

УДК 681.883.45

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛА ЦИФРОВОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ СУДНОМ И БУКСИРУЕМЫМ ОБЪЕКТОМ

К.Г. Кебкал

EvoLogics GmbH¹

Представлены результаты экспериментов по передаче данных по гидроакустическому каналу связи между локальным (поверхностным) устройством цифровой гидроакустической связи и удаленным устройством, буксируемым на расстоянии до 750 метров за судном. Для формирования сигнала применялся способ, основанный на технологии непрерывного расширения спектра несущей. При передаче данных выполнялась оценка условий распространения сигнала, которые в большинстве случаев характеризовались продолжительным многолучевым распространением и динамикой характеристик. В этих условиях при многократной передаче значительных объемов данных номинальная скорость передачи данных составляла в среднем 16 кбит/с, а эффективная 4-8 кбит/с. Достигнутая производительность устройства цифровой гидроакустической связи является достаточной для большинства задач по реально-временной передаче цифровой информации от траловых сенсоров бескабельным путем на борт судна – носителя трала.

В ходе совместных морских экспериментов компаний, специализирующихся на разработке и производстве гидроакустического (г/а) оборудования, EvoLogics, (Германия) и iXSea (Франция), выполнено тестирование устройств цифровой г/а связи, разработанных по авторской технологии S2C Communication (sweep-spread carrier communication) [1].

Устройства использовались для передачи цифровой информации в г/а каналах с различными характеристиками. Один из экспериментов состоял в оценке их производительности при горизонтальной передаче данных в относительно мелководном канале (близко к поверхности). При этом одно из устройств связи (локальное) закреплялось на раме под днищем рыболовного судна, а другое (удаленное) – на буксируемой «рыбе». Таким образом создавались условия, подобные условиям передачи дан-

ных при обмене данными между тралом (траловыми сенсорами) и рыболовным судном.

В этом эксперименте испытывалось устройство цифровой г/а связи с эффективной шириной частотной полосы около 15,5 кГц и значением центральной частоты, равной 63 кГц, способное в стандартных условиях осуществлять передачу данных на дистанцию до 1,5 км.

Локальное устройство подключалось к компьютеру-источнику данных (он всегда инициировал сессию обмена данными). Удаленный модем подключался к встроенному компьютеру-получателю данных, работающему в режиме «зеркала» (специальный тестовый режим, в котором все принятые данные незамедлительно отправлялись в обратном направлении). Таким образом, передаваемые данные проходили по г/а каналу как от локального устройства к удаленному, так и

от удаленного к локальному. Передаваемые файлы имели размеры от 9 до 131 кбит. Файлы содержали псевдослучайные последовательности чисел.

При передаче оценивались характеристики канала и параметры производительности устройства связи. Кроме того, выполнялась оценка характера воздействия канала связи на передаваемый сигнал. При оценке характеристик канала для каждого из принимаемых пакетов данных учитывались максимальная избыточная задержка распространения, количество лучевых компонентов, среднеквадратический разброс задержек распространения и ширина полосы когерентности. При оценке производительности устройств регистрировались такие параметры, как скорость

¹ Ackerstraße 76, 13355 Berlin, Germany. E-mail: konstantin.kebkal@gmail.com

передачи данных, дальность и вероятность битовой ошибки.

Характер искажений сигнала при передаче оценивался посредством расчета для каждого из передаваемых пакетов данных отношения избыточной задержки распространения сигнала к его длительности, а также разности ширины полосы когерентности канала связи и полосы, занимаемой передаваемым сигналом.

Условия проведения экспериментов

После размещения буксируемой «рыбы» в воде передача данных выполнялась практически непрерывно от локального (поверхностного) устройства к удаленному и автоматически назад. В каждом из тестов локальное устройство находилось на раме под днищем катамарана на глубине 3 м. Удаленное устройство находилось на буксируемой «рыбе». Взаимное расположение приемопередаточных элементов, а также границ г/а канала было таковым, что направление передачи г/а сигнала между устройствами являлось наклонным. При скорости судна 2-3 узла угол наклона прямой, соединяющей поверхностное и буксируемое устройство, составлял 20-30° к поверхности моря. При повышении скорости буксировки до 5-7 узлов этот угол уменьшался до 10-15°. Расстояние между устройствами постоянно изменялось путем вытравливания или выборки буксировочного троса, при этом скорость относительных перемещений между поверхностным и удаленным модемами не превышала $\pm 1,5$ узла.

Таким образом, путем манипулирования длиной троса и скоростью буксировки «рыбы» передача данных осуществлялась при непрерывно изменяющихся условиях, в частности изменяющихся глубине и уда-

Таблица 1. Условия эксперимента

Название теста	Дальность связи, м	Диапазон глубин буксируемого объекта, м	Глубина места, м
D3T8	10-210	10-50	80-120
D4T1	10 – 240	10-60	110-190
D4T2	240-750	10-170	150-200

лении до буксируемого модема. Глубины буксировки, дальности связи указаны в табл. 1.

Характеристики гидроакустического канала связи

Характеристики г/а канала для каждого из тестов представлены на рис.1. Как следует из рис. 1,а, б, с, в тестах D3T8 и D4T1 дистанция связи фиксировались на сравнительно продолжительное время, в то время как в тесте D4T2 дистанция связи практически непрерывно изменялась, так что передача значительных объемов данных (131 кбайт) выполнялась при постоянно изменяющихся условиях.

Как следует из рис. 1,д, е, при связи на расстояние до 250 м количество лучевых компонентов в большинстве случаев находилось в пределах от одного до трех. Временами их количество увеличивалось до восьми. Максимальная избыточная задержка распространения сигнала составляла преимущественно 0,1-0,2 мс, временами 0,5-2 мс, изредка повышалась до 7 мс. На нескольких участках в тесте D3T8 максимальная избыточная задержка распространения сигнала изменялась быстро и в широком диапазоне значений (центральная часть эксперимента).

Следует отметить интервалы времени, на которых скорость движения судна-носителя быстро снижалась, буксируемое тело продолжало двигаться по инерции, буксировочный трос провисал. В результате букси-

руемое тело теряло исходную ориентацию в пространстве.

Поскольку приемопередаточный тракт не был ненаправленным (имел тороидальную диаграмму направленности с углом открытия порядка 90°), появлялся интервал времени, на котором прием и излучение производились за границами допустимого лепестка диаграммы направленности. На рис. 1,д эти участки характеризуются возросшим количеством лучевых компонентов принимаемого сигнала, а на рис. 1,г – сильно возросшим и быстро изменяющимся значением избыточной задержки распространения сигнала. Наиболее характерный участок расположен на интервале между 3000- и 3100-й секундами эксперимента (см. рис. 1а, д, г), в течение которого количество компонентов возросло до 4-8, а продолжительность избыточной задержки распространения сигнала увеличивалась в 10-20 раз (с 0,1 мс до 1-2 мс).

В тесте D4T1 судно двигалось равномерно, так что скачкообразные изменения количества лучевых компонентов, а также изменения максимальной избыточной задержки распространения сигнала происходили намного реже. В большинстве случаев многолучевой сигнал состоял не более чем из двух компонентов. Изредка число лучевых компонентов увеличивалось до четырех, в отдельных случаях – до 6-7 (рис. 1,е). Максимальная задержка распространения сигнала составляла преимущественно 0,1-0,2 мс, временами достигала 1-3 мс и

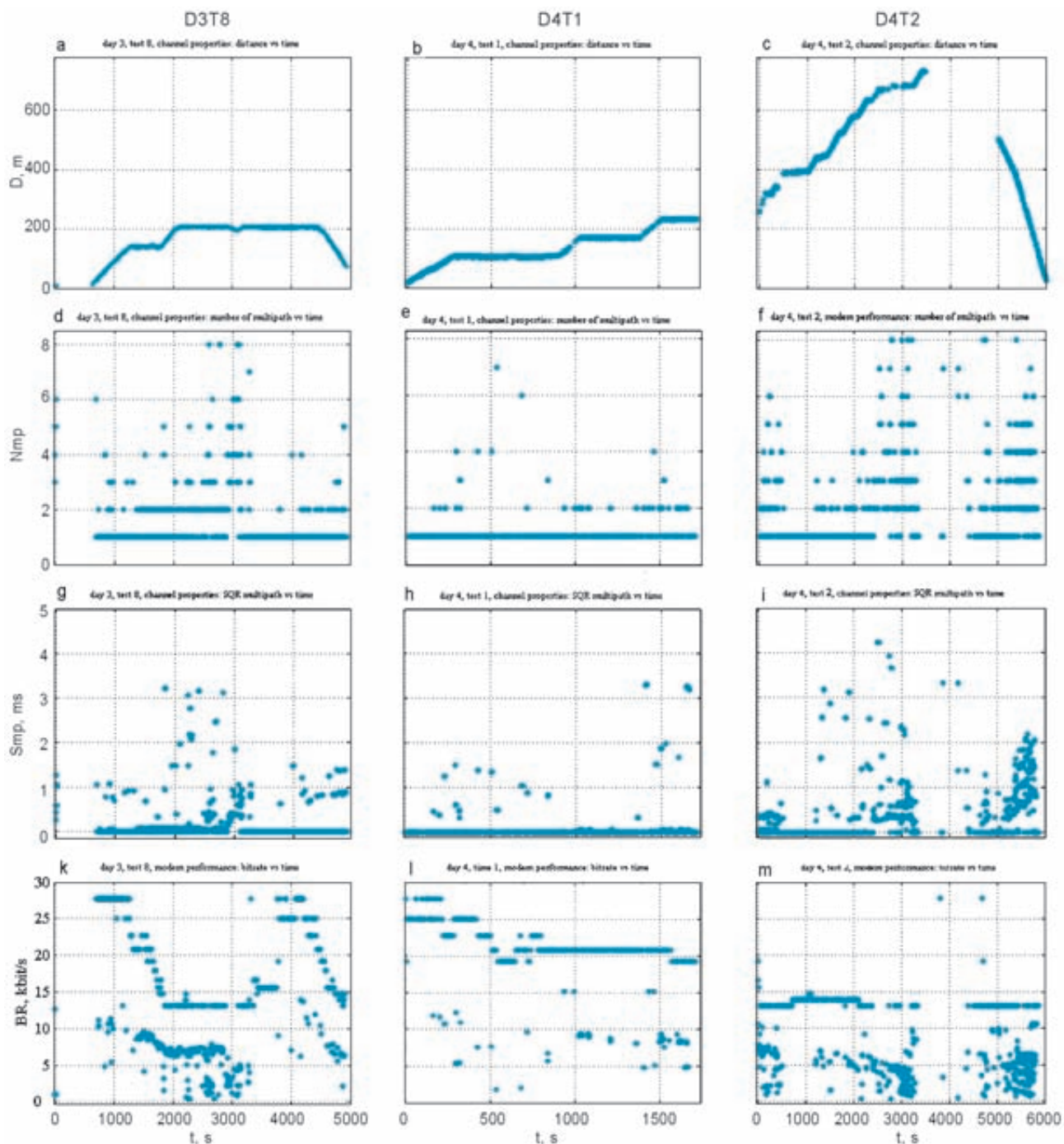


Рис. 1. Характеристики канала (N_{mp} - число лучевых компонентов; L_{mp} - длительность максимальной избыточной задержки распространения сигнала, S_{mp} – среднеквадратический разброс избыточных задержек распространения сигнала по множеству лучей, BR – скорость передачи данных в пакете)

лишь изредка повышалась до 3-7 мс. В целом по сравнению с тестом D3T8 канал был более благоприятным для передачи данных с высокой скоростью.

В тесте D4T2 (рис. 1, c, f, i) при постоянном изменении геометрии канала связи, в частности глубины и дальности до

буксируемого объекта, канал являлся намного более сложным, чем в предыдущих двух тестах. Количество лучевых компонентов обычно составляло 2-5 лучей, часто увеличивалось до 6-8. Максимальная избыточная задержка распространения сигнала в основном составляла

0,2-2 мс, временами возрастала до 6,5 мс. Скачкообразные изменения количества лучевых компонентов, а также максимальной избыточной задержки распространения сигнала происходили часто.

Следует отметить, что во всех тестах максимальная

избыточная задержка распространения сигнала измерялась как время между приемом первого и последнего лучевых компонентов, уровень которых был не ниже -10 дБ по отношению к уровню наиболее энергетического (доминирующего) луча. Таким образом, при построении профиля интенсивности лучевого распространения сигнала во внимание принимались только наиболее «значимые» лучи.

Известно [2], что количество лучевых компонентов и максимальная избыточная задержка распространения не обязательно являются наилучшими показателями того, как будет функционировать система при распространении сигнала в канале. Различные каналы с одинаковым значением максимальной избыточной задержки могут иметь весьма различные профили интенсивности лучевого распространения внутри интервала этой задержки. Например, между 2800-3000-й секундами эксперимента ДЗТ8 наблюдалось существенное увеличение количества лучевых компонентов (от трех до восьми, см. рис. 1,d) при умеренном увеличении максимальной избыточной задержки распространения сигнала (разброс значений 0,3-3,3 мс). В то же время на интервале от 2000- до 2200-й секунды, наоборот, при небольшом количестве лучевых компонентов (от одной до трех, рис. 1,d) наблюдалось большое изменение максимальной избыточной задержки распространения сигнала (разброс значений 0,1-6,2 мс).

Поэтому в качестве альтернативы для оценки сложности условий связи (в т.ч. полосы когерентности) для каждого переданного кластера данных рассчитывалось также среднеквадратическое значение разброса избыточных задержек распространения сигнала по множеству лучей. В частно-

сти, это среднеквадратическое значение (σ_t) оценивалось как квадратный корень из второго центрального момента функции, представляющей собой профиль интенсивности лучевого распространения сигнала в канале связи. Оценки этого параметра представлены на рис. 1, g, h, i. Несмотря на большой разброс максимальной избыточной задержки распространения и количества лучей среднеквадратический разброс задержек распространения может быть небольшим. Например, на отрезке 2800-3000-й с эксперимента несмотря на разброс максимальной избыточной задержки распространения в диапазоне 0,5-4,5 мс среднеквадратический разброс задержек распространения лежит компактно в диапазоне от 0,3 до 1 мс. Сравнительно небольшое изменение σ_t может говорить о мало меняющейся сложности канала связи. Однако возможны условия, в которых, наоборот, при сравнительно небольшом разбросе максимальной избыточной задержки распространения среднеквадратический разброс остается сравнительно большим. В частности, на отрезке 2000-2200 с эксперимента среднеквадратический разброс является сравнимым с разбросом максимальной избыточной задержки распространения (от 0,1 до 3,1 мс), что может свидетельствовать о быстро меняющейся сложности канала связи.

Для проверки возможности использования σ_t для оценки полосы когерентности канала связи было выполнено сравнение следующих оценок. На основе корреляционных функций разнесения частот рассчитаны оценки полосы когерентности. Также рассчитаны оценки когерентности канала связи с помощью приближения $f_{ch}=1/5\sigma_t$ (приближение имеет широкое распространение в цифровой ра-

диосвязи [3]). Сравнение обеих оценок продемонстрировало их хорошую согласовываемость.

Этот результат говорит в пользу возможности использования приближения $f_{ch}=1/5\sigma_t$ в цифровой г/а связи для экспресс-оценки сложности каналов связи. Например, путем сравнения частотной полосы фазоманипулированного сигнала (до модуляции несущей) с актуальной шириной полосы когерентности г/а канала представляется возможным количественно оценить частотную эффективность работы устройства г/а связи в заданных условиях многолучевого распространения и динамики характеристик канала. Такая оценка может быть более показательной, чем широко распространенная оценка частотной эффективности, рассчитываемая на основе максимальной скорости передачи данных, достигаемой в идеализированных каналах с гауссовым шумом. Также реалистичная оценка может служить опорной величиной для сравнения разных моделей г/а средств связи, работающих в разных частотных диапазонах, использующих разные методы формирования передаваемых сигналов связи.

Скорость передачи данных

На рис. 1,k,l,m представлен график изменения скорости передачи данных во времени. Как следует из рис. 1,k, в тесте ДЗТ8 (дистанция связи до 210 м) в большинстве случаев номинальная скорость передачи составляла 14-28 кбит/с. Временами эта скорость понижалась до 6-10 кбит/с и сравнительно редко – до значений ниже 5 кбит/с. Среднее значение номинальной скорости на всем интервале измерений составляла 16 кбит/с. Эффективные скорости передачи данных

(за вычетом издержек на передачу служебной информации) составляли 4,8-5,4 кбит/с. Место расположения «провалов» в скорости передачи данных точно соответствует упомянутым выше участкам, где буксируемое тело теряло исходную ориентацию и приемоизлучающие элементы выходили за пределы допустимых показателей направленности.

В тесте D4T1 (рис. 1,л, связь до 240 м) в большинстве случаев номинальная скорость передачи данных составляла 19-28 кбит/с. Временами она понижалась до 5-15 кбит/с. Сопоставляя рис. 1,к, и рис. 1,л, при возрастании дистанции связи наблюдается снижение достижимого значения номинальной скорости передачи от 23-28 кбит/с до 19-21 кбит/с. Тем не менее среднее значение номинальной скорости в тесте D4T1 на всем интервале измерений составило 20,4 кбит/с, т.е. больше, чем в предыдущем тесте. При неодно-

кратном измерении эффективной скорости передачи данных практическое значение составляло 6,4-8,1 кбит/с.

В тесте D4T2 (рис. 1,ч, связь до 750 м) в большинстве случаев номинальная скорость передачи данных составляла 13-14 кбит/с, временами понижалась до 2-12 кбит/с. Среднее значение номинальной скорости на всем интервале измерений составляло 11 кбит/с, т.е. достигнутые значения номинальной скорости передачи данных заметны ниже, чем в предыдущих тестах, однако пользовательские скорости передачи данных были сравнимы и составляли 3,6-4,1 кбит/с.

Ниже выполнен анализ полученных результатов путем сравнения производительности модема и текущей сложности канала, в котором достигалась та или иная производительность. По сути, такой подход отражал оценку характера воздействия г/а канала на передаваемый г/а сигнал.

Известно, что одним из показателей сложности канала связи является отношение избыточной задержки распространения многолучевого сигнала к длительности передаваемого символа данных, или, в частотных координатах, отношение ширины полосы когерентности канала к ширине частотной полосы, занимаемой передаваемым сигналом. Другим показателем является время когерентности канала связи – анализ времени когерентности здесь не приводится.

В отношении теста D3T8 на рис. 2,д представлена разность ширины полосы, занимаемой сигналом связи, и ширины полосы когерентности канала. За исключением нескольких случаев эта разность имела положительное значение. Обычно полоса передаваемого сигнала превышала полосу когерентности на 1-2 кГц, реже на 2-6 кГц. На рис. 2,а представлено отношение максимальной избыточ-

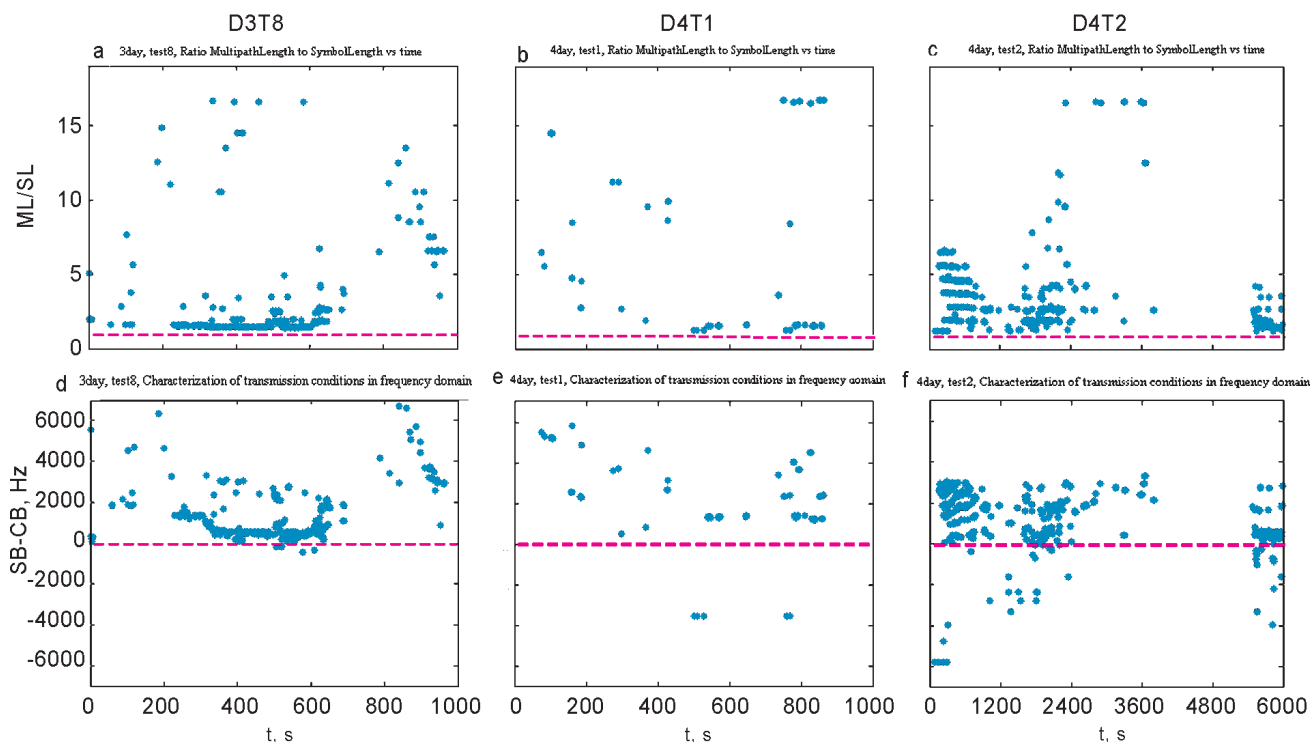


Рис. 2. Условия передачи данных (ML/SL – отношение текущей максимальной избыточной задержки распространения к текущей длительности символа данных, SB-CB – разность текущей ширины частотной полосы, занимаемой /baseband-/ сигналом, и текущей ширины полосы когерентности канала связи)

ной задержки распространения к длительности передаваемого цифрового сигнала. Длительность цифрового сигнала была всегда намного меньше избыточной задержки его распространения в канале. Часто длительность символа данных была в 2-3 раза меньше избыточной задержки, временами до 17 раз, т.е. на интервале между приемом первого и последнего лучевых компонентов укладывалось до 17 цифровых сигналов.

В отношении теста D4T1 на рис. 2,е представлена разность ширины частотной полосы, занимаемой сигналом связи, и ширины полосы когерентности канала связи. Как следует, частотная полоса передаваемого сигнала превышала полосу когерентности на 1-6 кГц. На рис. 2,д также для теста D4T1 представлено отношение максимальной избыточной задержки распространения к длительности передаваемого цифрового сигнала. Длительность сигнала всегда была намного меньше избыточной задержки его распространения, часто в 2-16 раз, что также свидетельствуют о высокой сложности условий распространения.

В тесте D4T2 (рис. 2,ф) разность ширины полосы, занимаемой сигналом связи, и ширины полосы когерентности г/а канала обычно имела положительное значение. Полоса передаваемого сигнала превышала полосу когерентности до 4 кГц. Отношение максимальной избыточной задержки распространения к длительности передаваемого цифрового сигнала лежало в пределах от 2 до 17 (рис. 2,с).

Таким образом, данные на рис. 2 свидетельствуют о высокой сложности условий передачи, при которых традиционный сигнал связи, характеризующийся постоянной частотой несущей, испытывал бы частотно-селективные замира-

ния и продолжительные межсимвольные взаимодействия. Положительные значения разности между шириной полосы, занимаемой сигналом связи, и шириной полосы когерентности канала распространения свидетельствуют о преимуществах использования сигналов с непрерывным изменением частоты несущей (технология S2C) для связи по динамическим каналам с выраженной многолучевостью. Зарегистрированные значения этой разности отражают факт повышения скорости передачи данных (в частности, 2-12 кбит/с) по сравнению с устройствами связи, использующими методы формирования сигналов с несущей постоянной частоты.

Обобщение

На рис. 3,а представлен график зависимости скорости передачи данных от взаимной радиальной скорости перемещения устройств цифровой г/а связи в процессе передачи. Ин-

тервал радиальной скорости лежал в пределах $\pm 1,5$ узла. Как следует из рисунка, на всем диапазоне радиальных скоростей перемещения, на которых тестировались устройства связи, практические значения скорости передачи данных достигали максимальных значений.

На рис. 3,с представлен график зависимости вероятности битовой ошибки от скорости передачи данных. Из графика следует, что с возрастанием скорости передачи данных закономерно росла вероятность битовой ошибки. Для значений скорости передачи данных до 16 кбит/с вероятность битовой ошибки имела порядок 10^{-3} . Для значений более 16 кбит/с вероятность битовой ошибки возрастала до значений порядка 10^{-2} . В целом более высокая вероятность битовой ошибки в области высоких скоростей передачи данных объясняется более высокой сложностью канала связи.

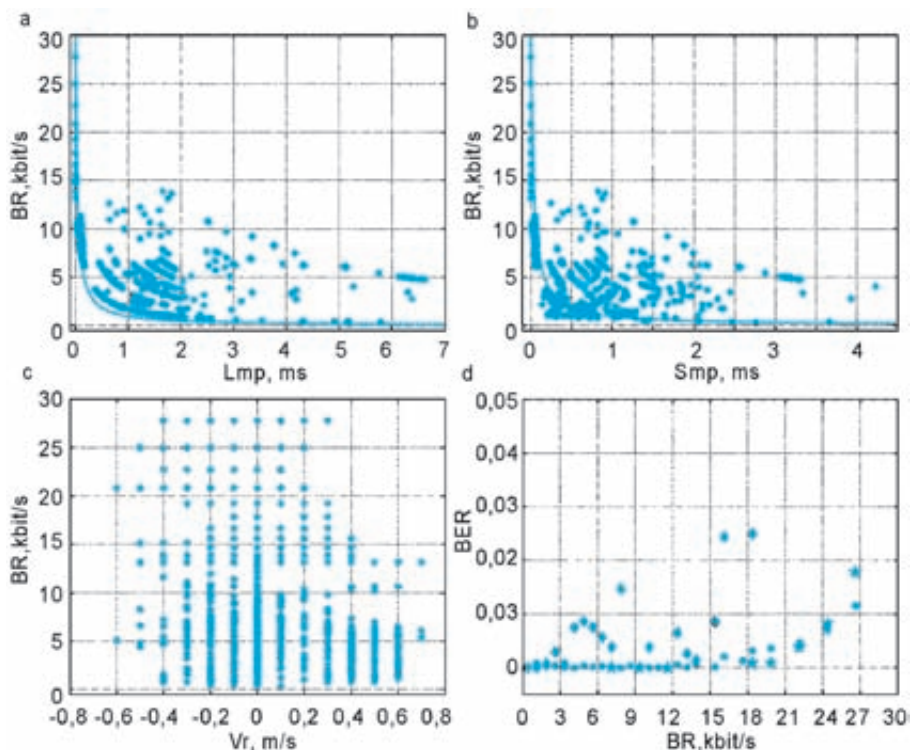


Рис. 3. Показатели производительности модема

При сопоставлении экспериментальных значений скорости передачи данных и сложности канала выявлена закономерность снижения производительности устройства г/а связи с возрастанием сложности канала. Используя в качестве показателя сложности канала максимальную избыточную задержку распространения сигнала, эта закономерность проиллюстрирована на рис. 3,а (для ее построения выполнено наложение результатов, полученных во всех трех тестах). Из нее следует, что при увеличении избыточной задержки распространения сигнала примерно до 300 мкс достижимая скорость связи уменьшается с наибольших значений (20-28 кбит/с) до промежуточных между 4 и 14 кбит/с (в среднем около 6 кбит/с). Промежуточное значение скорости передачи данных около 6 кбит/с изменяется медленно на широком интервале значений избыточной задержки распространения (0,3-4 мс), после чего медленно понижается до приблизительно 3 кбит/с.

Если в качестве показателя сложности канала использовать среднее квадратическое значение разброса избыточных задержек распространения лучевых компонентов, то в результате наложения результатов, полученных во всех трех тестах, получится зависимость, изображенная

на рис. 3,а. В обоих случаях (рис. 3,а и рис. 3,б) пунктирная линия соответствует скорости передачи данных, при которой ширина полосы передаваемого сигнала соответствует ширине полосы когерентности канала, т.е. условиям связи, в которых принимаемый сигнал не испытывает частотно-селективных замираний. Как следует из графика, в подавляющем большинстве случаев ширина частотной полосы, занимаемая сигналом, и соответственно скорость передачи данных может существенно превышать полосу когерентности г/а канала.

ВЫВОДЫ

1. Выявленная зависимость скорости передачи данных от среднеквадратического разброса задержек распространения сигнала позволяет прогнозировать среднее значение частотной эффективности устройств цифровой г/а связи в г/а каналах. Для устройств с эффективной шириной частотной полосы около 15 кГц среднее эффективное значение скорости передачи данных в г/а канале вида «судно-трал» составляет около 6 кбит/с.

2. Выявлено, что зависимость вероятности битовой ошибки от скорости относительных перемещений (на характерном для траления интервале относительных скоростей)

отсутствует или является слабо выраженной.

3. Выявленная зависимость вероятности битовой ошибки от скорости передачи данных позволяет сделать следующие заключения. На интервале значений до 2/3 от максимально достижимой скорости передачи вероятность битовой ошибки имеет порядок 10^{-3} . При возрастании скорости передачи данных далее в сторону максимальных значений вероятность битовой ошибки возрастает до значений порядка 10^{-2} . Эта зависимость позволяет выбирать оптимальный алгоритм коррекции данных. При работе на наибольших скоростях алгоритмы кодирования/коррекции данных должны иметь высокую сложность и обеспечивать сравнительно большую избыточность (например, в виде комбинации кода Голея и циклического перемежения). При работе с умеренными скоростями передачи данных алгоритмы коррекции данных могут быть простыми, а избыточности – малыми (например, код Хемминга и т.п.).

4. Экспериментальные работы подтвердили возможность использования устройств цифровой г/а связи для бескабельного обмена значительными объемами данных между судном и буксируемыми сенсорами (например, траловыми сенсорами) в реальном масштабе времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kebkal K.G., Bannasch R. Sweep-Spread Carrier for Underwater Communication over Acoustic Channels with Strong Multipath Propagation // Journ. of Acoustical Society of America. 2002. V. 112. Issue 5. P. 2043-2052.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и применение: 2-е изд. : пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
3. Rappaport T.S. Wireless communication. Chapter 3 and 4. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996.