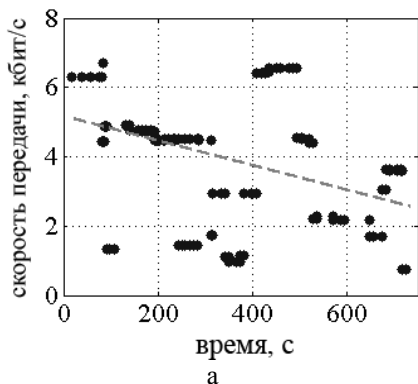


Рис. 7.

Для сравнения достигнутой производительности для разных условий г/а каналов и разных дальностей связи, на рис. 8 по горизонтали нанесены центральные значения диапазонов среднеквадратического разброса задержек распространения сигнала, а по вертикали соответствующие им средние экспериментальные значения скорости связи.

Как следует из рис. 8 с увеличением показателя сложности канала связи от 355 до 1115 мкс средняя скорость передачи данных снижается в полтора раза, от 4800 до 3150 бит/с. Подписанные под графиком значения дальностей связи позволяют установить, что на меньшей дальности условия связи могут быть сложнее, чем на большей дальности. В

частности, на дальности 4511 м показатель сложности канала почти вдвое выше, чем на дальности 5690 м. Поэтому, попытка определения зависимости скорости связи от протяженности г/а канала может давать неоднозначные результаты. Для корректного сравнения производительности устройства связи на разных дальностях, кроме протяженности следует приводить также показатели сложности канала.

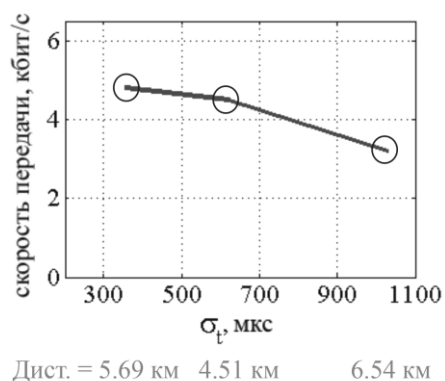


Рис. 8. Залежність швидкості передачі цифрових даних від (показателя) складності каналу зв'язу

В цілому, отримані експериментальні результати дозволяють говорити про можливість передачі цифрових повідомлень по г/а каналах високої складності, існуючим протяженність 4–6 км зі швидкостями 3–5 кбіт/с при ймовірностях біткової помилки порядку  $10^{-4}$ – $10^{-5}$ .

### Висновки

1. Результати проведених експериментів продемонстрували високу стійкість сигналів зв'язу, характеризуємих монотонним розширенням спектра, для передачі даних в умовах тривалої реверберації, характерних для г/а каналів великої протяженності.

2. Експериментальну оцінку продуктивності пристрою цифрової г/а зв'язу, реалізуючого спосіб монотонного розширення спектра, можна

визначити сукупністю наступних показувальників, в частині швидкістю передачі даних порядку 3–5 кбіт/с на дальність 4–6 км при ймовірності біткової помилки порядку  $10^{-4}$ – $10^{-5}$ .

3. Отримана експериментальна залежність швидкості передачі даних від показувальника складності (умов) каналу зв'язу обґрунтовує той факт, що для коректного порівняння продуктивності пристрою зв'язу для різних дальностей, крім власне протяженності слід вказувати показувальники складності каналу.

### Список літератури

1. Kebkal K.G. *Digitale akustische Datenübertragung über ein System kontinuierlich veränderlicher Frequenzen. Entwicklung und Test eines bionischen Verfahrens für die Unterwasser-Kommunikation. Dissertation zu Dr.-Ing. / K.G. Kebkal.* – Berlin: Technische Universität Berlin, 2000. – D83. – 158 S.
2. Кебкал К.Г. Метод цифрової передачі даних в горизонтально-стратифікованих підводних акустических каналах / К.Г. Кебкал, А.Г. Кебкал, С.Г. Яковлев // *Акустический журнал.* – М.: Наука, 2004. – Т. 50, № 2. – С. 220-230.
3. Ермоленко А.Ж. *Применение цифровой гидроакустической телеметрии для усовершенствования систем освещения подводной обстановки / А.Ж. Ермоленко, К.Г. Кебкал // Зб. наук. пр. – Севастополь: Севастопольський ВМІ П.С. Нахімова, 2007. – Вип. 1 (11). – С. 127-132.*
4. Кебкал К.Г. *Експериментальне дослідження нового способу формування сигналу зв'язу при передачі цифрової інформації в протяжених гидроакустических каналах / К.Г. Кебкал, А.Ж. Ермоленко // Зб. наук. пр. – Севастополь: Севастопольський ВМІ П.С. Нахімова, 2007. – Вип. 2 (12). – С. 109-114.*
5. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр.* – М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
6. Rappaport T.S. *Wireless Communications.* / T.S. Rappaport. – Upper Saddle River, NJ: Printence Hall, 1996. – 736 p.

Поступила в редколлегию 2.12.2009

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. М.М. Дивизинюк, Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, Севастополь.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ВІД СКЛАДНОСТІ ГІДРОАКУСТИЧНОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ВЕЛИКОЇ ДОВЖИНИ

К.Г. Кебкал, О.Г. Кебкал

Представлені результати експериментів щодо передачі цифрової інформації в мілководних гідроакустических каналах великої довжини. Сигнали зв'язку характеризувалися монотонним розширенням спектра в діапазоні 8–16 кГц. Експериментальні значення номінальної швидкості передачі даних становили 4,3–4,7 кбіт/с при ймовірності біткової помилки з порядком  $10^{-4}$ – $10^{-5}$ . Досягнута продуктивність дозволяє стверджувати про можливість стійкого обміну даними між підводним об'єктом і поверхневим носієм у каналах довжиною 4–6 км.

**Ключові слова:** підводна телеметрія, цифровий зв'язок, безкабельний підводний зв'язок, гідроакустичний зв'язок.

### EXPERIMENTAL DEPENDENCY OF THE DATA RATE FROM COMPLEXITY OF THE LONG-RANGE HYDRO-ACOUSTIC CHANNEL

K.G. Kebkal, A.G. Kebkal

The results of experimental investigation of hydro-acoustic data transmission in long shallow water channels are represented. The signals are characterised with monotonous frequency spread in the range between 8 and 16 kHz. Experimental values of nominal bitrates comprised 4.3–4.7 kbps with bit error probability of  $10^{-4}$ – $10^{-5}$ . The performance achieved allows to state about the possibility of reliable data exchange between underwater object and surface vessel in channels of 4–6 km length.

**Keywords:** submarine telemetry, digicom, unencable submarine connection, hydroacoustic connection.