УДК 551.463.28

© *Р. А. Балакин*[1], *Г. И. Вилков*[2]
[1]Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ФГБУ «ААНИИ»), г. Санкт-Петербург
[2]Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс» (АО «НПП «Радар ммс»), г. Санкт-Петербург
rigms@aari.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ И ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЛУЧЕВОСТИ В МЕЛКОВОДНЫХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АППАРАТУРЫ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Статья поступила в редакцию 30.11.2017, после доработки 08.10.2018.

Проведены натурные исследования шумов моря и многолучевого распространения акустического сигнала в мелководных арктических морях с дрейфующим ледяным покровом. Цель исследований заключалась в получении количественных оценок уровня и характера шумов моря, а также характеристик многолучевости, необходимых для расчетов гидроакустической аппаратуры связи, предназначенной для контроля и оперативной диагностики технически сложных подводных объектов, таких как добывающие нефтегазовые платформы и трубопроводы. В канале связи использовалась наиболее современная технология передачи данных с ортогональным частотным мультиплексированием OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*), предусматривающая одновременное использование большого числа несущих частот для передачи параллельного двоичного кода, что делает ее оптимальной для сложных условий арктических мелководных морей. Передача параллельного кода с введением некоторой избыточности позволяет обеспечивать высокую скорость передачи данных, максимальную дистанционность и помехоустойчивость. Исследования проводились целенаправленно применительно к использованию технологии OFDM в условиях мелководных арктических морей. Полученные спектральные характеристики шумов моря и количественные оценки многолучевости позволили обосновано выбрать и рассчитать параметры аппаратуры гидроакустической связи с технологией OFDM и обеспечить получение заданных эксплуатационных характеристик в неблагоприятных гидрологических условиях.

Ключевые слова: гидроакустика, шумы моря, многолучевость распространения звука, дрейфующий ледяной покров, технология связи OFDM.

R. A. Balakin[1], *G. I. Vilkov*[2]
[1]Arctic and Antarctic Research Institute» (FSBI «AARI»), St.-Petersburg, Russia
[2]Joint-stock company "Research and Production Enterprise « Radar mms» (JSC «NPP «Radar mms»), St.-Petersburg, Russia

RESEARCH OF ACOUSTIC NOISES AND CHARACTERISTICS OF MULTIPATH EFFECT IN SHALLOW ARCTIC SEAS TO OPTIMIZE PARAMETERS OF HYDROACOUSTIC COMMUNICATION EQUIPMENT

Received 30.11.2017, in final form 08.10.2018.

Field studies of acoustic sea noises and multipath effect characteristics of signal propagation in shallow Arctic seas covered by drifting ice are carried out. The research is made for the purpose of optimization of characteristics of the equipment of a hydro-acoustic channel of digital communications determined for control and operative diagnostics of technically complex underwater objects, such as submerged buoy stations, producing oil and gas platforms and pipelines. A most modern technology of equipment construction, OFDM-type (*orthogonal frequency-division multiplexing*), which provides simultaneous emanation of large amounts of narrow-band carrier frequencies for parallel binary code transfer, are planned to be used on the channel of communication. Parallel code transfer with some redundancy added provides high speed of data transfer, maximum remotability and noise immunity. Basic OFDM technology is particularly targeted for

Ссылка для цитирования: *Балакин Р. А., Вилков Г. И.* Исследования акустических шумов и характеристик многолучевости в мелководных арктических морях для оптимизации параметров аппаратуры гидроакустической связи // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 4. С. 17—27.

For citation: *Balakin R. A., Vilkov G. I.* Research of acoustic noises and characteristics of multipath effect in shallow arctic seas to optimize parameters of hydroacoustic communication equipment. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika.* 2018, 11, 4, 17—27.

doi: 10.7868/S2073667318040032

multipath effect jamming protection and pulse noise jamming peculiar to shallow ice-covered seas. Statistical measures for levels and nature of sea noises and quantitative meanings of amplitude distribution and certain acoustic rays' time delays caused by tending and drift velocity influence are received, as well as hydrological conditions. The results of the studies allow the reasonable choice and calculations of equipment parameters with OFDM technology, and they also allow providing reception of specified performance characteristics in adverse hydrological conditions.

Key words: hydro-acoustics, sea noises, multipath effect of a sound propagation, drifting ice, OFDM communications technology.

В связи с интенсификацией освоения Арктики подводная акустическая связь находит все более широкое применение в проектах промышленного назначения и в морских научных исследованиях. Конкурентный уровень эксплуатационных характеристик гидроакустической аппаратуры связи по отношению к ведущим зарубежным производителям [1, 2] должен отвечать следующим требованиям: допускаемый уровень вероятности битовых ошибок не более $1 \cdot 10^{-6}$, дальность связи не менее 3000 м, скорость передачи данных не менее 2400 бит/с. Эти требования должны выполняться во все сезоны года и в наиболее сложных условиях мелководных арктических морей с глубинами до 200 м и дрейфующим ледяным покровом. Достижению требуемых параметров гидроакустического канала связи в арктических морях препятствуют такие негативные явления морской среды, как повышенный уровень шумов торошения и растрескивания льда, многолучевое распространение сигнала с многократными переотражениями от дна и от поверхности моря, отрицательная рефракция звука.

В работе приведены результаты натурных исследований акустических шумов и характеристик многолучевого распространения сигнала в мелководных арктических морях с ледяным покровом, необходимых при проектировании гидроакустического канала связи с OFDM-технологией. Другие акустические параметры среды, такие как затухание звука при распространении, коэффициенты отражения и рассеяния звука от поверхности льда, вариации доплеровского сдвига частоты и фазы сигнала, нестационарность передаточной функции канала связи, были получены в дополнительных экспериментах в тех же районах или принимались как известные из справочных источников [3—5].

Современная технология передачи данных по гидроакустическому каналу связи. Для борьбы с негативными явлениями в гидроакустическом канале связи используются эффективные методы модуляции и кодирования сигналов, а также мощные средства цифровой обработки. Наиболее эффективной в настоящее время является технология передачи данных с ортогональным частотным мультиплексированием OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) в сочетании с избыточным помехоустойчивым кодированием [6—8]. Согласно этому методу передача данных осуществляется параллельным двоичным кодом высокой разрядности, предусматривающая одновременное излучение большого числа несущих частот (порядка нескольких сотен) и многопозиционной фазовой модуляцией раздельно каждой частоты, содержащей несколько бит передаваемой информации. В результате передачи параллельного двоичного кода достигается высокая скорость передачи данных.

На приемной стороне каждая несущая частота подвергается узкополосной фильтрации, что обеспечивает высокую помехоустойчивость к шумам различного рода.

Замирания сигнала вследствие многолучевости и связанные с этим выпадения отдельных бит данных преодолеваются избыточным кодированием, которое позволяет обнаруживать и восстанавливать не только одиночные, но и групповые ошибки.

Формирование большого числа одновременно излучаемых несущих частот с многопозиционной фазовой модуляцией и сложным кодированием, а также обработка принятого сигнала на приемной стороне в реальном времени осуществляются с использованием алгоритмов прямого и обратного быстрого преобразования Фурье (БПФ). Алгоритмы БПФ, многопозиционной фазовой манипуляции, а также помехоустойчивого кодирования выполняются цифровым сигнальным процессором, без которого выполнение столь сложной задачи в реальном времени было бы невозможным [9, 10]. Этим отчасти объясняется запоздалое использование технологии OFDM в гидроакустике.

При использовании технологии OFDM помехи от многолучевого распространения сигнала преодолеваются введением разделительных пауз между информационными символами, длительность которых равняется разности временных задержек между первым и последним лучами. В течение разделительной паузы успевает закончиться переходный процесс приема лучей, после чего устанавливается

стабильная фаза и амплитуда сигнала, образованного геометрической суммой лучей в точке приема. Эта сумма на некоторых частотах при отрицательной интерференции может оказаться очень малой и тогда имеет место частотно-селективное замирание сигнала, приводящее к ошибкам в одном или нескольких битах данных. Эти ошибки обнаруживаются и исправляются на стороне приема использованием избыточного кодирования определенной размерности [6].

Для реализации алгоритма работы OFDM требуется обязательная частотная и символьная синхронизация приемника с передатчиком [9]. Эффективным средством синхронизации в гидроакустическом канале связи является использование опорных пилот-сигналов в дополнение к информационным сигналам. Эти сигналы передаются между информационными частотами и распределены равномерно в пределах частотного диапазона с определенным шагом. Пилот-сигналы несут в себе известные значения фазы, которые используются в приемнике в качестве опорных. По отклонению фазы тестовых сигналов от ожидаемых значений рассчитываются поправки к фазовым сдвигам информационных несущих частот. Этот же способ коррекции применяется для введения поправок на сдвиги фаз, обусловленные допплеровским сдвигом частоты.

Для оптимизации технических характеристик аппаратуры для информационно-телекоммуникационной системы с гидроакустическим каналом связи, обеспечивающей достижение заданных требований, необходимо иметь детализированные количественные оценки негативных факторов морской среды в различных условиях применения. При исследовании акустических шумов и параметров многолучевости в мелководных арктических морях решался целый ряд задач.

Выполнялось исследование характера амплитудного спектра акустических шумов в достаточно широком частотном диапазоне, а также радиуса корреляции шумов в частотной области. Результаты этих исследований позволяют рассчитать требуемую мощность передатчика для заданной дальности связи, обоснованно выбрать эффективное количество пилот-сигналов в OFDM-символе, а также определить размерность помехоустойчивого избыточного кодирования [6].

Проводилось определение статистики временных задержек акустических лучей в зависимости от глубины моря, дальности связи, характеристик ледяного покрова, волнения моря и других факторов. Эти характеристики являются исходными для выбора длительности разделительных пауз между информационными символами и для расчета количества несущих частот в одном символе. Кроме того, статистика замираний сигнала ниже порога чувствительности приемника также рассчитывается, исходя из характеристик многолучевости.

Определялась статистика коротких импульсных помех большой амплитуды (от торошения и растрескивания льда), неизбежно приводящих к битовым ошибкам. Эти исследования необходимы для обоснованного выбора алгоритма автоматического регулирования усиления (АРУ) и размерности избыточного помехоустойчивого кодирования, определяющего его корректирующую способность.

Исследования акустических шумов в арктическом бассейне проводились в прошлые годы на регулярной основе и имеются соответствующие объемы данных [10]. Однако эти исследования проводились преимущественно аналоговыми методами, поэтому сохранились только усредненные амплитудно-частотные характеристики шумов, недостаточные для спектрального анализа.

Исследования многолучевости распространения звука в прошлом проводились с недостаточной детализацией. В частности, не оценивались параметры временной изменчивости передаточной функции канала и распределение временных задержек акустических лучей, необходимые для расчетов в OFDM-технологии.

Методика исследований. Измерения акустических шумов в мелководных арктических морях выполнялись в рейсах научно-экспедиционных судов (НЭС) «Академик Федоров» и «Академик Трешников» в весенне-летние сезоны 2014—2016 гг.. Шумы моря измерялись по традиционной методике путем измерения акустического давления воды с помощью ненаправленных широкополосных гидрофонов, погружаемых на различные глубины. Использовались пьезокерамические гидрофоны цилиндрической и сферической формы, совместно перекрывающие диапазон частот 10—40 кГц. Этот диапазон частот был выбран исходя из рабочей частоты канала связи с дальностью до 3000 м и скорости передачи данных не менее 2400 бит/с [11]. Сферический гидрофон диаметром 40 мм имел чувствительность 35 мкВ/Па и резонансную частоту 45 кГц, лежащую за пределами рабочего диапазона. Цилиндрический гидрофон диаметром 60 мм имел чувствительность 80 мкВ/Па при резонансной частоте 25 кГц.

Гидрофоны поочередно опускались на экранированном коаксиальном кабеле на глубины 5, 10 и 15 м и на каждой глубине выполнялся сеанс измерений продолжительностью около 15 мин. Гидрофоны опускались непосредственно с борта судна или с поверхности льда через пробуренную лунку. Защита гидрофонов от шумов обтекания выполнялась с помощью упругой подвески и защиты кабеля оболочкой из мягкой ткани с бахромой. Внутри гидрофонов размещался малошумящий буферный усилитель для защиты от влияния собственных параметров коаксиального кабеля. Фильтрация внеполосных шумов осуществлялась с помощью широкополосного аналогового LC-фильтра, обеспечивающего более широкий динамический диапазон уровней сигнала в 120 дБ по сравнению с цифровым фильтром.

Регистрация сигналов гидрофона производилась цифровым методом, используя для этого звуковую карту компьютера с частотой дискретизации 120 кГц. Согласно критерию Найквиста, такая частота дискретизации соответствует спектру шумов с верхней граничной частотой до 60 кГц. Ширина полосы амплитудно-частотной характеристики звуковой карты компьютера многократно превышала исследуемый частотный диапазон шумов, а на рабочем участке характеристика имела плоскую форму с калиброванной чувствительностью.

Результаты измерения шумов в виде непрерывных рядов наблюдения с длительностью 15 мин регистрировались в памяти компьютера. Параллельно с регистрацией шумов в компьютер записывалась сопутствующая информация, включая дату и время наблюдений, географические координаты, глубину моря, заглубление гидрофонов, погодные и ледовые условия.

Параметры многолучевости измерялись с помощью разнесенных по дальности акустического излучателя и приемника. В качестве излучателя использовался акустический маяк с автономным электропитанием. Маяк работал на несущей частоте 24 кГц с длительностью импульса 2 мс и периодом следования 250 мс при мощности излучения около 30 Вт. Маяк устанавливался подо льдом на глубине 5 м, или опускался в воду с борта шлюпки, отходящей от судна на расстояние до 3000 м.

Приемником служил приемный гидрофон с коническим рупором, обеспечивающим диаграмму направленности с углом порядка 30°. Приемник погружался непосредственно у борта экспедиционного судна на различные глубины от поверхности до 15 м и разворачивался по азимуту и углу места в пределах 90°. Фиксация гидрофона в определенных угловых положениях позволяла контролировать влияние заглубления на картину многолучевости, а развороты по азимуту и углу места — оценивать углы прихода акустических лучей в вертикальной плоскости по максимуму амплитуды.

Принимаемые сигналы маяка регистрировались на экране цифрового осциллографа, который подключался через USB-порт к компьютеру. Осциллограф позволял измерять амплитуды приходящих акустических сигналов и их временные задержки относительно местного импульса синхронизации. Последующая обработка и анализ результатов выполнялись на компьютере.

Обработка результатов измерений акустических шумов. Полученные данные по акустическим шумам сохранялись в компьютере и были подвергнуты математической обработке. Для обработки использовалось программное обеспечение «PowerGraph 3.3» [9], позволяющее выполнять предварительное редактирование данных, статистическую обработку, построение гистограмм, графиков и таблиц. При редактировании измерительной информации проводилась предварительная отбраковка данных по качеству записи и отсутствию бракованных фрагментов, а также калибровка и нормализация согласно паспортной чувствительности гидрофонов, выделение блоков заданного размера для обработки. Образец записи шума приведен на рис. 1.

Обработка акустических шумов предусматривала расчет в каждом блоке данных среднего значения амплитуды шума, дисперсии, среднеквадратического отклонения значения шума. Кроме того, рассчитывались показатели формы статистического распределения — эксцесс и асимметрия.

Среднеквадратическое значение шума RMS рассчитывалось по формуле

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i^2}\ , \tag{1}$$

где N — число измеренных значений шума; X_i — значения шума в i-ой точке.

Дисперсия шумов (энергетическая мощность) определялась по формуле

$$G^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_i - M_x)^2 . \tag{2}$$

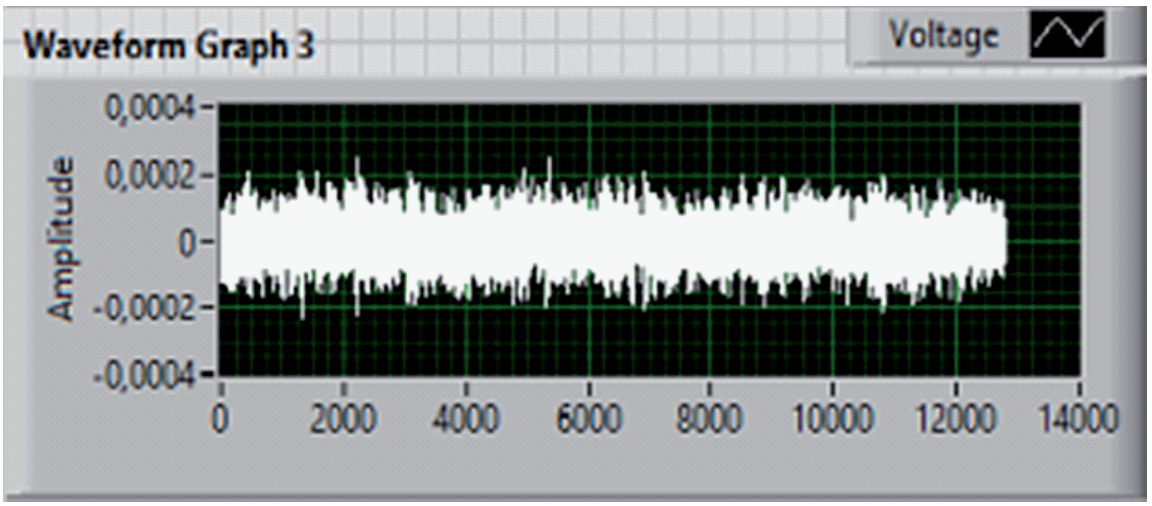

Рис. 1. Образец записи шума.

Fig. 1. Sample of noise record.

Стандартное отклонение S по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_i - M_x)^2} \ . \qquad (3)$$

Моменты статистического распределения третьего и четвертого порядков, характеризующих асимметрию распределения и эксцесс, рассчитывались по аналогичным формулам (2) и (3), но значения X_i возводились соответственно в степень 3 и 4.

Характерным признаком акустических шумов в арктических морях является наличие отдельных коротких импульсов большой амплитуды, обусловленных термическим растрескиванием и торошением льда. Импульсы следуют с относительно большим и не регулярным периодом порядка одной секунды и вызывают интенсивные помехи, которые на время действия импульса приводят к битовым ошибкам сразу на всех несущих частотах. Стандартный статистический анализ шумов слабо реагирует на наличие таких импульсных помех ввиду малости их энергетического вклада, не давая адекватной оценки их реальной значимости.

В технологии связи OFDM для защиты от импульсных помех большой амплитуды применяют специальный цифровой алгоритм, позволяющий замещать помеху усредненным значением предшествующего сигнала с последующей коррекцией избыточным кодированием.

Второй этап математической обработки шумов заключался в спектральном анализе, позволяющем определить частотное распределение шумов и обосновать выбор рабочего диапазона частот гидроакустического канала связи. Для спектрального анализа использовался алгоритм БПФ, обеспечивающий высокую производительность вычислений. Для спектрального анализа выделялись блоки данных размером 16384 отсчета, кратные степени 2, что обусловлено спецификой алгоритма БПФ. По результатам спектрального анализа была определена зависимость распределения спектральной мощности шума от частоты.

Обработка результатов измерения характеристик многолучевости. Характеристики многолучевого распространения акустического сигнала от точки к точке исследовались с целью количественной оценки их влияния на помехоустойчивость канала. Измерялись временные задержки отдельных лучей, а также их амплитуды и фазы в различных географических точках и в результате определялись вероятностные характеристики распределения этих величин в зависимости от глубины моря, дальности связи, наличия ледяного покрова и от вертикального распределения скорости звука.

Для оптимизации параметров аппаратуры связи большое значение имеет тип статистики распределения амплитуды и фазы акустических лучей, приходящих в точку приема. При отражении сигнала от нижней поверхности льда принципиально могут наблюдаться два различных типа распределения в зависимости от характера неровностей отражающей поверхности (диффузный или зеркальный) [12].

Для выявления типа распределения амплитуды и фазы лучей потребовалось использовать математическую модель канала связи, учитывающую алгоритм обработки и метод кодирования передаваемой информации. В качестве такой модели принимался канал связи с технологией OFDM, ориентированной на подавление помех многолучевости. Модель канала с диффузным типом отражения лучей подчиняется распределению по статистике Рэлея, предполагающей равновероятную амплитуду и фазу всех приходящих лучей. При таком распределении имеется определенная и достаточно большая вероятность сложения всех лучей в противофазе, при которой происходит частотно-селективное замирание сигнала ниже порога чувствительности. Для восстановления утраченных сигналов в результате замираний амплитуды требуется применять избыточное кодирование, достаточное для полного обнаружения и восстановления утраченных данных. Такая мера приводит к значительным потерям информативности канала и снижает скорость передачи данных.

Модель канала с частично-зеркальным типом отраженных сигналов подчиняется статистике распределения по Райсу, предполагающей наличие в составе сигнала одного доминантного луча с преобладающей амплитудой и постоянной фазой. При распределении амплитуды лучей по Райсу частотно-селективных замираний сигнала не происходит.

Согласно математической модели [7, 8], принятый сигнал рассматривается как сумма статистически независимых акустических лучей с различными временными задержками, из которых каждый в свою очередь определяется случайной функцией распределения коэффициентов передачи и выражается формулой

$$r(t) = \sum_k h_k(t) \cdot s(t - \tau_k(t)), \tag{4}$$

где $r(t)$ — принятый сигнал; $s(t)$ — переданный сигнал; τ_k — временная задержка k–го луча; h_k — амплитуда k–го луча в относительных единицах.

Численные расчеты по формуле (4) позволяют оценить вероятностные характеристики суммарного сигнала $r(t)$ и процентное содержание сигналов с замираниями амплитуды ниже порога чувствительности приемника.

Результаты исследований шумов. Проведенные исследования акустических шумов в арктических морях позволили определить диапазон изменения амплитуды шумов, оценить влияние ледяного покрова и гидрометеорологических условий, а также определить статистические характеристики типичных шумов, обусловленных торошением льда и термическим растрескиванием ледяных полей. В общей сложности в период экспедиционных рейсов НЭС «Академик Федоров» и «Академик Трешников» были проведены 146 измерений характеристик шумов в различных точках, показанных на рис. 2.

Полученное по результатам измерений распределение спектральной плотности шумов в зависимости от частоты приведено на рис. 3.

График показывает преобладание шумов в нижнем участке частотного спектра, а также очень большой разброс в зависимости от интенсивности торошения льда, скорости ветра, волнения моря. В рабочем диапазоне частот системы с гидроакустическим каналом связи 19—24 кГц разброс по уровню шумов составил 25 дБ.

Измеренные уровни шумов в выбранном частотном диапазоне оказались выше ожидаемых значений на 10—15 дБ относительно справочных данных [8] и составили 35 дБ в периоды торошения льда или при повышении скорости ветра более 7 м/с при неподвижном ледяном покрове. Повышенный уровень шумов потребовал перерасчета исходных параметров силовых блоков аппаратуры для обеспечения заданной дальности связи 3000 м и отношения сигнала к шумам в точке приема не менее 2.5, что соответствует допустимому пределу вероятности битовых ошибок $1 \cdot 10^{-6}$. Такие параметры обеспечиваются при излучаемой мощности сигнала 10 Вт и благоприятных гидрологических условиях в части вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ).

При условиях отрицательной рефракции звука дальность связи снижается до 500 м и менее, а при больших дистанциях в зонах акустической тени связь обеспечивается только при заглублениях антенны в пучности звукового давления доминантного луча согласно расчетной лучевой картине.

Шумовые помехи термического растрескивания льда наблюдались в осенне-зимний период при резком снижении температуры воздуха. Шумы имели характер коротких импульсов длительностью около 1 мс с большой амплитудой, на 30—40 дБ превышающей шумы торошения льда, рис. 4. Импульсы

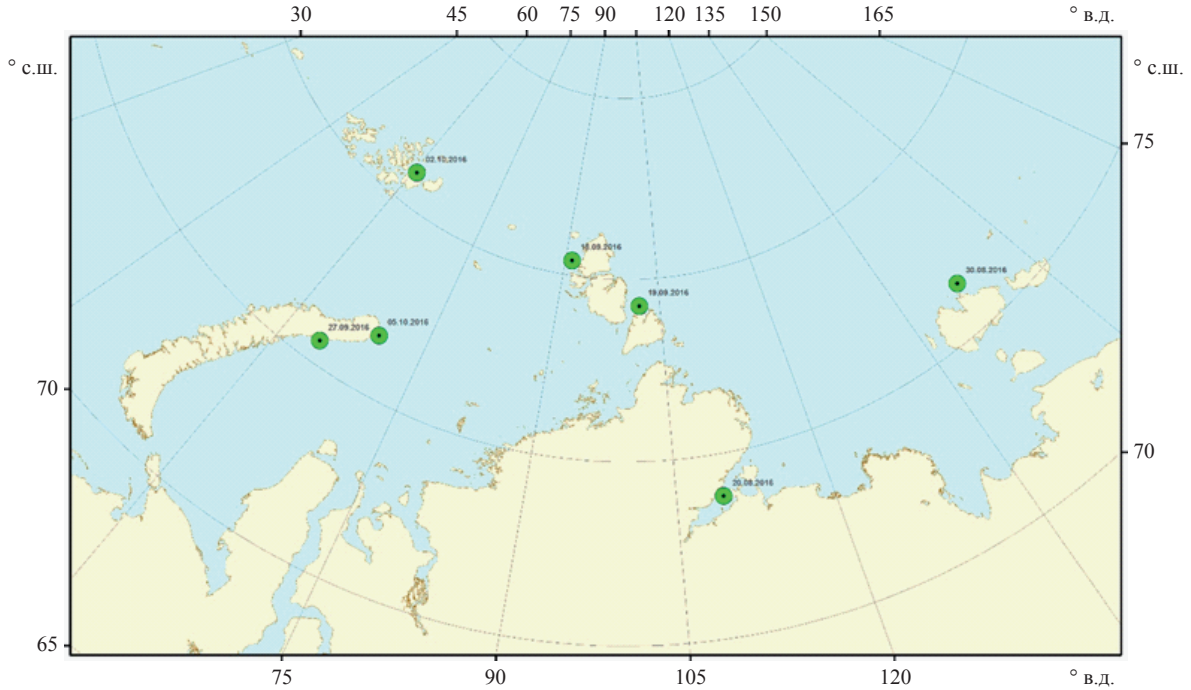

Рис. 2. Точки определения характеристик шумов.

Fig. 2. Points for determination of noise characteristics.

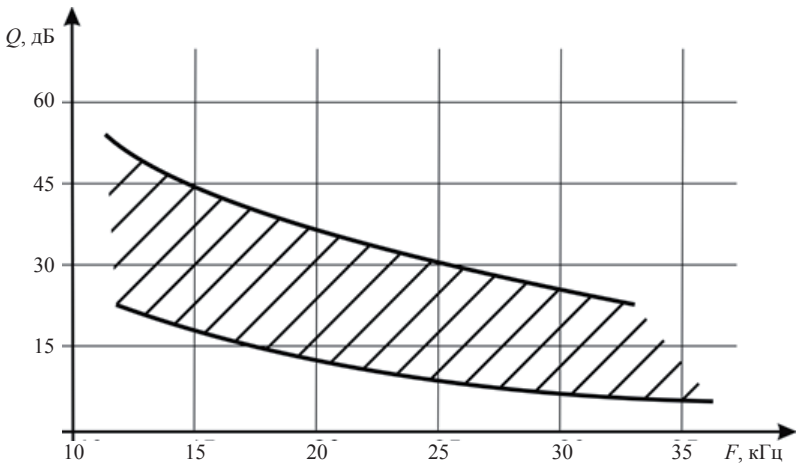

Рис. 3. Распределение спектральной плотности шумов в мелководных арктических морях (в дБ относительно 1 мкПа).

Fig. 3. Distribution of noise density in arctic shallow seas (in dB as for 1 μPa).

повторялись с нерегулярным периодом 0.5—2 с и по времени проявления не превышали 5 % от общего времени наблюдений. В интервалах проявления шумов растрескивания льда работа аппаратуры связи полностью блокировалась.

Полученные оценки интенсивности шумов термического растрескивания льда позволили предложить и испытать эффективные меры защиты акустического приемника от блокирующего действия такого рода помех. Для этого в схему акустического приемника были внесены усовершенствования системы автоматической регулировки усиления, направленные на замену аналоговых цепей с большой инерционностью безынерционной цифровой схемой. В результате усовершенствования системы АРУ резко уменьшился объём потерь информации при воздействии импульсной помехи. Кроме того, был применен улучшенный алгоритм обработки сигнала, который на цифровом уровне «вырезал» пораженные помехой участки сигнала и заменял их интерполированным значением смежного участка сигнала.

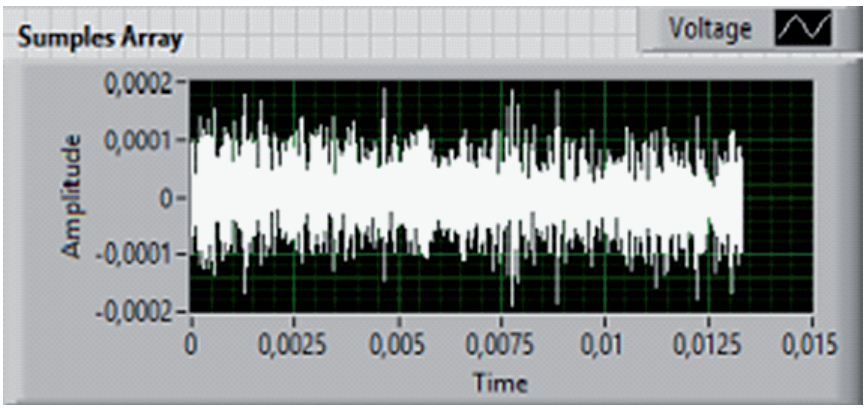

Рис. 4. Шумовые помехи термического растрескивания льда.

Fig. 4. Noise interferences of thermal ice cracking.

Остаточные потери отдельных бит информации на интервале длительности короткой импульсной помехи обнаруживались и исправлялись алгоритмом избыточного кодирования информации.

Результаты исследований многолучевости. Многолучевость исследовалась в диапазоне дальности связи 250—3000 м. На малых дистанциях многолучевость перекрывалась реверберацией, при которой отдельные акустические лучи становятся неразличимыми, накладываясь друг на друга и формируя непрерывный плавно спадающий фон, соответствующий экспоненциальному закону. Длительность спада реверберации до энергетически значимого уровня амплитуды составляла около 15 мс. На бóльших временных интервалах уровень реверберации перекрывается акустическими шумами.

На дистанциях 500—3000 м в точку приема приходило от 3 до 7 лучей, причем во всех случаях наблюдался один доминантный луч с преобладающей амплитудой в среднем 20—70 %, что соответствует статистике распределения Райса. Это означает, что в канале гидроакустической связи отсутствуют частотно-селективные замирания и можно использовать наиболее эффективную фазовую модуляцию поднесущих частот с достаточно высоким индексом.

Наблюдаемый диапазон разности временных задержек отдельных лучей составил 4—32 мс, причем бóльшие значения наблюдались на бóльших дальностях связи.

Амплитуда лучей в зависимости от дистанции связи изменялась в больших пределах и определялась главным образом характером ВРСЗ и соответствующим типом рефракции звуковых лучей. В зонах акустической тени уровень сигнала снижался до порога шумов, при увеличении дальности снова восстанавливался почти до исходного уровня, но количество различимых лучей с энергетически значимым уровнем снижалось до 2—3, рис. 5.

Выявлено заметное сокращение количества приходящих лучей в зависимости от наличия ледяного покрова, что объясняется резким снижением коэффициента отражения звука от нижней поверхности льда по сравнению с зеркальным отражением от свободной поверхности воды.

Приведенная лучевая картина рассчитывалась по типовой программе только для энергетически значимых лучей с максимальной амплитудой, исходя из глубины моря, дистанции связи, профиля ВРСЗ, заглубления излучателя и приемника. Характер лучевой картины не оказывает непосредственного влияния на расчетные параметры аппаратуры связи, но позволяет обоснованно выбрать заглубление приемной антенны и проконтролировать соответствие ожидаемых и фактических значений отношения сигнала к шумам. Регулировка заглубления гидрофона согласно лучевой картине позволила увеличить уровень сигнала до 15 дБ.

Амплитуда полезного сигнала оценивалась по осциллограмме, вид которой приведен на рис. 6.

Осциллограмма позволяет с достаточной точностью измерить амплитуды и временные задержки приходящих лучей, а также их изменчивость во времени. Изменчивость сигнала характеризует нестационарность передаточной функции канала связи и дает исходные данные в формате технологии OFDM для расчета максимально допустимой длительности информационных символов, определяющих скорость передачи данных. Нестационарность передаточной функции измеряется как скорость измене-

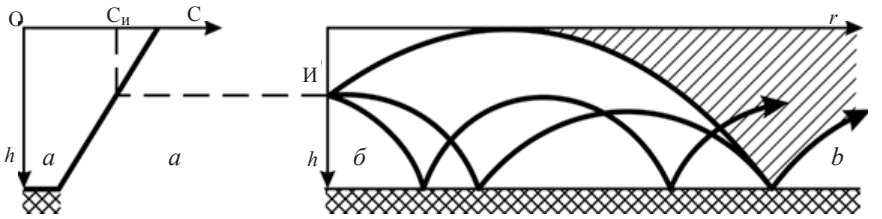

Рис. 5. Пример отрицательной рефракции звука.
а — профиль ВРСЗ; *б* — ход звуковых лучей и зона тени.

Fig. 5. Example of negative noise refraction.
a — acoustic velocity vertical profile; *b* — path of sound rays and shadow zone.

ния во времени характеристики сигнала, влияющей на содержание принимаемых символов данных. В OFDM-технологии такими характеристиками являются амплитуда и временная задержка акустических лучей, или связанные с этими характеристиками вариации фазы и доплеровского сдвига частоты. Наибольшие измеренные значения нестационарности амплитуды доминантного луча составили ±60 % за секунду, а флуктуации временной задержки этого же луча составили ±8 мс за секунду. Эти величины позволяют рассчитать предельно допустимую длительность информационных символов и индекс фазовой модуляции (число позиций кодового созвездия).

В таблице приведены полученные нормированные значения амплитуды лучей в относительных единицах, а также величины временных задержек в мс по отношению к первому лучу.

Таким образом, исследования показали, что для технологии OFDM на малых глубинах моря до 200 м максимальную разность временных задержек лучей можно принять равной 32 мс.

Качественные характеристики гидроакустического канала связи могут быть значительно повышены за счет организации многоканальной связи, позволяющей преодолевать отрицательную рефракцию лучей, снижающую дальность связи.

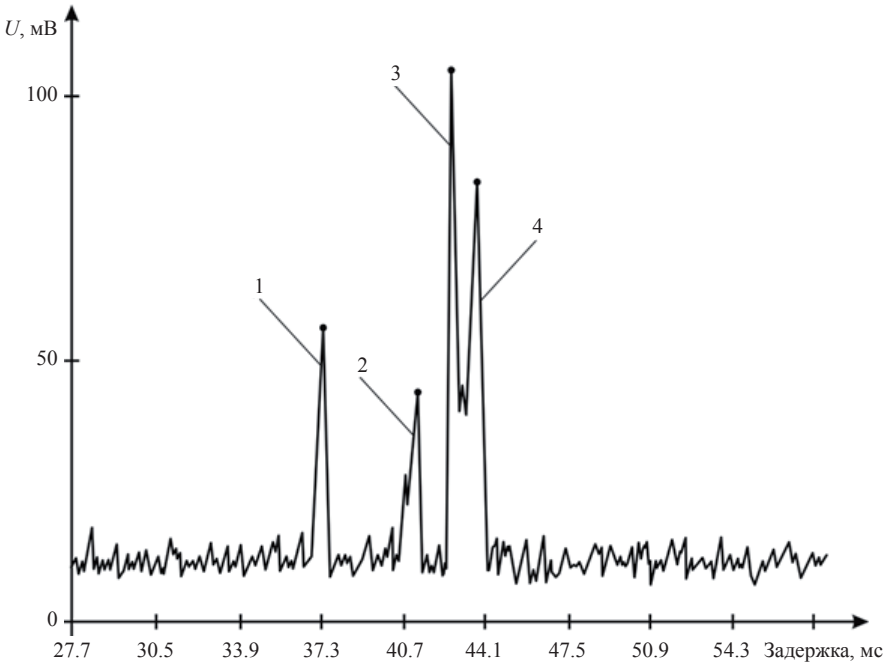

Рис. 6. Осциллограмма многолучевости.
Луч 1 — амплитуда 54, задержка 0; луч 2 — амплитуда 37, задержка 19.9; луч 3 — амплитуда 110, задержка 27; луч 4 — амплитуда 85, задержка 32.

Fig. 6. Oscillogram of multipath effect.
Ray 1 — amplitude 54, delay 0; ray 2 — amplitude 37, delay 19.9; ray 3 — amplitude 110, delay 27; ray 4 — amplitude 85, delay 32.

Статистические характеристики многолучевости

Statistic characteristics of multipath effects

Номер луча	Относительная задержка, мс	Средняя относительная амплитуда луча, отн. ед.	Тип распределения вероятности	Доплеровский сдвиг частоты*, %
1	0	1.0	Рэлеевский	0
2	5	0.7	Рэлеевский	±0.1
3	8	1.2	Рэлеевский	±0.15
4	1.5	0.4	Рэлеевский-Райсовский	±0.3
5	7	0.2	Смешанный	±0.3
6	32	0.1	Смешанный	±0.5

Примечание. *Расширение доплеровского спектра вызвано волнением моря и дрейфом льда.

***

Проведенные исследования амплитудного и частотного спектра акустических шумов и характеристик многолучевости с учетом влияния дрейфующего ледяного покрова позволили получить количественные данные, необходимые для расчета специ+фических параметров аппаратуры акустического канала связи с технологией OFDM.

Измеренные уровни спектральной плотности шумов в периоды торошения льда оказались выше справочных значений 15 дБ, что потребовало корректировки расчетов всех силовых элементов аппаратуры в сторону повышения мощности, чтобы обеспечить желаемую дальность связи, скорость передачи данных и требуемое отношение сигнала к шумам в точке приема для ограниченния вероятности битовых ошибок на допустимом уровне.

Полученные оценки интенсивности мощных импульсных шумов термического растрескивания льда, полностью блокирующих связь, позволили предложить и проверить достаточно эффективные меры защиты акустического приемника от такого рода помех. Были предложены усовершенствования приемника на аппаратном и алгоритмическом уровнях, которые устранили блокирующее действие импульсных помех и сократили потери принимаемых данных до допустимого уровня $1{\cdot}10^{-2}$. При таком уровне вероятности битовых ошибок оказалось возможным снизить этот уровень до требуемых значений $1{\cdot}10^{-6}$ путем введения избыточного кодирования, но ценой значительного снижения скорости передачи данных примерно в 3 раза.

Исследования многолучевости распространения сигнала в зависимости от глубины моря, профиля ВРСЗ, характеристик ледяного покрова, нестационарности передаточной функции канала связи, послужили исходными данными для расчета основных параметров аппаратуры с технологией OFDM. В частности, получены данные для расчета оптимального заглубления приемной антенны в пучностях звукового давления согласно расчетной картине многолучевости и траектории доминантного луча. Оптимальное заглубление приемной антенны позволяет в необходимых случаях нейтрализовать негативное влияние отрицательной рефракции звука и обеспечить заданную надежность связи в зонах акустической тени на дальности до 3000 м.

Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в ходе выполнения прикладных научных исследований по соглашению № 14.607.21.0009 от 5 июня 2014 г. в рамках Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы», уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0009.

References

1. *Al-Mahmoud M., Zoltowski M. D.* Performance evaluation of code-spread OFDM using vandermonde spreading. *IEEE radio and wireless symposium.* 2009, 320—323.
2. *Cimini L. J. Jr.* Analysis and Simulation of a Gigital Mobile Channel using Orthogonal Frequency Division Multiplexing. *IEEE Trans. Comm.* July 1985, COM-33, 7, 665—675.
3. *Tiurin A. M.* etc. Fundamentals of hydroacoustics. *Leningrad, Sudostroenie,* 1996 (in Russian).
4. *Yevtyutov A. P.* etc. Handbook of hydroacoustics. *Leningrad, Sudostroenie,* 1988 (in Russian).
5. *Chitre M., Shahabudeen S., Stojanovic M.* Underwater Acoustic Communications and Networking: Resent Advances and Future Challenges. *Marine Technology Society Journal.* 2008, 42, 1, 103—116.

6. *Morelos-Zaragoza R.* The art of noise-immune coding. Methods, algorithms, application. *M., Technosphere,* 2005 (in Russian).
7. *Sergienko A. B.* Digital signal processing. Tutorial. 3rd ed. *SPb., BHV-Petersburg,* 2011 (in Russian).
8. *Goncharov V. N.* et al. Analysis of the efficiency of adaptive spatial filtration of marine reverberation in multipath sound propagation. *Acoustic Zh.* 1993, 39, 2, 241—248 (in Russian).
9. *Warner W. D., Leung C.* OFDM/FM Frame Synchronization for Mobile Radio Data Communication. *IEEE Trans. Veh. Techn.* August 1993, 42, 3, 302—313.
10. *Rutenko A. N.* Monitoring of anthropogenic acoustic noise on the shelf Sakhalin Island. *Acoustic Zh.* 2010, 56, 1, 77—81 (in Russian).
11. *Shchurov V. A., Lyashkov A. S.* Influence of hydrological conditions on losses during propagation of sound on the shelf. *Acoustic Zh.* 2013, 4, 459—468 (in Russian).
12. *Alexandrov I. A.* Reflection of sound from smooth ice: methodology and results of calculations. *Acoustic Zh.* 1994, 40, 4, 673—676 (in Russian).