

УДК 681.883.45

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДВУХКАНАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА ФОНЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ ИЗЛУЧАЮЩЕГО СПАРКЕРА

Кебкал К.Г.¹, Кебкал А.Г.¹, Кебкал В.К.¹, Себастьяо Л.²,
Паскоаль А.², Рибейро Дж.², Индивери Дж.³,
Келхолт Э.⁴, Джизус С.⁵, Мантуока А.⁵

Evologics GmbH¹
Instituto Superior Técnico, Institute for Systems
and Robotics, Univ. Lisbon²
University of Salento, Department of Innovation Engineering³
Geo Marine Survey Systems B.V.⁴
CINTAL – University of Algarve⁵

Представлены результаты работ по развитию комбинированной системы позиционирования и связи в составе разрабатываемого мобильного комплекса подводной сейсмоакустической (геотехнической) разведки в рамках проекта H2020 WiMUST (Widely scalable Mobile Underwater Sonar Technology). Рассмотрены результаты передачи потоков данных по двум одновременно работающим каналам гидроакустической (г/а) связи – высокоскоростными и низкоскоростными г/а модемами. Высокоскоростная г/а связь использовалась для доставки данных полезной нагрузки от сейсмокос, буксируемых автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА), на борт сопровождающего судна (на терминал оператора). Низкоскоростная г/а связь использовалась для передачи сопровождающим плавсредством сервисных и навигационных данных, предназначенных для позиционирования АНПА. Кроме одновременной работы устройств г/а связи дополнительным условием, усложняющим передачу данных, являлось присутствие в составе комплекса сейсмоакустической разведки постоянно работающих источников широкополосных зондирующих импульсов. Представлены результаты натурных экспериментов по передаче данных на небольшое расстояние (сотни метров) с использованием одновременно двух разнотипных г/а модемов: модели S2CR18/34 (для обмена сервисными и навигационными данными) и модели S2CR42/65 (для доставки данных полезной нагрузки от сейсмокос АНПА на судно сопровождения).

Эксперименты проведены в условиях фоновых импульсных помех излучающего спаркера Geo-Source 400 компании Geo Marine Survey. Влияние межканальной интерференции и импульсных помех выразилось в умеренном снижении эффективной скорости передачи данных и умеренном снижении вероятности доставки пакетов данных по каждому из двух г/а каналов связи.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии со спецификацией проекта WiMUST [1] данные следующих видов должны доставляться по г/а каналу связи:

- фрагменты данных сейсмоакустического зондирования,
- сигналы управления, навигационные строки, контрольные данные о состоянии АНПА,
- сервисные данные, например, для синхронизации часов АНПА.

Навигационные строки, сигналы управления и контроля со-

стояния АНПА должны доставляться в реальном времени всем АНПА для их построения в формацию, совместного маневрирования, поддержания заданной формации АНПА во время движения по маршруту сейморазведки. Сервисные данные должны доставляться в оперативном режиме для старта/завершения миссии, синхронизации измерений АНПА, модификации миссии. Также фрагменты сейсмоакустического зондирования должны как можно более оперативно доставляться от АНПА на судно сопровождения. Эти

фрагменты служат для оперативной оценки качества собираемых сейсмоакустических данных.

Архитектура комплекса сейсмоакустической разведки предполагает возможность масштабирования по числу участвующих в миссии аппаратов. Поэтому в основных рабочих режимах до-

¹ 13355, Germany, Berlin Ackerstrasse, 76.
E-mail: kebkal@evologics.de.

² 1049-001, Portugal, Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, Torre Norte – ISR.

³ 73100, Italy Lecce, Via per Monteroni.

⁴ 3047 AP, The Netherlands, Rotterdam, Sheffieldstraat, 8.

⁵ PT 8005-139, Portugal, Faro.

ставка навигационных данных от нескольких сопровождающих (разнесенных в пространстве) геопривязанных источников сигнала должна производиться односторонне: к АНПА без обратного квитирования (двусторонний обмен данными обусловил бы снижение числа сеансов позиционирования обратно пропорционально числу АНПА). При условии, что навигационные данные во время движения должны передаваться как можно чаще (например, с интервалом порядка секунды), практически вся доступная емкость г/а канала в выделенном для этой задачи диапазоне частот зарезервирована. Передача дополнительных данных (кроме навигационных) в этом диапазоне частот практически исключена.

В то же время, согласно спецификации WiMUST, данные сейсмозондирования должны доставляться на судно в оперативном режиме (предусмотрено до 3 секунд на обмен с каждым АНПА), а количество таких данных является сравнительно большим: 10 кбит в каждом цикле обмена.

Для одновременной передачи данных как для навигации, так и для контроля миссии по сейсмозондированию было предложено использование г/а модемов двух разных типов, работающих в соседних диапазонах частот. В частности, г/а модемов компании Evologics – S2CR42/65 [2], работающих в диапазоне (условно) верхних частот (ВЧ), а именно 42–65 кГц, и модемов S2CR18/34 [3], работающих в диапазоне (условно) средних частот (СЧ), а именно, 18–34 кГц.

Гидроакустические модемы S2CR42/65 (далее – ВЧ-модемы) имеют сравнительно высокую скорость передачи данных (в хороших условиях до 30 кбит/с). В приложении к задачам проекта

WiMUST их целесообразно использовать для передачи данных сейсмозондирования от АНПА на судно сопровождения. Гидроакустические модемы S2CR18/34 (далее – СЧ-модемы) характеризуются умеренной скоростью передачи данных (в хороших условиях до 13,8 кбит/с). В приложении к задачам проекта WiMUST их целесообразно использовать для передачи данных сравнительно небольшого размера – сигналов управления, навигационных данных, контроля состояния аппарата, сервисных пакетов данных.

ВЧ-модемы должны обеспечивать работоспособность в составе сети простой централизованной топологии. СЧ-модемы должны обеспечивать работоспособность в составе сети децентрализованной топологии. Например, при расхождении аппаратов на дальность, превышающую дальность действия г/а модемов в текущих условиях связи, сеть децентрализованной топологии должна обеспечивать связность, достаточную для обмена данными любого г/а модема с любым другим г/а модемом развернутой сети (группы АНПА).

В силу близости частотных диапазонов и соответственно межканальной интерференции одновременная передача данных с помощью разночастотных модемов может представлять собой нетривиальную задачу. Кроме того, работа г/а модемов на фоне частых и мощных импульсов спаркера (с периодом излучения от 250 мс и уровнем излучения более 200 дБ к 1 мкПа/м), расположенного в непосредственной близости к г/а модемам, может обуславливать значительное снижение их производительности.

В связи с этим на первом этапе работ по проекту WiMUST основная задача состояла в исследовании степени взаимного влияния г/а модемов различных моделей и установлении достаточности их производительности (для целей проекта) при их одновременной работе. На втором этапе работ задача состояла в оценке степени влияния излучающего спаркера на производительность г/а модемов.

В следующих разделах представлены экспериментальные оценки производительности г/а модемов (выбранных) моделей S2CR18/34 и S2CR42/65 при их одновременной работе, а также их производительности при одновременной работе на фоне импульсных помех спаркера.

1. Эксперименты по гидроакустической совместимости ВЧ- и СЧ-модемов

А. Условия

Первый эксперимент проводился в пресноводном озере. Два ВЧ-модема устанавливались на глубине 2 м при глубине места 4,5 м у пирса (Werbellensee в окрестности Берлина) на расстоянии 25–150 м друг от друга (рис. 1). Кроме того, два СЧ-модема устанавливались на такой же глубине на расстоянии 27 м друг от друга, рядом с ВЧ модемами (около 1 м), как показано на рис. 1.

Приемоизлучатели ВЧ-модема имели слабо выраженный резонанс около 54 кГц, сквозную АЧХ с неравномерностью до 6 дБ на краях частотного диапазона (42 и 65 кГц соответственно), коническую диаграмму направленности с углом раствора 90°. В экспериментах уровень излучаемого сигнала варь-

СЧ ← 1м → ВЧ ← 25м – 150м → ВЧ ← 1м → СЧ

Рис. 1. Расположение г/а модемов в экспериментах на акустическую совместимость

ировался в диапазоне 176–191 дБ относительно 1 мкПа/м. Следует отметить, что за пределами специфицированного конуса до углов раствора около 180° приемоизлучатель г/а модема характеризовался практически линейной фазочастотной характеристикой во всем диапазоне рабочих частот и умеренно снижающейся чувствительностью. По отношению к уровню сигнала на оси диаграммы направленности приемоизлучателя отклонение от оси на 90° приводило к снижению чувствительности не более чем 14 дБ. Это обстоятельство обуславливало возможность использования такого модема в задачах, в которых дальность действия является сравнительно небольшой, 300–400 м, но требуется полусферическая диаграмма направленности его приемоизлучателя.

СЧ-модемы имели слабо выраженный резонанс в районе 26 кГц, сквозную АЧХ с неравномерностью до 6 дБ на краях частотного диапазона (18 и 34 кГц), круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости и слабо выраженную диаграмму направленности в вертикальной плоскости (угол раствора более 120°). В экспериментах уровень излучаемого сигнала варьировался в диапазоне 178–188 дБ относительно 1 мкПа/м.

Каждая пара СЧ-модемов обменивалась фрагментами данных размером 10 кбит в режиме пакетной передачи (BurstData – специальный тип данных, используемый модемами S2C технологии [4] компании Evologics, в частности в составе протокола DMAC [5]). Поскольку пакетная передача предполагает автоматическую досылку поврежденных данных (по протоколу ARQ [5]), связь в этом режиме осуществлялась всегда в две стороны: пакеты данных – получателю, а составные квитанции – отправителю.

В экспериментах каждая пачка данных представляла собой последовательность из 10 пакетов (устанавливаемый пользователем параметр). Каждый пакет содержал два синхроимпульса, заголовок и блок данных полезной нагрузки. Каждая пачка содержала завершающий сервисный пакет.

Полное время эксперимента составило 2,5 часа. Ветер достигал скорости 21 м/с, высота волны – 30–40 см, обуславливая быструю изменчивость импульсного отклика (профиля интенсивности многолучевого распространения сигнала).

Каждая пара модемов использовалась в двух сценариях. В первом сценарии – для передачи данных полезной нагрузки в одну сторону. При этом получатель после приема данных отвечал отправителю составной квитанцией. Во втором сценарии – для встречного обмена данными полезной нагрузки. При этом получатель кроме составной квитанции о приеме в ответ направлял свой поток данных. Встречный обмен – дуплексная связь – во втором сценарии не требовал какой-либо синхронизации потоков со стороны пользователя; разделение встречных потоков выполняли г/а модемы самостоятельно. В сценарии дуплексного обмена г/а среда использовалась наиболее интенсивно, предоставляя возможность проведения тестов в наиболее сложных условиях доставки данных.

В каждом случае отправляемая пачка данных имела размер 10 кбайт. Пачка разбивалась на 10 пакетов, следующих друг за другом с небольшими паузами (20 мс). После приема данных получатель отправлял составную квитанцию о доставке (квитанцию на все пакеты текущей пачки). Если получатель также имел данные к отправке (в случае дуплексного обмена),

то непосредственно за составной квитанцией он отправлял также собственную пачку данных.

В экспериментах пары модемов, работающие в соседних частотных диапазонах, использовались одновременно/асинхронно. Передача данных в соседних частотных диапазонах осуществлялась в различных комбинациях указанных сценариев.

Обмен данными в каждом из сценариев (каждой комбинации сценариев) продолжался 30 мин.

Тестирование цифровой г/а связи в различных комбинациях сценариев позволило экспериментально оценить пропускную способность каждого из г/а каналов связи при одновременном/асинхронном использовании разных моделей г/а модемов при одновременной/асинхронной доставке данных нескольких типов: данных полезной нагрузки, сервисных данных, данных позиционирования, синхронизации действий АНПА.

Б. Результаты

На рис. 2, а представлена спектрограмма, полученная при работе пары СЧ-модемов, а на рис. 2, б – спектрограмма, полученная при одновременной работе двух пар: СЧ- и ВЧ-модемов.

Спектрограмма на рис. 2, а основана на расчете преобразования Фурье «скользящим окном» длительностью 20 мс (с пятидесятипроцентным перекрытием и взвешиванием окном Ханнинга) на пятисекундном интервале г/а активности СЧ-модемов, обменивающихся данными по первому сценарию. Запись выполнена гидрофоном типа TS-1, размещенным посередине между модемом-источником и модемом-получателем данных.

Спектрограмма на рис. 2, б выполнена аналогичным способом, но на пятисекундном интервале г/а

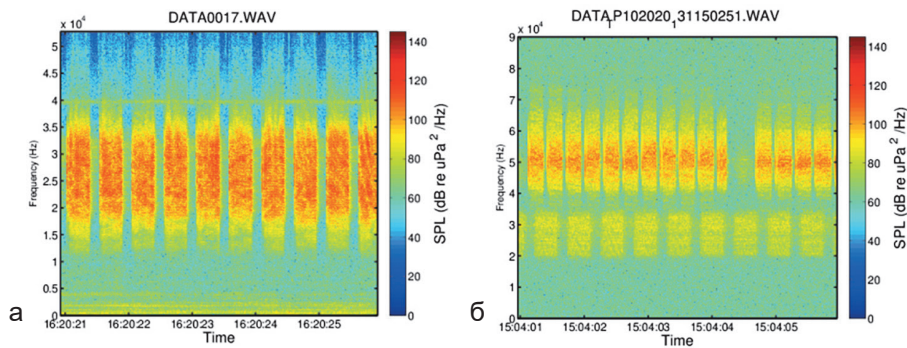


Рис. 2. Спектрограммы г/а активности модемов: а – пары СЧ-модемов, б – двух пар разнородных модемов (средне- и высокочастотных), работающих одновременно

активности двух пар разнородных модемов (средне- и высокочастотных), обменивающихся данными по второму сценарию.

Внеполосная плотность мощности СЧ-модема проиллюстрирована на рис. 2, а и имеет умеренное значение. Кроме соотношения спектральных плотностей мощности рис. 2, б иллюстрирует также внеполосную плотность мощности в интервале между частотными полосами работающих одновременно СЧ- и ВЧ-модемов. Оценивая взаимную интерференцию, при равенстве уровней излучения сигнала спектральная плотность мощности на центральной частоте соответствующего модема, обуславливаемая работой г/а модема в соседней полосе, не превышала -20 дБ.

Одной из наиболее важных характеристик среды распространения цифрового г/а сигнала является профиль интенсивности многолучевого распространения (интенсивность многолучевого

распространения как функция избыточной задержки многолучевого распространения).

Профиль интенсивности многолучевого распространения контролировался в ходе экспериментов на Werbellinsee. Примеры профиля интенсивности многолучевого распространения, полученные при проведении экспериментов на приемной стороне г/а канала связи, даны на рис. 3. Как следует из приведенных примеров, профили характеризуются двумя группами лучей. Первая группа представлена доминирующим лучом и вторым лучом, ослабленным на 1–5 дБ и смещенным примерно на 50 мкс. Вторая группа представлена тремя лучами, ослабленными на 7–10 дБ и задержанными на 340, 385 и 420 мкс (по отношению к доминирующему) соответственно.

Наличие доминирующего луча позволяет моделировать г/а канал связи в соответствии с моделью Райса. Однако для обмена данны-

ми с высокой скоростью присутствие множества лучей и их изменчивость (как по уровню, так и по времени избыточной задержки распространения) обуславливали высокую сложность г/а канала связи. Впрочем, многолучевость и изменчивость профиля интенсивности многолучевого распространения являются часто встречающимися свойствами г/а среды в мелководной акватории.

В условиях мелководья в тестах на Werbellinsee производительность высокочастотного модема, работающего одновременно со среднечастотным модемом, проиллюстрирована на рис. 4.

Амплитуда (по среднеквадратичному значению) символов данных, принятых ВЧ-модемами при параллельной работе СЧ-модемов (обмен данными по первому сценарию), подвержена флуктуациям. Размах флуктуаций зависит от скорости передачи данных высокочастотным г/а модемом.

Фрагменты, демонстрирующие эффект внеполосной помехи, вызываемой одновременной работой разнотипных модемов, соответствуют всплескам флуктуаций амплитуды в приемной тракте ВЧ-модема. На рис. 4, а флуктуации наибольшие. Они соответствуют скорости передачи данных 11904 бит/с. На рис. 4, б размах флуктуаций заметно меньше; они зарегистрированы при скорости

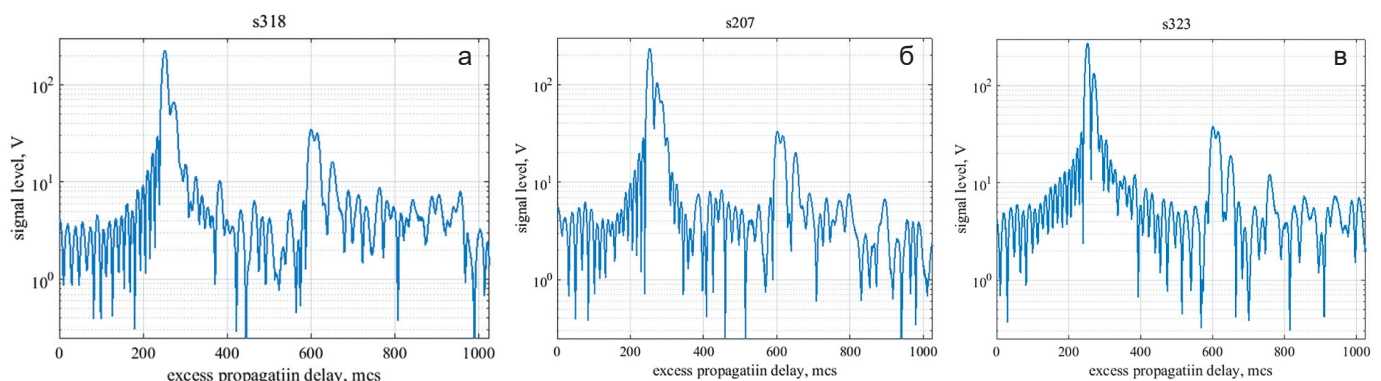


Рис. 3. Примеры профиля интенсивности многолучевого распространения, полученные при проведении экспериментов на Werbellinsee

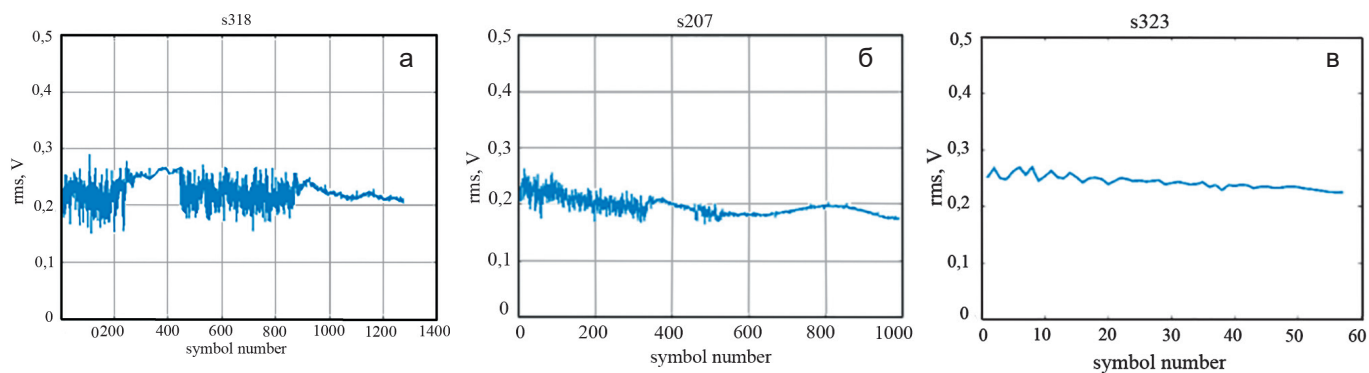


Рис. 4. Амплитуды символов данных (rms), принятых высокочастотными модемами при параллельной работе среднечастотного модема (обмен данными по первому сценарию)

9259 бит/с. На рис. 4, в флуктуации наименьшие; зарегистрированы при скорости 976 бит/с. Во всех случаях скорость передачи данных СЧ-модемом, работающим параллельно с ВЧ-модемом, была фиксированной и составляла 976 бит/с.

Разный размах флуктуаций объясняется разным количеством энергии сигнала, содержащегося в модулированном символе данных. С увеличением скорости передачи данных длительность символа данных (периода модуляции сигнала), а вместе с ней и количество энергии на периоде модуляции уменьшаются. При фиксированном уровне внеполосной помехи (фиксированной скорости передачи данных в соседней полосе частот) увеличение скорости передачи данных приводит к снижению отношения сигнал/шум. Наоборот, при уменьшении скорости

передачи данных отношение сигнал/шум растет.

На рис. 5 показан размах флуктуаций в оценках цифровых значений символов данных, принятых ВЧ-модемами при параллельной работе СЧ-модема (здесь кроме рассеивания значений амплитуды представлено также рассеивание по фазе). На рис. 5, а – рассеивание оценок фаз и амплитуд символов данных при передаче со скоростью 11904 бит/с (соответствует участку обмена данными, изображенному на рис. 4, а). На рис. 5, б и рис. 5, в – рассеивание оценок фаз и амплитуд символов данных при передаче со скоростью 9256 и 976 бит/с соответственно (соответствуют участкам обмена данными, изображенным на рис. 4, б и рис. 4, в).

Как следует из сравнения рис. 5 а, б, в, рассеивание фазы

также увеличивается с ростом скорости передачи данных. При наименьшей скорости, 976 бит/с, эффект внеполосной помехи проявляется в наименьшей мере. При наибольшей скорости передачи, 11904 бит/с, эффект внеполосной помехи проявляется сильнее всего. Стандартное отклонение фазы сигнала от ожидаемого дискретного значения (в соответствии с методом двукратной относительной фазовой манипуляции) составляет: $5,43^\circ$ в случае наибольшей скорости передачи данных, $1,06^\circ$ в случае наименьшей скорости (и $3,3^\circ$ при промежуточной скорости связи).

Выражая оценки рассеивания фазы и амплитуды символов данных в виде отношений сигнал/шум, получим 12 дБ для случая наибольшей скорости передачи данных, 15 дБ – для промежуточной скоро-

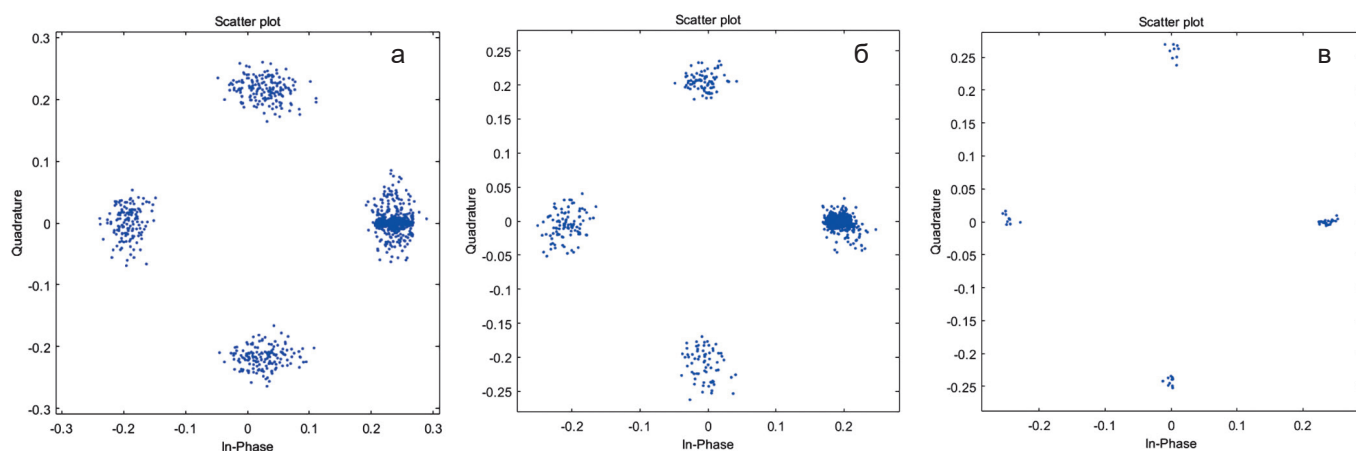


Рис. 5. Рассеивание измеренных значений символов данных (их фаз и амплитуд), принятых высокочастотными модемами при параллельной работе среднечастотного модема (обмен данными по первому сценарию)

сти и 24 дБ – для наименьшей скорости передачи.

В целом скорости передачи данных при одновременной работе модемов по первому сценарию лежали в основном в пределах 8–14 кбит/с.

Кроме тестов с параллельной работой СЧ- и ВЧ-модемов в данных условиях г/а среды выполнены также сравнительные тесты на производительность ВЧ-модемов без параллельной работы СЧ-модемов. Производительность оказалась заметно большей – скорости передачи составляли 16–25 кбит/с.

Следует отметить, что в обоих случаях речь идет о так называемой номинальной скорости передачи данных (скорости, измеренной внутри блока данных полезной нагрузки, или скорости манипуляции цифровым значением сигнала – фазой). Обычно интересующая конечного пользователя так называемая эффективная скорость передачи данных составляла 2,3–5,2 кбит/с в случае одновременной работы ВЧ- и СЧ-модемов и 4,2–8,1 кбит/с при работе только ВЧ-модема. В целом влияние внеполосной помехи выражалось через снижение эффективной скорости передачи данных примерно в 1,5–1,7 раза. (Эффективная скорость связи всегда ниже номинальной из-за наличия служебных заголовков, избыточного помехозащитного кода, квитирования).

При работе по второму сценарию – при одновременной работе в дуплексе, как ВЧ-, так и СЧ-модемов, – зарегистрировано снижение эффективной скорости передачи данных в 2,2–2,3 раза. Эффективная скорость связи ВЧ-модема в таком (наиболее сложном) случае использования г/а среды составляла 1,04–2,21 кбит/с.

Экспериментальное исследование производительности модемов в разных режимах имело основной

целью обоснование возможности применения двух г/а модемов в соседних частотных диапазонах для одновременной/асинхронной передачи данных. Поэтому основное внимание было уделено исследованию режима одновременной связи г/а модемов, работающих по первому сценарию обмена данными (источники пересылают данные получателям, а получатели в ответ отправляют только квитанции о доставке). При одновременном задействовании модемов в таком сценарии оказалось, что достигнутой производительности достаточно для доставки данных полезной нагрузки размером 10 кбит получателю (оператору на судне сопровождения) в среднем менее чем за 3 с. При работе одновременно до десятка АНПА в группе (как предписывает спецификация на проект) цикл обмена между каждым АНПА и оператором на судне сопровождения составляет не более 30 с. Такая цикличность обмена данными с судном сопровождения удовлетворяет требованиям реально-временного контроля процесса сбора сейсмоакустических данных и, таким образом, была рекомендована к использованию для решения задач проекта WiMUST. В свою очередь, производительность СЧ-модема, работающего одновременно с ВЧ-модемом, оценивалась по критерию вероятности доставки пакетов данных с первой попытки. Скорость передачи пакетов была фиксированной, модемы использовались для связи в режиме «срочных сообщений». Влияние внеполосной помехи от одновременно работающего ВЧ-модема проявлялось в возрастании числа «поврежденных» пакетов, доставляемых получателю. В основном влияние внеполосной помехи определялось различием уровней передаваемого сигнала в каждой из рабочих полос модемов. В целом наблюдалась вы-

сокая вероятность доставки пакета данных с первой попытки, 0,9–1,0 при равенстве уровней сигналов, передаваемых соответствующими модемами в соседних частотных полосах. В случае существенно больших уровней сигналов, излучаемых ВЧ-модемами, вероятность доставки пакета данных СЧ-модемом с первой попытки могла снижаться значительно. Например, при излучении сигнала ВЧ-модемом на уровне, превышающем уровень сигнала СЧ-модема на 12 дБ, вероятность доставки пакета данных СЧ-модемом с первой попытки снижалась до 0,7 дБ.

Результаты, полученные в ходе экспериментального исследования, использовались в проекте WiMUST для выбора уровней излучения сигналов г/а модемами в различных формациях АНПА – при размещении АНПА в группах с различным построением.

2. Оценка производительности г/а модемов в присутствии мощных импульсных помех

Поскольку сейсмоакустическая разведка предполагает использование источников импульсных (широкополосных) сигналов, так называемых спаркеров, один из наиболее важных этапов проекта WiMUST состоял в исследовании г/а совместимости модемов и спаркеров, а также, при необходимости, в выборе благоприятных частот г/а модемов и взаимного расположения модемов и спаркеров в г/а среде.

Исследование выполнено при интенсивном сотрудничестве между компаниями Geomarine (Нидерланды) и Evologics (Германия).

Работа спаркера и его влияние на производительность г/а модемов была не только смоделирована и проимитирована, но также изучена экспериментально при

использовании оригинального промышленного экземпляра производства компании Geo Marine Survey.

Серия тестов на г/а совместимость была исполнена как в лабораторном бассейне, так и в озере Werbellinsee (рис. 6, а). В состав оборудования спаркера входили источник питания и генератор импульсов GEO-SPARK 2000 X, излучатель Geo-Source 400 (рис. 6, б), способный излучать широкополосные импульсы с энергией до 2 кДж.

Спаркер размещался в непосредственной близости от г/а модемов, около 1 м. Во время обмена данными спаркер излучал широкополосные импульсы энергией 500 и 1000 Дж с периодом от 0,25 до 1,0 с.

Импульсы спаркера занимали частотный диапазон 0,5–5,0 кГц. Спектр импульса спаркера, записанный в отсутствие активности г/а модема, представлен на рис. 7.

Последовательность импульсов, излучаемых спаркером с периодом 1 с, продемонстрирована на рис. 8. Запись сигналов выполнена калибровочным гидрофоном Reson TC-4014 с предусилителем напряжения VP1000. (Другие измерения, ниже по тексту, выполнены этим же гидрофоном). При выполнении записей гидрофон располагался в 2 м от спаркера.

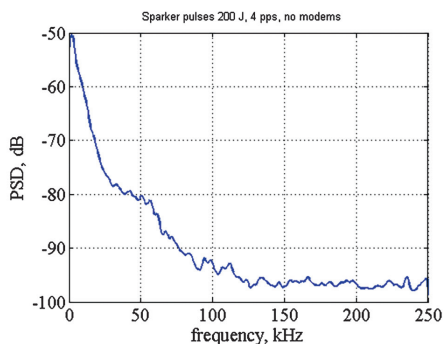


Рис. 7. Спектр импульсов спаркера в отсутствие активности г/а модемов

Последовательность г/а сигналов СЧ-модема в отсутствие активности спаркера представлена на рис. 9, а результат наложения импульсов спаркера на сигнал СЧ-модема – на рис. 10. Несмотря на то что рабочий диапазон частот СЧ модема лежал существенно выше рабочего диапазона спаркера, интерференция была значимой. В данном случае модем-источник пакетов данных находился на расстоянии 20 м от принимающего модема, а спаркер – на расстоянии около 2 м.

Спектральный анализ принимаемых сигналов, представляющих собой смесь сигналов СЧ-модема (18–34 кГц) и импульсов спаркера, представлен на рис. 11. Как следует из иллюстрации спектров, уровень интерференции сигналов в полосе СЧ-модема составлял –21...–22 дБ (спектральная плотность мощности сигнала

лов модема была больше). В свою очередь, уровень сигналов модема в рабочей полосе частот спаркера составлял –40...–50 дБ.

Относительно ВЧ-модема отметим, что спектральный анализ смеси сигналов с импульсами спаркера (4 импульса в секунду) показал более благоприятное соотношение: уровень интерференции сигналов в полосе ВЧ-модема составлял менее –25 дБ, что обуславливало еще меньшее влияние спаркера на производительность ВЧ модема.

Наиболее значимые результаты, полученные во время экспериментов с одновременным использованием СЧ- и ВЧ-модемов и спаркеров:

- номинальная скорость передачи данных СЧ-модема лежала в диапазоне 3,10–3,85 кбит/с; эффективная скорость связи составляла 1,06–1,18 кбит/с;

- номинальная скорость передачи данных ВЧ-модема лежала в диапазоне 12,1–22,0 кбит/с; эффективная скорость связи лежала в пределах 2,3–5,2 кбит/с.

Сравнение производительности СЧ- и ВЧ-модемов при одновременной работе спаркера (т.е. в присутствии широкополосных импульсных помех) показало умеренное снижение скорости передачи данных, обычно не превышающее 20%.



Рис. 6. Оборудование спаркера, использованное в тестах на г/а совместимость: а – генератор широкополосных импульсов, б – источник питания и излучатель широкополосных импульсов

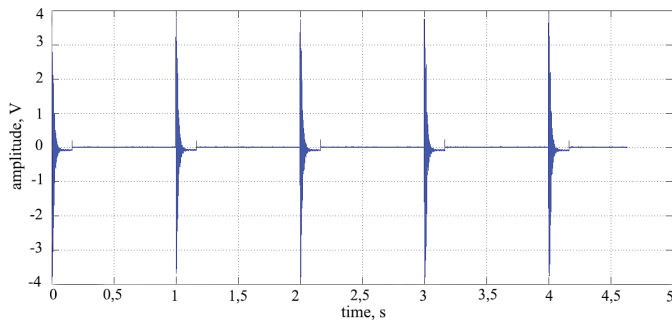


Рис. 8. Последовательность импульсов спаркера в отсутствие активности г/а модемов

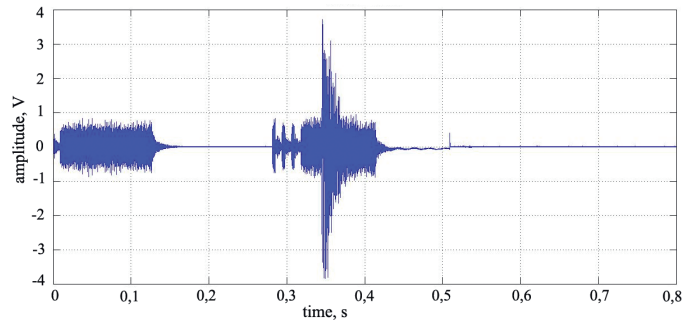


Рис. 9. Сигналы СЧ-модема (18–34 кГц) в отсутствие активности спаркера

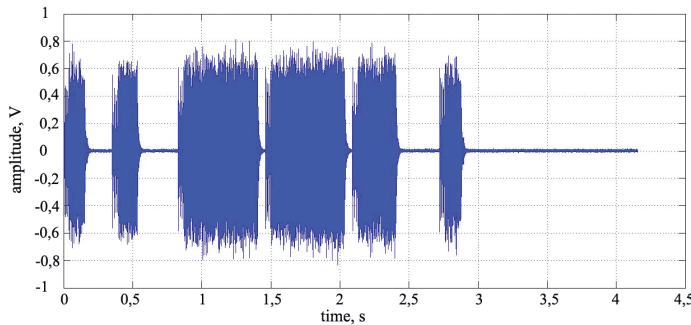


Рис. 10. Наложение сигналов СЧ-модема (18–34 кГц) и спаркера во время их одновременной работы

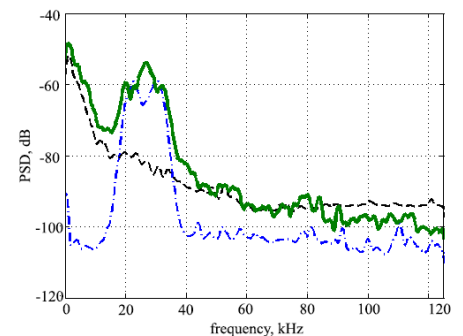


Рис. 11. Спектр сигналов СЧ-модема (18–34 кГц) и сигналов спаркера (4 импульса в секунду): черная линия – спектр последовательности импульсов спаркера, синяя линия – спектр сигналов г/а модема, зеленая – спектр смеси сигналов спаркера и СЧ-модема

ВЫВОДЫ

Серия лабораторных бассейновых и озерных экспериментов продемонстрировала количественные характеристики цифровой г/а связи при одновременной работе СЧ- и ВЧ-модемов, а также спаркера – источника мощных электромагнитных и импульсных помех.

В режимах работы, предусмотренных для задач проекта WiMUST, полученные показатели производительности оказались достаточными для:

- реально-временного обмена навигационными и сервисными данными для задач взаимного позиционирования в составе группы АПНА (посредством СЧ-модема),
- доставки посредством ВЧ-модема данных полезной нагрузки на борт судна сопровождения (контрольных данных от сейсмодос, буксируемых АНПА).

Эксперименты также подтвердили возможность одновременного использования двух каналов цифровой г/а связи при работе

спаркера в непосредственной близости от г/а модема – получателя данных. Значимых помех в работе электроники г/а модемов в присутствии электромагнитных помех спаркера обнаружено не было. Помехи в г/а тракте, обусловленные работой спаркера, сказывались на производительности г/а модемов умеренным снижением эффективной скорости передачи данных (из-за необходимости повторной передачи пакетов данных, поврежденных из-за интерференции или не принятых из-за сбоев синхронизации). Количественно наблюдалось умеренное снижение скорости передачи данных – в пределах 20% эффективной скорости.

Продemonстрированные значения эффективной скорости передачи данных ВЧ-модемом составляли от 2,3 до 5,2 кбит/с (при среднем значении выше 3,5 кбит/с). Принимая во внимание спецификацию проекта WiMUST, такая производительность удовлетворяет требованиям по времени доставки контрольных данных

размером до 10 кбит от каждого АНПА (буксируемой сейсмодосы) за время, в среднем не превышающее 3 с.

Производительность СЧ-модема оценивалась по критерию вероятности доставки с первой попытки пакета данных размером до 512 бит. В условиях практического интереса такая вероятность составляла 0,9–1,0. Однако в случае «перекаса» по уровням излучения сигналов (в частности, при излучении сигнала ВЧ-модемом на уровне, превышающем уровень сигнала СЧ-модема на 12 дБ) вероятность доставки пакета данных СЧ-модемом с первой попытки снижалась до 0,7. Этот результат обусловил необходимость обоснованной балансировки уровней излучения обоих г/а модемов (в виде приемлемого для задач WiMUST компромисса между вероятностью

доставки данных СЧ-модемом и эффективной скоростью доставки данных ВЧ-модемом).

Работа выполнена в рамках европейского проекта: шифр WiMUST, грант № 645141, программа H2020-ICT-2014-1. Проведенное исследование стало возможным благодаря совместным усилиям партнеров по проекту WiMUST: Межвузовского центра интегрированных систем для морской среды (ISME, Италия), Центра высших учебных заведений по исследованиям и разработкам в робототехнике (IST-ID, Португалия), Центра исследований и технологий Альгарва (CINTAL, Португалия), Высшей школы компьютерных наук университета Хартфордшир, компаний CGG (Франция), Evologics (Германия), Geo Marine Survey Systems (Португалия), Geosurveys (Нидерланды) и Graal Tech (Италия).

ЛИТЕРАТУРА

1. Abreu P., Antonelli G., Arrichiello F., Caffaz A., Caiti A., Casalino G., Volpi N.C., De Jong I. B., Palma D. De, Duarte H., Gomes J.P., Grimsdale J., Indiveri G., Jesus S., Kebkal K., Kelholt E., Pascoal A., Polani D., Pollini L., Simetti E., Turetta A. Widely scalable mobile underwater sonar technology: An overview of the H2020 WiMUST project. *Marine Technology // Society Journal*. 2016. Vol. 50, No 4. P. 42–53.
2. Underwater acoustic modems. S2CR42/65 Acoustic Modem [Электронный ресурс]. – URL: https://evologics.de/en/products/acoustics/s2cr_42_65.html (дата обращения: 17.04.2018).
3. Underwater acoustic modems. S2CR18/34 Acoustic Modem [Электронный ресурс]. – URL: https://evologics.de/en/products/acoustics/s2cr_18_34.html (дата обращения: 17.04.2018).
4. Kebkal K., Bannasch R. Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation // *J. Acoust. Soc. America*. 2002. Vol. 112(5). P. 2043–2052.
5. Kebkal O., Komar M., Kebkal K., Bannasch R. D-MAC: Media Access Control Architecture for Underwater Acoustic Sensor Networks // *OCEANS 2011 IEEE* (6–9 Jun). Santander, Spain, 2011. ISBN 978-1-4577-0087-3.