*АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2019, том 65, № 5, с. 619–629*

## АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

*УДК 534.232,551.463.2*

# АППАРАТУРА АКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАБОТЫ АВТОНОМНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДОННОЙ СТАНЦИИ НА ШЕЛЬФЕ

**© 2019 г. Д. Г. Ковзель***

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия*

**e-mail: dgk06@mail.ru*

Поступила в редакцию 11.03.2019 г.
После доработки 11.03.2019 г.
Принята к публикации 07.05.2019 г.

Представлена аппаратура акустической связи с донными станциями гидроакустического комплекса “Шельф-2014” – встроенные акустические модемы донных станций и переносное телекомандное устройство. Описаны основные технические решения, принятые в процессе разработки и подтвержденные рядом проведенных экспериментов. Рассмотрены результаты работы аппаратуры в морских условиях и намечены пути ее дальнейшего развития.

*Ключевые слова:* автономная акустическая станция, акустический модем

**DOI:** 10.1134/S0320791919050113

## ВВЕДЕНИЕ

Представляемая аппаратура является подсистемой гидроакустического измерительно-регистрационного комплекса “Шельф-2014” [1], разработанного в ТОИ ДВО РАН в 2013–2015 гг. и применяемого для акустического мониторинга антропогенной деятельности на северо-восточном шельфе о. Сахалин. В настоящее время комплекс развивается с учетом опыта практической работы в море [2, 3]. “Шельф-2014” включает донные станции, поверхностные телеметрические буи, береговую инфраструктуру передачи, обработки и представления данных [4], а также описываемую в данной статье аппаратуру акустической связи со станциями – встроенные акустические модемы станций и переносное телекомандное устройство (ТКУ) [5]. С момента первого применения во время мониторинга сейсморазведочных работ в 2015 г. эти устройства непрерывно усовершенствовались как в плане улучшения алгоритмов передачи данных по акустическому каналу связи, так и в плане расширения их функциональности [6].

Основным назначением этой аппаратуры является контроль состояния установленных в море акустических станций дистанционно и без прерывания их работы. Такой контроль повышает надежность длительного акустического мониторинга, позволяет снизить число подъемов и постановок донных станций. Однако практика экспедиционной работы показала, что функции аппаратуры акустической связи этим не ограничиваются. Канал общения со станцией, не требующий подключений, остановки работы станции, вскрытия корпуса оказался очень удобен для диагностики станции перед постановкой в море. Проверка станций производится именно в том состоянии, в котором они продолжат свою работу в море. Информация предоставляется человеку в визуальной форме, с подробными и точными значениями важных параметров работы станции, при этом ведется автоматический лог всех операций. Еще одна функция – поиск станций, по каким-либо причинам сместившихся с точки постановки. Описываемая аппаратура оказалась весьма эффективным инструментом поиска путем измерения расстояния до станции и триангуляции. Так, в июне 2016 г. две донные станции оказались “замыты” песком и после сброса якорей всплыли с задержкой. По погодным условиям судно не дождалось всплытия поплавков, а повторить попытку подъема станций удалось только через двое суток. За это время станции были смещены течением на 8 и 18 км. Однако достаточно большая дальность связи описываемой аппаратуры (8 км) позволила быстро обнаружить станции и навести на них судно, несмотря на туман (видимость не превышала 150 м).

Аппаратура, способная решать поставленные выше задачи, известна и имеется в продаже – например модемы и ТКУ производства EvoLogics GmbH [7] или Teledyne Benthos [8]. Однако применение этих устройств в составе донной станции “Шельф-2014” нельзя было бы считать оптимальным решением. Возникают конструктивные про-

блемы – модем необходимо встроить внутрь корпуса станции либо обеспечить кабельное соединение между корпусами модема и станции. Не всегда удобны режимы работы этих модемов – для снижения средней расходуемой мощности в них используется дежурный режим, в котором модем большую часть времени находится в состоянии сна и просыпается для проверки наличия вызывного акустического сигнала на короткие отрезки времени с заранее заданным периодом. Такой режим увеличивает время установления связи с модемом до нескольких минут, в течение которых судно вынуждено находиться в дрейфе. В условиях сильных течений и малых глубин, характерных для Сахалинского шельфа, это может существенно осложнить управление судном, не оборудованным системой динамического позиционирования. Даже при использовании дежурного режима модем с батареями его электропитания существенно увеличивает габариты и вес станции в сборе. Следует упомянуть и весьма высокую цену такого оборудования. Исходя из вышесказанного, при разработке станции "Шельф-2014" изначально предполагалось наличие встроенного в конструкцию станции недорогого и малопотребляющего программно-аппаратного акустического модема. Определим основные технические требования к нему и обусловленные этими требованиями структурные и алгоритмические решения.

## ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Основным требованием к встроенному модему станции является его малое энергопотребление в режиме приема – существенно меньше 0.3 Вт, потребляемых акустическим регистратором станции. В режиме передачи, в отличие от приема, модем работает очень малые промежутки времени и затратами энергии на передачу можно было бы пренебречь. Однако при большой мощности передатчика и при разряженных батареях питания станции (в конце длительной постановки) может произойти перезагрузка микроконтроллера станции из-за кратковременной "просадки" напряжения питания. В настоящее время потребляемая передатчиком модема мощность ограничена 3 Вт. Важной характеристикой любой системы связи является дальность устойчивой работы. В данном случае для опроса станции судно может подойти непосредственно к точке постановки и минимально необходимая дальность - 100 метров. Однако желательны большие значения. Опрос станций может производиться с судов разных типов, в том числе с глубокой осадкой. Типичные глубины в точках постановки станций на северо-восточном шельфе о. Сахалин равны 10–40 м. Чтобы избежать захода судна на малые глубины для проверки станций, желательно обеспечить устойчивую работу канала связи на дистанциях несколько километров. Если дальность связи превышает 5 км, становится возможным опрашивать станции, установленные возле нефтедобывающих платформ, без захода судна в зоны, требующие специального разрешения. Максимальная дальность желательна также при поиске станций, смещенных с места постановки (например, рыболовецким тралом). Еще один параметр систем связи – скорость передачи данных – в данном случае не является приоритетным. Полная информация о текущем состоянии станции может быть упакована в несколько байт, столь же малый объем имеют команды, подаваемые через ТКУ с борта судна. Практически важно время опроса станции – но оно определяется не столько скоростью передачи данных, сколько эргономичностью, продуманностью интерфейса между ТКУ и человеком. Рассмотренные выше технические требования нашли свое выражение как в алгоритмах работы аппаратуры, так и в реализованных схемотехнических, программных и конструктивных решениях.

## БАЗОВЫЕ СХЕМНЫЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Поскольку аналоговые и аналого-цифровые цепи акустического приемного тракта вносят существенный вклад в общее энергопотребление (40% для станции "Шельф-2014"), было решено совместить приемные тракты модема и станции, т.е. акустический модем использует для обнаружения информационного сигнала поток данных от АЦП станции (см. рис. 1). Совмещены также и контроллеры модема и станции. Приемник и частично передатчик акустического модема реализованы как подпрограммы, работающие в контроллере донной станции параллельно с основной программой управления станцией и записи данных на карты памяти. Аппаратные части модема включают только усилитель низкой частоты (УНЧ) с цепями питания, согласующий трансформатор и передающий гидрофон. Дополнительным достоинством такого решения является то, что сам факт ответа станции на запрос подтверждает исправность измерительного тракта станции, включая измерительный гидрофон. Следует отметить, что внутри микроконтроллера реализация модема не является чисто программной. Все программы станции, включая и модем, активно используют разнообразные внутренние аппаратные средства микроконтроллера PIC32MX795F512H – умножитель, таймеры, порты ввода/вывода, модули широтно-импульсной модуляции и т.д. Программируемость режимов работы этих внутренних модулей микроконтроллера и связей между ними позволяет уже после изготовления станции реализовывать различные алгоритмы передачи данных по акустическому каналу связи и использовать для этого различные модули. Например, к выводу микроконтроллера, соединенному со входом УНЧ модема (рис. 1), программно может быть подключен токовый выход модуля CTMU (мо-

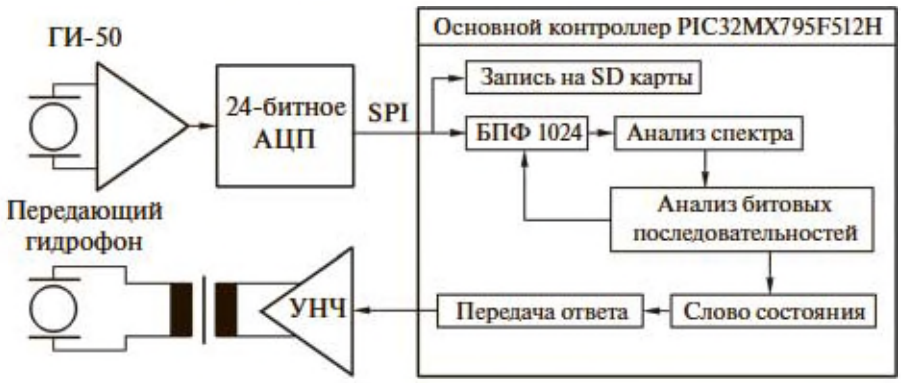


**Рис. 1.** Совмещенные структурная схема акустического модема и блок-схема алгоритма его работы.

дуль измерения времени заряда), выход модуля PWM (широтно-импульсной модуляции) или порта общего назначения (GP). Такой подход совмещает ряд достоинств: минимизируется аппаратная часть станции – и в то же время снижается вычислительная нагрузка на программу и потребляемая микроконтроллером мощность.

Дискретные (цифровые) данные передаются по каналу связи в виде последовательности символов, принадлежащих определенному канальному алфавиту. Каждый символ соответствует одному или нескольким битам передаваемой информации и при его передаче несущий акустический сигнал модулируется определенным образом. Приоритетная задача снижения мощности в режиме приема делает нецелесообразным применение современных и эффективных, но требующих объемных вычислений алгоритмов формирования и обнаружения канальных символов. Учитывая малый объем передаваемых данных, в аппаратуре "Шельф-2014" модуляции подвергается лишь один параметр несущего акустического сигнала – частота. Этим параметром легко управлять, он устойчив к вносимым трактами передачи и приема искажениям. Одновременно передается только один тон – в отличие, например, от такого широко распространенного способа частотной модуляции, как DTMF (*Dual-Tone Multi-Frequency)*. Это снижает скорость передачи информации, но упрощает алгоритмы формирования сигнала при передаче и анализа при приеме, минимизирует схемотехнику передающего тракта. В случае классической частотной манипуляции (ЧМ) каждый канальный символ (бод) представляет собой тональный импульс, длительностью равный времени передачи символа $T_{симв}$ и с частотой заполнения, однозначно поставленной в соответствие этому символу и принадлежащей определенному сигнальному набору частот. Набор содержит $N = 2^n$ частот, где $n$ – количество бит информации, закодированных в одном символе. Таким образом, номер частоты в наборе (начиная с 0 и заканчивая $N$-1) соответствует передаваемой данным символом комбинации информационных битов. В 2014 г. в бухте Витязь (Японское море) были проведены сравнительные испытания программ акустического модема и ТКУ с использованием 2-х и 4-частотных наборов. Испытания не показали практической разницы в надежности и помехоустойчивости этих процедур, не отличаются они и по требованиям к производительности процессора. При этом набор из 4-х сигнальных частот, принятый для дальнейшего использования, обеспечивает вдвое более высокую скорость передачи данных. Дальнейшее увеличение числа частот в наборе нецелесообразно, т. к. скорость передачи возрастает незначительно (например, использование 8-ми частот позволило бы увеличить скорость еще в 1.5 раза – до 3 бит в символе). Но при этом уже возникли бы трудности в размещении сигнальных частот в полосе пропускания передающих гидрофонов.

Рассмотрим работу встроенного акустического модема станции по рис. 1. Последовательность отсчетов сигнала с выхода АЦП поступает в микроконтроллер, где обрабатывается параллельно программами записи на карты памяти и программой приемника акустического модема. Для обнаружения сигнальных частот в принятом сигнале используется процедура быстрого преобразования Фурье (БПФ). Расчет производится на ряде из 1024 значений (33.9 мс) с периодом 50 мс. Пропуски между рядами данных БПФ несколько снижают скорость передачи запроса на станцию, однако позволяют существенно понизить рабочую частоту контроллера станции и таким образом увеличить время ее автономной работы. Выбор именно такой длины ряда обусловлен возможным допплеровским сдвигом частот в сигнале запроса, вызванным дрейфом судна, с которого производится опрос, относительно станции. Для частоты дискретизации 30.24 кГц, используемой в АЦП станции, разрешение по частоте $\Delta f$ равно 29.5 Гц, т.е. при смещении принятой частоты сигнала до 15 Гц в большую или меньшую стороны максимум энергии сигнала останется в том же ча-

стотном интервале БПФ. Допустимая скорость дрейфа судна относительно станции $V$ составляет

$$V = \pm C\frac{\Delta f}{2F} = \pm 1500\frac{30}{2\times 9000} = \pm 2.5 \text{ м/с};$$

где $C$ – скорость звука в воде и $F$ – максимальная частота информационного сигнала.

Это ограничение вполне допустимо практически. В то же время, при длине ряда 1024 отсчета в резонансной полосе частот передающего гидрофона размещаются более 30 частотных интервалов БПФ, что позволяет легко выделить сигнальные частоты на приеме. Примененный алгоритм расчета БПФ и обработки результатов преобразования имеет некоторые особенности. Обусловлены они тем, что все рабочие программы устройств комплекса "Шельф-2014" написаны на языке Си. Используется компилятор C32 разработки Microchip Technology Inc. и встроенная в него целочисленная процедура расчета БПФ, оптимизированная для 32-разрядных микроконтроллеров этой фирмы. Результатом этой процедуры являются два ряда целых 32-битных чисел, соответствующие реальной и мнимой части обрабатываемого сигнала. При оценке амплитуды тонального сигнала в рабочей программе используется не Евклидова метрика L2, в которой амплитуда рассчитывается по формуле

$$A_i = \sqrt{\mathrm{Re}_i^2 + \mathrm{Im}_i^2}, \quad (1)$$

а прямоугольная (манхеттенская) метрика L1, т.е.

$$A_i = |\mathrm{Re}_i| + |\mathrm{Im}_i|, \quad (2)$$

где $i$ – порядковый номер частотного интервала в выходном ряду данных процедуры БПФ; $\mathrm{Re}_i$ – значение реальной части $i$-го элемента в выходном ряду данных; $\mathrm{Im}_i$ – значение мнимой части $i$-го элемента; $A_i$ – оценка амплитуды $i$-той частотной составляющей входного сигнала.

Разность численных результатов, даваемых этими метриками, не превысит $\sqrt{2}$ раз, т.е. 3 дБ. С учетом того, что случайные колебания амплитуды сигнальных тонов вследствие интерференции достигают десятков дБ, разница в 3 дБ не имеет практического значения. В то же время, расчет оценки по этой метрике требует значительно меньше вычислительных ресурсов и позволяет использовать для дальнейших расчетов целочисленную 32-битную математику.

Результаты периодического расчета спектра входного сигнала подвергаются анализу (см. рис. 1), результатом которого является последовательность бит принятой информации. Существует множество возможных алгоритмов кодирования данных для последующей передачи и выделения переданной информации из результатов расчетов спектров сигнала. В основном именно этот программный блок отвечает за качественные параметры акустического канала связи, его устойчивость к шумам, помехам и замираниям сигнала, и поэтому ниже он будет рассмотрен отдельно. Следующий блок обработки сигнала – анализ битовых последовательностей. Здесь производится синхронизация принятых данных и их сравнение с эталоном, содержащим номер станции. При совпадении программа модема формирует слово состояния станции, содержащее информацию о количестве свободного места на картах памяти, напряжение батарей питания, усредненный по всем сигнальным частотам и по длине запроса уровень сигнала запроса, номер станции и 11-битную контрольную сумму. Сигнал ответа станции формируется из слова состояния встроенным в микроконтроллер аппаратным модулем ШИМ (широтно-импульсной модуляции) под управлением той же программы.

Еще одно важное алгоритмическое решение – отсутствие какого-либо порога соотношения мощностей сигнальных частот к шуму. Решение о приеме того или иного символа принимается на основании сравнения мощностей только сигнальных частот в принятом сигнале. Достоинствами такого решения являются упрощение алгоритма и устойчивость системы передачи данных к тональным помехам. Чтобы помешать приему данных, тональная помеха должна попасть точно на одну из сигнальных частот (точнее, в тот же частотный интервал БПФ). Однако и в этом случае воздействие помехи существенно ослабляется описанными ниже алгоритмами обработки сигнала. Отсутствие порога по уровню акустического сигнала означает, что приемник не имеет логического состояния "нет входного сигнала". Независимо от уровней сигнальных частот и окружающего шума, программный блок анализа спектра (рис. 1) каждые 100 мс (скорость передачи символов от ТКУ) принимает решение о приеме того или иного канального символа и на его выходе появляется очередная пара бит. Даже в отсутствие запросов приемник с определенной вероятностью $P_Л$ примет ложное решение о поступлении запроса, и модем сформирует и отправит ответ. Полагая появление символов канального алфавита равновероятным:

$$P_Л = (1/K)^N, \quad (3)$$

где $K$ – количество символов в алфавите (сигнальных тонов в наборе), для "Шельф-2014" принято 4; $N$ – длина эталона, с которым сравнивается последовательность принятых символов, принята 16 (количество символов в запросе ТКУ, включая номер опрашиваемой станции). Тогда средний период возникновения ложных запросов:

$$T_Л = \frac{T_{СИМВ}}{P_Л} = T_{СИМВ}K^N. \quad (4)$$

Таким образом, средний период ложных запросов для "Шельф-2014" равен приблизительно 14 лет. Учитывая, что никаких вредных послед-

ствий это событие не влечет, величина более чем достаточная.

ТКУ в части работы с акустическим сигналом подобно модему станции. Имеются различия в параметрах алгоритмов – контроллер ТКУ работает на более высокой частоте, расчеты БПФ производятся чаще, чем в станции. Это позволяет принимать символы меньшей длительности. Передача станцией коротких символов, перемежаемых паузами, снижает среднюю мощность передатчика станции. Достоверность данных проверяется контрольной суммой.

## ОСОБЕННОСТИ КАНАЛА СВЯЗИ И ИХ ОТРАЖЕНИЕ В АЛГОРИТМАХ

На начальном этапе проработки аппаратуры акустической связи "Шельф-2014" был проведен ряд экспериментов, позволивших уточнить характеристики и особенности канала связи, включая и каналообразующую аппаратуру. Например, были сделаны оценки сквозной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) трактов передачи данных. Поскольку приемные тракты станции и ТКУ различны, АЧХ измерялось в двух направлениях. В состав запроса от ТКУ были включены 6 тональных импульсов в конце сообщения, частоты заполнения которых не принадлежали сигнальному набору, а были распределены в полосе частот 8–11 кГц. Программа модема в донной станции измеряла интенсивность этих частот и результат в цифровой форме передавала обратно на ТКУ. Кроме того, ответ станции дополнялся таким же набором тональных импульсов. Принимая ответ, ТКУ также измеряло интенсивности этих частот. Проведенные эксперименты позволили выделить оптимальную для передачи данных полосу частот 8–9 кГц. В то же время следует отметить, что даже в этой полосе частот влияние АЧХ оказалось значительно слабее влияния интерференции и проявлялось только статистически, путем усреднения по многочисленным измерениям. Как известно, для гидроакустического канала связи характерным является многолучевое распространение сигналов из-за многократных переотражений от дна, поверхности и других препятствий. Можно выделить два основных последствия многолучевого распространения [9]:

1. Если задержка распространения всех лучей мала по сравнению с длительностью канального символа, то возникает только интерференция лучей, приводящая к замираниям – увеличению или уменьшению амплитуды сигнала (до полного исчезновения). Замирания воздействуют на передаваемое сообщение случайным образом, избирательно по частотам и времени воздействия;

2. Если задержка распространения всех лучей сравнима или превышает длительность канального символа, то кроме замираний возникает также наложение предыдущих канальных символов на последующие (межсимвольная интерференция).

На начальном этапе проработки алгоритмов передачи данных был проведен ряд экспериментов, позволивших оценить степень влияния этих факторов на передачу данных в разрабатываемой аппаратуре. Замирания амплитуды принятого сигнала (изменения амплитуды сигнала как между символами, так и в пределах одного символа) хорошо видны на рис. 2а. Очевидно, что для пораженных замираниями символов соотношение мощностей сигнала к шуму существенно ниже среднего за время сообщения, и без применения специальных алгоритмических мер надежность приема сообщения будет определяться именно вероятностью правильного приема этих символов, т.е. глубиной замираний. Межсимвольную интерференцию можно наблюдать на рис. 2б, где приведен фрагмент сонограммы спектра сигнала запроса, синхронный с записью рис. 2а. Межсимвольная интерференция видна в виде "шлейфов", тянущихся за сигналом. Например, во время приема символа № 3 (частота $f_{00}$, см. рис. 2б) "шлейф" от символа № 2 (на частоте $f_{01}$) превышает амплитуду полезного сигнала. Без применения описанных ниже алгоритмов разнесения сигнала это вызвало бы сбой приема сообщения. В символе № 15 передавалась комбинация бит 00. В течении последующих 8-ми символов эта комбинация бит не передавалась, однако на приеме сигнал на частоте $f_{00}$ виден более 600 мс после символа № 15 (обведено овальной линией на рис. 2б). Длительность "шлейфа" существенно превышает длительность символа (100 мс), т.е. выполняются условия:

$$L > T > \tau_k, \tag{5}$$

где $L$ – время многолучевости, $T$ – время передачи символа и $\tau_k$ – время корреляции коэффициентов передачи канала. Согласно классификации в работе [9], на рис. 2 представлены быстрые замирания в канале второго рода с длинной памятью. Такой канал имеет ряд важных для разрабатываемой аппаратуры отличий от простейшего гауссовского с аддитивным шумом. При любом соотношении мощностей сигнала к шуму пропускная способность такого канала связи принципиально ограничена его параметрами и не может быть увеличена более некоторого предела. Вероятность правильного приема сообщения также не может быть более некоторой конечной величины без применения специальных алгоритмов передачи и приема сигналов. Можно сделать вывод, что увеличение дальности связи должно достигаться в большей мере именно алгоритмическими мерами, а не увеличением мощности передатчика. Из-за неопределенности фаз прихода лучей для канала второго рода неэффективны алгоритмы синхронной обработки сигнала.

Известно несколько основных методов снижения негативного влияния замираний и межсим-

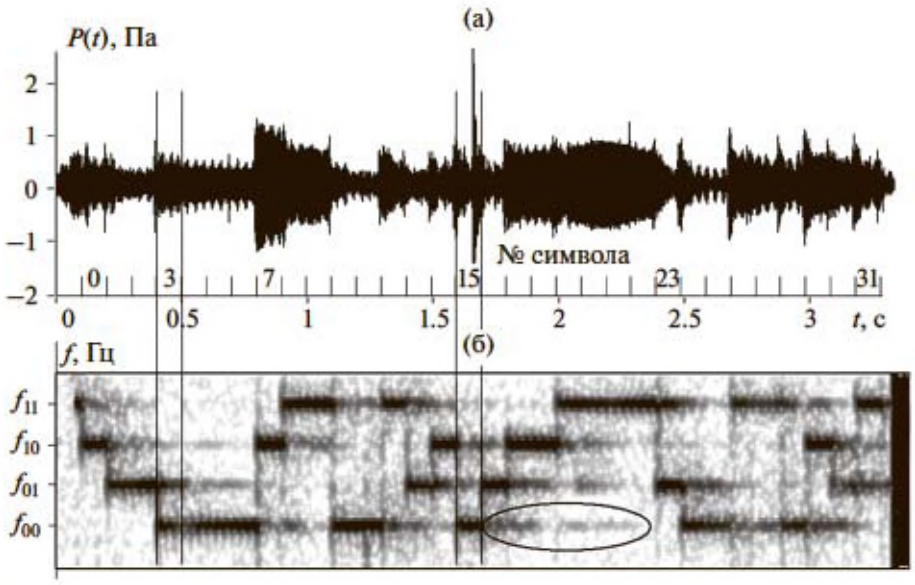


**Рис. 2.** (а) – Сигнал запроса от ТКУ, записанный донной станцией; (б) – синхронный этому сигналу фрагмент сонограммы спектра. Длительность символа 100 мс. Длительность ряда данных процедуры БПФ 33 мс (1024 отсчета). Овальной линией выделен пример межсимвольной интерференции, длительность выделенного интервала 700 мс.

вольной интерференции на вероятность верного приема дискретного сообщения [9]:

1. Пространственное выделение одного луча – при этом используются направленные антенны с автоматической подстройкой по направлению;

2. Методы на основе сигналов с широкой базой (широкополосных сигналов);

3. Различные методы разнесения сигналов.

Очевидно, что первая группа методов повлечет усложнение аппаратуры и рост ее энергопотребления, что не соответствует назначению описываемой аппаратуры и техническим требованиям к ней. Применение сигналов с широкой базой подразумевает значительные вычислительные мощности, что также не соответствует поставленным при разработке задачам. Эффективным методом является разнесенный прием. Задача разнесения – получить $M$ подканалов передачи, замирания в которых независимы друг от друга (не коррелированы). Тогда, если $P$ – вероятность того, что в некоторый момент времени в одном из подканалов отношение сигнал/шум меньше допустимого, то вероятность того, что это отношение меньше допустимого во всех подканалах, равна $P^M$, и можно обеспечить эту величину достаточно малой. Практическое применение в системах связи находят различные виды разнесения – пространственное, поляризационное, частотное, временное, а также их комбинации. В описываемой аппаратуре применено несколько совместно действующих алгоритмов, использующих расширение спектра сигнала [10], частотно-временное разнесение [11], чередование частотных наборов, описанное в [9], и паузы между символами передаваемого сообщения. Рассмотрим эти алгоритмы подробнее.

Как известно, эффективным методом борьбы с замираниями является расширение спектра сигнала таким образом, чтобы частотно-селективное замирание подавило не все спектральные компоненты сигнала, и на приеме переданные боды можно было бы восстановить по оставшимся компонентам. В приложении к ЧМ в качестве такого расширения спектра можно рассматривать, например, частотное разнесение. Передаваемый сигнал дублируется на нескольких несущих или поднесущих частотах, а на приеме сигналы каким-либо образом суммируются или комбинируются. Однако очевидно, что такое решение требует затрат оборудования, мощности и/или увеличения полосы частот, занимаемых системой передачи данных. В цифровых системах применяются также методы частотно-временного разнесения. В этом случае за время каждого символа передается не один тональный импульс, как в классической ЧМ, а их набор. На приеме сигналы всех сигнальных частот обрабатываются раздельно, как амплитудно-модулированные, а затем рассматриваются комбинации этих сигналов. Различные алгоритмы формирования сигналов, а затем обработки на приемной стороне канала позволяют восстановить переданную информацию, даже если некоторые сигнальные частоты в процессе передачи по каналу были поражены замираниями или помехами. Общие недостатки всех этих методов – снижение скорости передачи данных, т.к. на приеме вместо одного тонального импульса необходимо выделить несколько его отдельных фрагментов, и значительное усложнение

алгоритмов обработки. В "Шельф-2014" также используется расширение спектра сигнала [10] путем передачи за время одного символа нескольких тональных импульсов на разных несущих частотах, однако идея заключается в том, что частоты всех этих несущих укладываются в один частотный интервал быстрого преобразования Фурье (БПФ) приемника, а суммарное время их передачи равно времени набора ряда данных для процедуры БПФ приемника. Для приемника такой сигнал эквивалентен тональному и изменения алгоритма обработки сигнала по сравнению с классической ЧМ не требуется. Однако даже такого небольшого расширения спектра переданного сигнала достаточно, чтобы (начиная с дистанции нескольких сотен метров от передатчика) фазы прихода сигналов разных лучей в точку приема для разных несущих отличались случайным образом. Усреднение по времени передачи символа (которое происходит автоматически за счет длины ряда данных на входе процедуры БПФ) устраняет глубокие замирания отдельных поднесущих, которые и ограничивали дальность связи.

Еще одним эффективным способом снижения влияния замираний в канале связи с многолучевым распространением является временное разнесение сигнала [9, 12, 13]. Сигнал запоминается в передатчике и передается несколько раз через определенный интервал повторения $T_{\text{повт}}$, который выбирается достаточно большим, чтобы воздействие замираний на символы сообщения было слабо коррелированным. В цифровых системах обычно $T_{\text{повт}}$ кратен $T_{\text{симв}}$, т.е. $T_{\text{повт}} = KT_{\text{симв}}$, где $K$ – период повторов сообщения, выраженный в числе символов. В приемнике повторы сигнала накапливаются и синхронно складываются. При известных фазах прихода повторов сигнала возможно их когерентное сложение, в противном случае используется квазикогерентное. Для канала 2-го типа с быстрыми замираниями наиболее эффективным решением, согласно расчетам в работе [9], является именно квазикогерентный прием. При этом сдвоенная передача сообщения (пакета) по сравнению с одинарной обеспечивает выигрыш, эквивалентный 10 дБ мощности сигнала. В описываемой аппаратуре сообщение (запрос от ТКУ или ответ станции) передается два раза, причем перед повторной передачей сообщение побитно инвертируется [11]. В результате повтор сообщения передается последовательностью символов, отличной от последовательности символов при первичной передаче – хотя и принадлежащих тому же канальному алфавиту (с использованием того же набора несущих частот). На приеме, перед сложением текущих оценок уровней сигнальных частот с задержанными на $T_{\text{повт}}$, производится их соответствующая перестановка (рис. 3). При этом повтор сообщения является средством защиты от замираний с периодами менее $T_{\text{повт}}$, а инверсия уравнивает воздействие на символы канального алфавита длиннопериодных замираний и других медленно меняющихся и постоянных факторов (например, амплитудно-частотной характеристики тракта передачи-приема сообщений для конкретных экземпляров ТКУ и станции). Вышеописанные методы подавления замираний были применены в аппаратуре "Шельф-2014" при очередной модернизации программного обеспечения весной 2016 г. В результате дальность устойчивой связи в сходных условиях Сахалинского шельфа (волнение 3–4 балла, ветер до 10 м/с, течение до 1.5 м/с) повысилась с 350 м (в экспедиции 2015 г.) до 6–8 км в экспедициях 2016 г. Станции были установлены на глубинах от 8-ми до 20-ти метров, судно перемещалось мористее 20-метровой изобаты. Не зафиксировано зависимости дальности связи от угла между береговой чертой и линиями ТКУ-станция. По данным гидрологического зондирования отсутствовал выраженный профиль скорости звука. Таким образом, удалось получить дальность связи, более чем достаточную для решения поставленных при разработке задач. Этот результат достигнут без увеличения мощности передатчиков. Работа акустического модема не потребовала даже увеличения тактовой частоты контроллера станции, т.е. в режиме приема акустический модем не увеличивает энергопотребления станции и не влияет на время ее автономной работы.

Еще одним фактором, ограничивающим дальность акустической связи, является межсимвольная интерференция (см. рис. 2б). Методы борьбы с этой проблемой известны – это увеличение длительности передачи символа или пассивные паузы между символами. Однако их применение приводит к такому снижению скорости передачи данных, что время опроса станции нежелательно возрастает. В монографии [9] приведено краткое описание аппаратуры AME (anty multipass equipment, разработка 1959 г.), в которой для повышения скорости передачи данных по радиоканалу с многолучевым распространением используется несколько наборов сигнальных частот, применяемые поочередно. Таким образом, предыдущий символ не оказывает влияния на прием последующего, поскольку его сигнальные частоты не являются сигнальными для последующего. При этом должен быть обеспечен разнос по частоте между наборами, чтобы в приемнике выделенные сигнальные частоты не перекрывались даже с учетом расширения их спектра из-за модуляции сигнала замираниями. Применение этой идеи в модернизациях программного обеспечения станции и ТКУ, сделанных в 2017 г., также не потребовало повышения вычислительной мощности контроллера станции. В этом алгоритме были также применены и пассивные паузы между символами. Для проверки эффективности нового алгоритма в различных условиях был проведен ряд

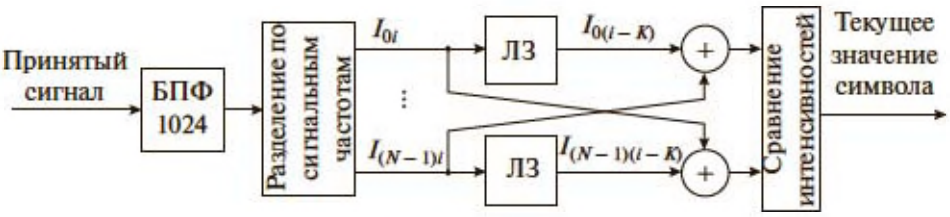


**Рис. 3.** Алгоритм обработки принятого ЧМ сигнала с временным разнесением, с инверсией повтора на передаче и перестановкой оценок сигнала на приеме для случая двукратной передачи и некогерентного приема: $I_{ji}$ – измеренная на приеме интенсивность частоты № $j$ сигнального набора частот для текущего ($i$-го) символа сообщения; $N$ – число сигнальных частот в наборе; $K$ – период повторов сообщения, выраженный в числе символов; ЛЗ – линия задержки на период повтора сообщения, реализованная как сдвиговый регистр на $K$ ячеек.

натурных экспериментов. Летом 2018 г. в бухте Витязь Японского моря было проведено сравнение дальности действия акустической связи для аппаратуры "Шельф-2014" модификаций 2016 и 2017 гг., а также акустического модема 875TD и устройства UDB-9400T производства Teledyne Marine. Станция "Шельф-2014" и модем 875TD были установлены у пирса, на глубине 3 м, в 1 м от дна. Запросы производились с борта моторной лодки при помощи ТКУ и UDB-9400T. Были сделаны проходы по двум трассам. Первая проходила от пирса через глубоководный участок бухты (до 30 м) к противоположному берегу до глубины места 3 м. На этом участке все 3 канала связи показали одинаковый результат – 2000 м, обусловленный, по видимому, именно глубиной в точке запроса. Вторая трасса была проложена над каменистым плато с глубинами 4–6 м вдоль берега бухты. Здесь дальность связи для аппаратуры Teledyne Benthos упала до 160 м и "Шельф-2014" модификации 2016 г. – 180 м. На этой трассе проявились преимущества нового алгоритма – связь уверенно работала до 1800 м.

Еще один эксперимент был проведен в Амурском заливе зимой 2019 г. Проверялась дальность связи последней версии "Шельф-2014" в условиях акватории, покрытой льдом. Станция была установлена на глубине 10 м, в 0.5 м от дна. Гидрофон ТКУ также вывешивался в 0.5 м от дна. Сначала были произведены запросы из точек, удаленных на 1 км (глубина места 13 м), 2 км (глубина 16 м) перпендикулярно к берегу и на 1.3 км под углом к береговой черте, вдоль изобаты 10 м. Связь работала безотказно. Анализ записанных станцией сигналов показал очень низкий, нетипичный для открытой воды уровень акустических шумов и искажений сигнала, вызванных интерференцией. Было решено продолжить эксперимент в более тяжелых условиях. Станция была установлена в той же точке. Новая трасса проходила вдоль берега Амурского залива. Вблизи береговой черты расположены промышленные предприятия, проходит оживленная автострада и железнодорожные пути. Во время эксперимента имелся и другой мощный источник шума – буксир ломал лед в заливе, расчищая танкерам подход к нефтебазе. Тем не менее, на дистанции 9.5 км связь работала безотказно. Следующая точка находилась в конце мыса Эгершельд и была удалена от станции на 15 км, при глубине 29 м. При подвесе гидрофонов станции и ТКУ вблизи дна установить двустороннюю связь не удалось, но имел место случай ответа станции, который не был принят ТКУ – иначе говоря, вероятность правильной передачи данных была весьма низкой. Однако, когда гидрофоны на обоих концах линии были вывешены на 1.5 м под лед, связь снова стала надежной (все проведенные сеансы связи были успешными). Анализ записей позволил выявить некоторые особенности подледного звукового канала в используемом диапазоне частот (8–9 кГц). На временных интервалах, сравнимых с длительностями символов передаваемых сообщений и самих сообщений, интерференция многократно слабее той, что характерна для открытой воды. Сообщения принимались без сбоев даже не используя усреднение по повторам сообщений, заложенные в алгоритме начиная с 2016 г. (эта информация содержится в данных ТКУ). Однако имеются существенные колебания уровня принятого сигнала на более низких частотах – с периодами более минуты. Природа этих изменений и их количественная оценка требует отдельного рассмотрения.

## СИНХРОНИЗАЦИЯ

Все рассмотренные выше алгоритмы обработки несущего информацию сигнала работоспособны при обязательном условии верной синхронизации приемника по принятому сигналу. В современных системах связи с пакетной передачей данных типичным решением является посылка перед данными специальной синхронизирующей последовательности, длительность которой мала по сравнению с информационной частью пакета. Однако в описываемой системе, из-за малой длины пакета (сообщения) такое решение было бы неэффективным с энергетической точки зрения и

увеличивало бы время опроса станции. Поэтому синхронизация производится непосредственно по информационным символам сообщения. Реализовано это следующим образом – ряды входных данных для процедуры БПФ набираются с таким периодом, что:

1. На длительности канального символа $t_{симв}$ укладывается два ряда входных данных для процедуры БПФ. В зависимости от $t_{симв}$ эти ряды данных могут частично перекрываться или наоборот, между ними может быть пауза. В "Шельф-2014" контроллер ТКУ обрабатывает ряды данных с перекрытием, что увеличивает скорость передачи данных от станции и сокращает расход энергии станцией. Модем станции, напротив, делает паузы между рядами данных, что позволяет сгладить пиковую вычислительную нагрузку на контроллер станции, понизить его частоту и снизить потребляемую мощность в режиме приема;

2. Период передачи символов $T_{симв}$ в целое число раз превышает период расчета БПФ.

При выполнении этих условий всегда существует последовательность расчетов БПФ, в которой период между расчетами равен $T_{симв}$ (т.е. каждому принятому символу соответствует один расчет БПФ этой последовательности) и для которой все отсчеты входного сигнала в каждом ряду входных данных принадлежат одному символу. Проиллюстрируем сказанное для случая, когда излученный ТКУ сигнал принимается модемом станции. $T_{симв}$ равно удвоенному периоду расчета БПФ, символы передаются без пауз, т.е. $t_{симв} = T_{симв}$. На рис. 4 отрезками внизу рисунка показаны интервалы времени набора рядов данных для процедуры БПФ. Видно, что в данные "черной" последовательности попадает смесь канальных символов "А" и "В" (последовательность рассинхронизирована с входным сигналом), а последовательность "серых" расчетов оказалась синхронизирована с последовательностью принимаемых символов и соотношение сигнал/помеха в ней максимально. На выходе блока анализа спектра (см. рис. 1) комбинации информационных битов, соответствующие принятым символам, появляются с частотой, вдвое превышающей частоту приема символов. Эти комбинации, как и канальные символы, из которых они получены, принадлежат поочередно "серой" (синхронизированной с входным сигналом) последовательности и "черной" (рассинхронизированной). Разделение последовательностей производится в блоке анализа битовых последовательностей. Во время приема неизвестно, какая из последовательностей синхронизирована верно, поэтому далее обработка обоих последовательностей производится независимо и идентично. После каждого расчета БПФ последовательности поочередно дополняются результатом анализа спектра (парой бит) и производится их сравнение с эталоном, содержащим номер станции. При совпадении (в любой из двух битовых последовательностей) произойдет синхронизация – т.е. приемник будет знать расположение всех принятых битов информации относительно эталона и сможет их интерпретировать как команды, параметры и т.д. В последнем варианте приемных алгоритмов "Шельф-2014", использующих чередование частотных наборов, аналогичным образом обрабатываются четыре последовательности.

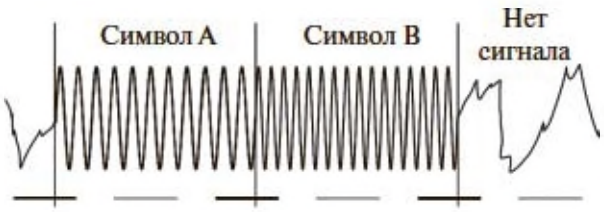


**Рис. 4.** Синхронизация расчетов БПФ по принимаемому сигналу.

## КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ

На рис. 5а показан передающий гидрофон акустического модема, установленный на крышке корпуса станции. Электронный модуль донной станции со снятой крышкой показан на рис. 5б. На рис. 6а показан рабочий экземпляр ТКУ, изготовленный в 2017 г. В отличие от предшествующего экспериментального образца, его корпус не имеет органов управления и отображения – эти функции перенесены на внешний компьютер или смартфон. Взаимодействие с ними производится по беспроводной связи Wi-Fi. Такое решение имеет множество достоинств: ТКУ стало компактнее; его корпус, находящийся на палубе, герметичен и не подвержен коррозии; опрос станций ведется из удобного места, например, с мостика судна – и полученная информация быстрее может быть использована для управления судном. ТКУ имеет собственный встроенный GPS/ГЛОНАСС приемник, что позволяет синхронно с посылкой запроса и приемом ответа станции фиксировать координаты запросчика в автоматически заполняемом журнале (лог-файле). На экране внешнего устройства отображаются время запроса, RMC сентенции GPS приемника (содержащие в себе время, дату и координаты), расстояние до станции, напряжение на батареях ее питания, наличие свободного места для записи данных, время начала записи текущего файла с данными, усредненный уровень сигнала запроса (используется для проверки исправности измерительного гидрофона станции перед постановкой в море). Автоматически ведется журнал (лог) всех действий по опросу станций. В настоящее время на устройствах отображения-записи используются свободно распространяемые терминальные программы – Hercules для устройств на платформе ОС Windows, YY TCP Client для Ан-

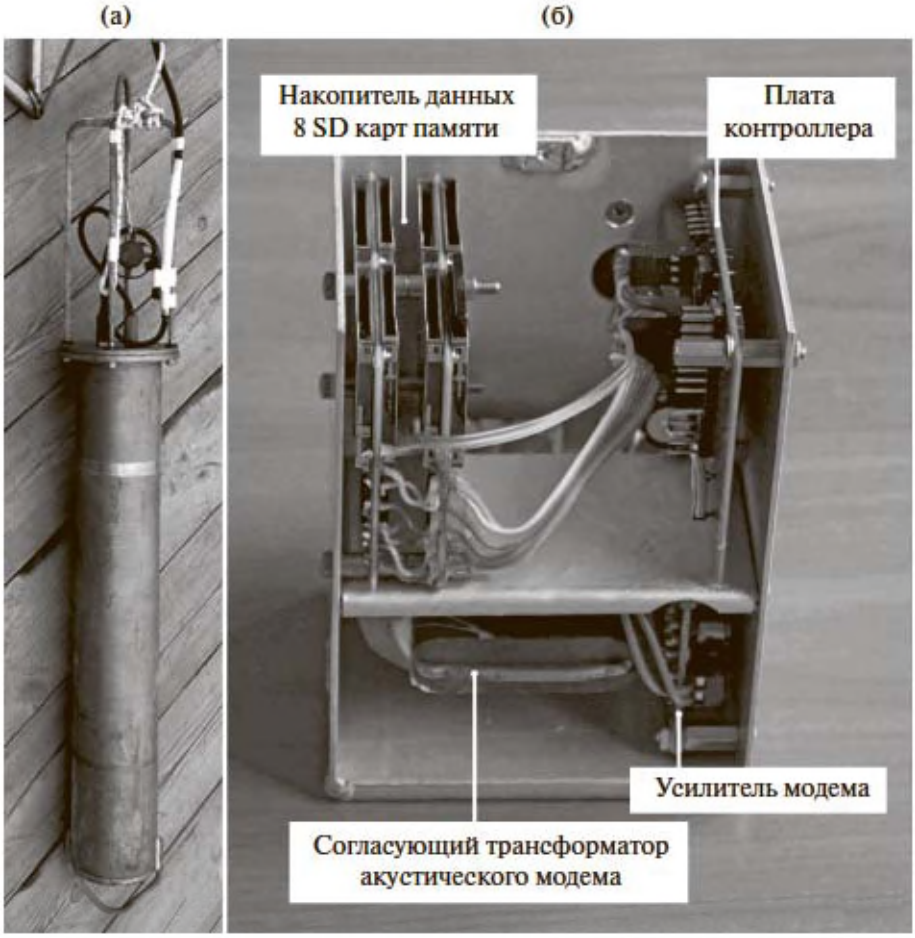


**Рис. 5.** (а) – Передающий гидрофон акустического модема, установленный на корпусе станции "Шельф 2014"; (б) – электронный модуль станции с аппаратными частями модема.

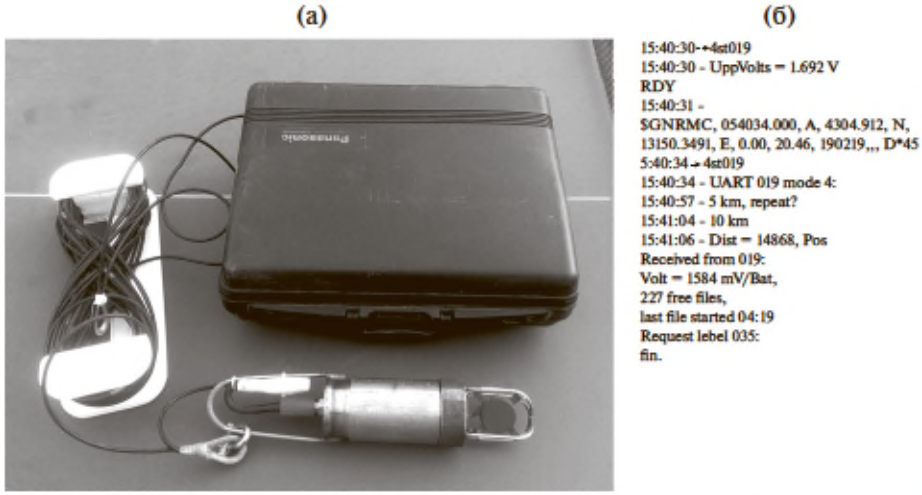


**Рис. 6.** (а) – Телекомандное устройство, вариант 2017г.; (б) – фрагмент журнала (лог-файла), автоматически формируемого ТКУ.

дроид. Результат опроса станции при помощи таких программ показан на рис. 6б. Однако в стадии разработки находится специальное мультиплатформенное приложение, которое сделает процедуры опроса станций удобнее, обеспечит автоматическую трилатерацию станций и отображение

их положения на электронной карте местности. При разработке этого приложения заранее закладываются средства объединения на единой карте разнообразных данных – например, текущего положения судов в районе мониторинга по данным автоматических постов АИС (Автоматической Идентификационной Системы) с передачей данных по сетям Интернет и Иридиум, данных о расположении объектов мониторинга, донных станций и буев, а в перспективе – и данных о китах, обнаруженных наблюдателями-биологами, в режиме реального времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описываемая аппаратура гидроакустической связи успешно решает поставленные при ее разработке задачи. С начала разработки в 2014 г. существенно улучшены ее эксплуатационные и качественные характеристики. Существуют широкие возможности его дальнейшего развития, прежде всего в плане программного обеспечения. Наличие встроенного акустического модема, не влияющего на энергопотребление донной станции и обеспечивающего связь на дистанциях в несколько километров, позволяет рассмотреть возможность организации сети передачи данных по гидроакустическому каналу связи, подобно тому, как это сделано в современных системах USBL (ultra-short baseline, системы позиционирования на ультракороткой базе) на базе акустических модемов [14–17]. Акустические станции (а возможно, и другое оборудование), образующие эту сеть, могут иметь общий выход в глобальные сети через спутниковый канал связи. Такая сеть позволит, например, перед проведением важных производственных операций произвести проверку состояния не только донных станций, снабженных телеметрическими буями со спутниковым каналом связи, но и расположенных поблизости автономных станций.

Интересно заметить, что интенсивное развитие алгоритмов, подобных примененным в описываемой аппаратуре, происходило еще в 50–70 гг. прошлого века. Это объясняется изложенными в начале статьи техническими требованиями, в частности приоритетом малого энергопотребления модема в режиме приема. Алгоритмы обработки сигнала, которые в прошлом веке могли считаться сложными и совершенными, сейчас реализуются на контроллере общего назначения в фоновом режиме, не мешая работе основной рабочей программы контроллера донной станции.

Автор выражает благодарность докторам А.Н. Рутенко (ТОИ ДВО РАН) и М. Дженкерсону (Exxon Neftegas Ltd.) за инициацию и всемерную поддержку этой разработки, а также сотрудникам ТОИ В.Г. Ущиповскому, С.В. Борисову, В.А. Гриценко, Д.С. Манульчеву, И.В Медведеву за активное участие в полевых испытаниях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рутенко А.Н., Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Гриценко В.А.* Радиогидроакустическая станция для мониторинга параметров антропогенных импульсных и шумовых сигналов на шельфе // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 4. С. 605–613.
2. *Ковзель Д.Г., Гриценко В.А., Медведев И.В.* Развитие аппаратных и программных средств телеметрического комплекса на базе измерительной гидроакустической станции "Шельф-2014" // Труды XIV Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики": СПб: ЛЕМА, 2018. С. 561–564
3. *Ковзель Д.Г.* Технические средства гидроакустического мониторинга сейсморазведочных работ на шельфе // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 5. С. 605–617.
4. *Фершалов М.Ю., Гриценко В.А.* Программно-аппаратный комплекс для мониторинга в реальном времени параметров акустических сигналов, измеренных во время сейсморазведки на шельфе // Докл. XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана": М. ГЕОС. 2018. С. 365–368.
5. Гидроакустическая станция, совмещенная с акустическим модемом. Пат. RU 161978 U1 Российская федерация / Ковзель Д.Г. – 2015153340/28; заявлено 11.12.2015; опубликовано 20.05.2016, Бюл. № 14.
6. *Ковзель Д.Г.* Развитие аппаратных средств и алгоритмов аппаратуры акустической связи донной станции "Шельф-2014" // Докл. XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских "Акустика океана": М. ГЕОС. 2018. С. 313–316.
7. www.evologics.de
8. www.benthos.com
9. *Финк Л.М.* Теория передачи дискретных сообщений. М.: Советское радио, 1970. 728 с.
10. Способ передачи дискретной информации по каналу связи с многолучевым распространением. Пат. RU 2647656 C1. Российская федерация / Ковзель Д.Г. – 2017104787; заявлено 14.02.2017; опубликовано 16.03.2018, Бюл. № 8.
11. Способ передачи дискретной информации по каналу связи с многолучевым распространением. Пат. RU 2638760 C1. Российская федерация / Ковзель Д.Г. – 2017106552; заявлено 27.02.2017; опубликовано 15.12.2017, Бюл. № 35.
12. *Васильев К.К., Глушков В.А., Дормидонтов А.В., Нестеренко А.Г.* Под общ. ред. Васильева К.К. Теория электрической связи: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 452 с.
13. *Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В.* Под ред. Кловского Д.Д. Теория электрической связи: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1998. 432 с.
14. https://www.evologics.de/en/products/USBL/index.html
15. http://www.link-quest.com/html/intro2.htm
16. https://www.sonardyne.com/product-category/type/system/
17. http://www.teledynemarine.com/trackit/?BrandID=2