
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

УДК 534.6.08, 534.143, 534.4, 534.87

© Д. А. Костеев, А. К. Бритенков, Н. Е. Земнюков, А. В. Львов, М. Б. Салин, 2024

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ РЕТРАНСЛЯЦИИ СИГНАЛОВ
ПРИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ**

Использование ретрансляторов при проведении гидроакустических экспериментов позволяет повысить точность измерения таких параметров, как скорость движения объекта, его сила рассеяния, потери на распространение. В работе рассмотрено применение ретранслятора со смещением частоты при излучении гидроакустических сигналов в непрерывном режиме. Опробована методика определения скорости движущегося объекта при помощи ретранслятора на основе компактного низкочастотного гидроакустического преобразователя продольно-изгибного типа со сложной формой излучающей оболочки. Показано, что предложенная методика обеспечивает модуляцию сигнала подсветки в реальном времени, а также имитацию сигналов, отражаемых крупными движущимися объектами. Результаты проведенного эксперимента соответствуют предварительным расчетам и подтверждают в рамках предложенной методики возможность использования сигналов большой длительности (в том числе и непрерывных) для акустической диагностики аномалий в морской среде.

Кл. сл.: гидроакустика, ретрансляция сигнала, сила рассеяния, эффект Доплера, перенос спектра, пьезоэлектрический преобразователь, акустическая мощность

ВВЕДЕНИЕ

Освоение Мирового океана является одним из важнейших направлений развития человечества. Для Российской Федерации освоение морей и океанов связано главным образом с расширением направлений использования северных регионов, включая акваторию Северного Ледовитого океана [1]. С учетом сложной ледовой обстановки, увеличения перевозок по Северному морскому пути, интенсификации добычи полезных ископаемых и освоения других богатств Арктического шельфа [2] перспективным способом выполнения многих операций в этом регионе является применение необитаемых подводных аппаратов.

Гидроакустические средства являются практически единственным надежным способом для навигации под водой и дистанционного обследования морского дна. В связи с этим гидроакустические станции того или иного назначения присутствуют в составе оборудования как необитаемых, так и обитаемых подводных аппаратов, а также научно-исследовательских судов. Проведение исследований по распространению и рассеянию звука в морской среде играет важную роль в мировой науке [3, 4].

При проведении морских гидроакустических исследований наиболее часто требуются измерения следующих величин:

– ослабления сигнала при прохождении от точки А до точки Б;

– поперечного сечения рассеяния уединенного объекта;

– удельной величины поперечного сечения для скопления рассеивателей.

Повышение точности таких измерений в значительной степени влияет на итоговый результат. При проведении натуральных гидроакустических исследований, в отличие от лабораторных экспериментов, оценка погрешности является отдельной задачей. Например, из-за слабых нестационарных неоднородностей среды при распространении звука на большие дистанции возможна существенная поправка измеряемого уровня рассеяния. Как правило, любая природная акватория содержит значительные аномалии, стратификацию по глубине и разномасштабные неоднородности. Это означает, что для контроля условий эксперимента в исследуемой области (например, в районе облака пузырьков) необходимо иметь объект с заведомо известными и довольно высокими отражательными свойствами. В случае движения исследуемого объекта, например, под влиянием ветра или течения желательнее, чтобы эталонный объект двигался вместе с ним. Синхронное движение эталонного объекта вместе с исследуемым позволяет более точно ориентировать приемную систему по углу и, возможно, задержке, а также провести калибровку уровня эхосигнала.

В качестве эталонного объекта возможно применение ретранслятора или маяка-ответчика. Специфические условия экспериментов, в которых

исследуется рассеяние непрерывных и квазинепрерывных сигналов, не позволяют эффективно использовать стандартные типы ответчиков, и поэтому был разработан новый тип ретранслятора, выполняющий частотное смещение сигнала. В настоящей статье описан лабораторный эксперимент, проведенный с ретранслятором, работающим с частотным сдвигом, также рассмотрена методика оценки погрешности параметров движущейся цели с применением такого ответчика.

ПРИМЕНЕНИЕ МАЯКОВ-ОТВЕТЧИКОВ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Механические решения, аналогичные применяемым в радиолокации угловым отражателям, нерационально (а иногда и невозможно) использовать в низкочастотной гидроакустике. Габариты эффективно отражающего акустического аналога углового отражателя для диапазона частот 1–2 кГц в силу требуемого волнового размера создают значительные сложности в конструктивном исполнении и, что более важно, обладают небольшим радиусом действия. В целях компактного исполнения наиболее целесообразным является использование электронных устройств, содержащих приемный и передающий акустические тракты.

Одним из способов, позволяющих повысить точность проводимых измерений, а также оценить погрешности, является применение ретрансляторов. Гидроакустический ретранслятор — прибор, который после регистрации акустического сигнала либо повторяет его без изменения основных характеристик, либо излучает с некоторой заранее заданной корректировкой. В простейшем случае прибор передает звуковой сигнал установленного типа в ответ на пришедший импульс другого установленного типа и называется маяком-ответчиком. Маяки-ответчики используются для навигации подводных аппаратов [5] или для маркировки подводного оборудования для облегчения поисковых работ в случае потери или аварии [6]. Более сложные системы активно применяются при создании линий связи и управления [7, 8], а также в качестве имитаторов цели при исследовании эффективности гидролокаторов [9, 10]. Современные ретрансляторы, оснащенные цифровыми сигнальными процессорами, способны не только переизлучать принятый сигнал, но и анализировать его параметры, проводить регистрацию данных, передавать сигнал с выбранной задержкой по времени и с заданным смещением по частоте.

К приборам такого типа традиционно предъявляются взаимопротиворечащие требования о повышении длительности автономной работы и увеличении акустической мощности излучаемых сигналов. Для удовлетворения таких требований

в состав прибора должен входить излучатель с высокой чувствительностью и КПД [11, 12] вместе с энергоэффективным трактом его возбуждения. Как правило, основной проблемой при разработке такого маяка-ответчика является создание компактных низкочастотных гидроакустических излучателей (НЧИ) высокой удельной мощности [13].

При проведении научных исследований к ответчику предъявляются несколько иные требования, поскольку основная задача прибора — точное воспроизведение формы пришедшего сигнала и обеспечение заданного коэффициента усиления по амплитуде. Размещение такой системы вблизи объекта исследования (или непосредственно на нем) позволяет измерять потери на распространение с заданной точностью, в том числе с учетом эффекта многолучевости и мультипликативных (реверберационных) помех. На основе анализа принятого ретранслятором прямого сигнала, считая сигнал ретранслятора эталонным, возможно проводить оценку изменчивости среды и точности измерения уровней рассеяния, например, поверхностной реверберации [14].

Очевидно, что в устройстве, выполняющем одновременно передачу и прием сигналов, необходимо исключить самовозбуждение. Для обеспечения устойчивого режима классический ретранслятор повторяет пришедший сигнал с небольшой задержкой, при этом определяя по заранее установленному порогу момент времени, начиная с которого начинается запись поступающего сигнала в буфер и запускается отсчет на излучение. Во время работы такого ретранслятора в режиме излучения прием сигналов приостанавливается.

Следует отметить, что для импульсов большой длительности или непрерывных сигналов их передача ретранслятором на частоте принятого сигнала с задержкой практически исключена, т.к. прибор не сможет начать излучение до окончания исходной посылки. Тем не менее использование таких сигналов не является экзотикой. Так, в работе [15] предложена методика измерения сечения рассеяния сложных тел под водой в режиме непрерывного излучения. В работах [16, 17] для диагностики поверхностного волнения и подводных течений применяются низкочастотные тональные импульсы длительностью от 2 до 8 с.

Решением, которое позволяет применять ретрансляторы в сценариях, связанных с квазинепрерывным излучением, является переизлучение сигнала со сдвигом частоты. В таком случае одновременно с приемом осуществляется излучение в соседнем частотном диапазоне относительно полосы принимаемого сигнала, что позволяет обеспечить непрерывный режим работы. Частотные полосы приема и передачи должны быть

разнесены, чтобы излучающий тракт не влиял на приемный, но при этом находился достаточно близко, чтобы физические процессы распространения звука в этих диапазонах можно было считать идентичными.

РЕТРАНСЛЯТОР С ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКОЙ

Классические ретрансляторы, использующие временную задержку, хорошо работают при зондировании короткими импульсами. Ретранслятор с временной задержкой предназначен для ретрансляции сигналов, приходящих от внешних систем. На рис. 1, а, представлена осциллограмма гидроакустического сигнала, регистрируемого приемным элементом такого ретранслятора, включающая пакет из трех импульсов длительностью по 3 мс с периодом 600 мс и трех переизлученных импульсов с задержкой 250 мс для каждого, а на рис. 1, б, — сонограмма принимаемого и ретранслируемого импульсов.

Используемый в экспериментах прибор имеет несколько режимов работы: маяк, маяк-ответчик, ретранслятор с временной задержкой. Частота дискретизации входного АЦП ретранслятора составляет 24414 Гц. Управление осуществляется с ноутбука по LAN-кабелю с использованием протокола Ethernet через внешнее установленное

программное обеспечение. Формирование и обработка гидроакустических сигналов выполняются во внутреннем аппаратном блоке ретранслятора, а обработка данных, формирование сигналов и функции управления производятся при помощи модуля NUCLEO-H743ZI.

РЕТРАНСЛЯТОР С ЧАСТОТНЫМ СМЕЩЕНИЕМ

Для проведения описанных во введении экспериментов с непрерывными сигналами на базе сигнального процессора ADAU1701 разработан ретранслятор с частотной перестройкой. Структурная схема алгоритма, реализованного в сигнальном процессоре, представлена на рис. 2.

Принимаемый гидрофоном сигнал после гетеродинирования и прохождения полосового фильтра в полосе $f_0 \pm \Delta f$ поступает на блок быстрого преобразования Фурье (БПФ), после чего его спектр сдвигается на величину Df и с заданным коэффициентом k преобразования единиц АЦП в единицы ЦАП передается на излучающий тракт. Такой ретранслятор был настроен на работу в двух частотных диапазонах: 1800 и 2000 ± 25 Гц для принимаемого и 1600 и 2200 ± 25 Гц для излучаемого сигналов соответственно. Прибор работает в непрерывном режиме, т.е. переизлучает сигнал любой амплитуды в выбранном диапазоне с пропорциональным усилением (ослаблением) по мощности.

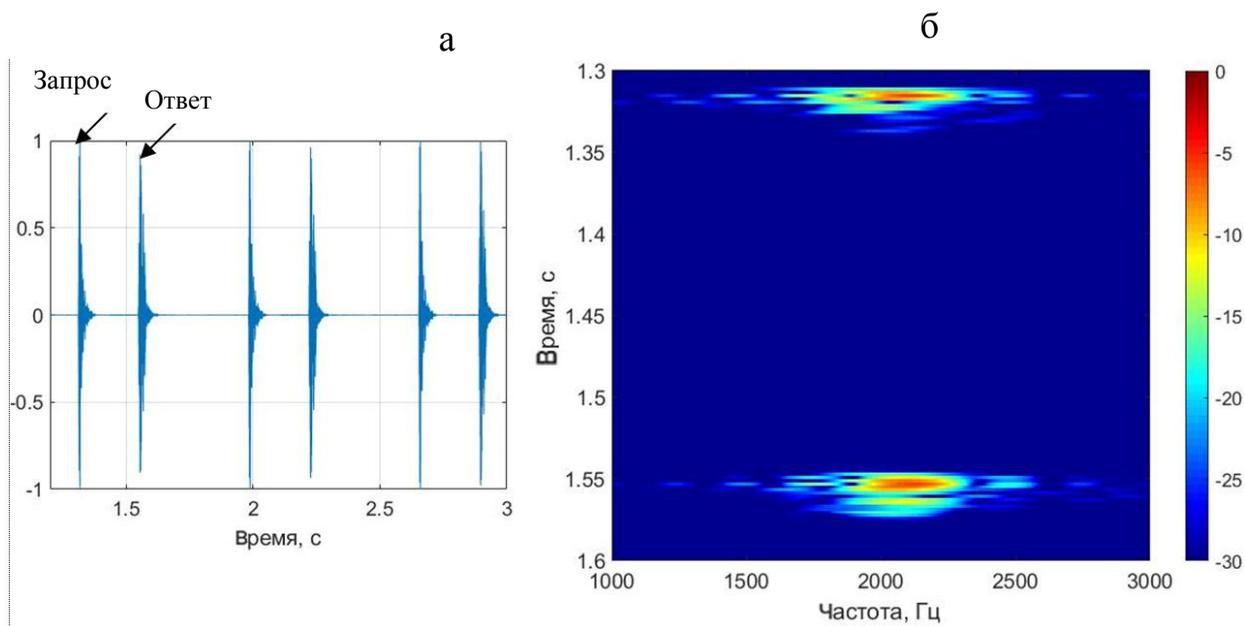


Рис. 1. Осциллограмма сигналов, регистрируемых приемным элементом ретранслятора, (а) и сонограмма принимаемого и ретранслируемого импульсов (б)

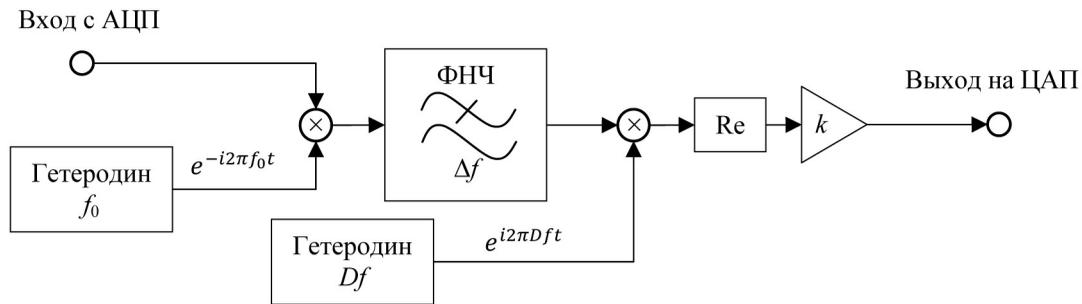


Рис. 2. Структурная схема алгоритма работы ретранслятора

К недостаткам такого устройства можно отнести клиппирование при поступлении с гидрофона сигнала с амплитудой, превышающей максимально допустимый входной уровень АЦП.

Схема эксперимента разработана с учетом возможности применения ретранслятора такого типа на движущихся объектах и размеров акустического бассейна $3 \times 4 \times 3$ м с заглушенными стенками (рис. 3).

На удалении от стенки бассейна и глубине 1 м размещалась приемо-передающая система П (Приложение, рис. П, а), на противоположной стенке у поверхности воды — цифровой контрольный гидрофон Г (рис. 3). Ретранслятор Р (Приложение, рис. П, б) устанавливался на нижней оконечности штанги с шарнирно закрепленным верхним кон-

цом. Ретранслятор, как маятник, перемещался по дуге окружности с радиусом 3 м, находясь в стартовом положении рядом с гидрофоном Г (Приложение, рис. П, в).

Во время проведения эксперимента приемо-передающая система излучала непрерывный тональный сигнал на частоте 2.0 кГц, принимаемый ретранслятором с переизлучением его на частоте 2.2 кГц. При помощи цифрового гидрофона сигнал фиксировался регистратором приемо-передающей системы. Аналогичная процедура проводилась для сигнала на частоте 1.8 кГц с переизлучением на частоте 1.6 кГц. В качестве излучателя ретранслятора использовался компактный низкочастотный гидроакустический излучатель продольно-изгибного типа со сложной формой излучающей оболочки 3D НЧИ [18], закрепленный в эластичном подвесе на полипропиленовой ферме. Частота основного резонанса такого 3D НЧИ составляет примерно 1.7 кГц при относительной ширине рабочей полосы частот 15%.

Осциллограммы сигналов, принятых в точке Г контрольным гидрофоном, для обеих частот представлены на рис. 4, а, и 4, в, а спектры этих сигналов, нормированные по уровню возбуждающего сигнала, — на рис. 4, б, и 4, г.

В частотном диапазоне 1.6 кГц ретранслятор принимал сигналы на частоте 1.8 кГц с переносом спектра вниз и переизлучением на частоте 1.6 кГц, а в диапазоне 2.2 кГц принятые сигналы на частоте 2.0 кГц переносились по спектру вверх и переизлучение осуществлялось на частоте 2.2 кГц. Сонограммы принятых сигналов со смещением частоты ($f \pm Df$, где Df составляла 0.2 кГц) в точках Г и П приведены на рис. 5.

Черным пунктиром на графиках показана частота с учетом доплеровского смещения, определенная по максимуму полученной спектральной плотности мощности, белой линией — частотное смещение в предположении прямолинейного движения. Горизонтальные линии на рис. 5, б, и 5, г,

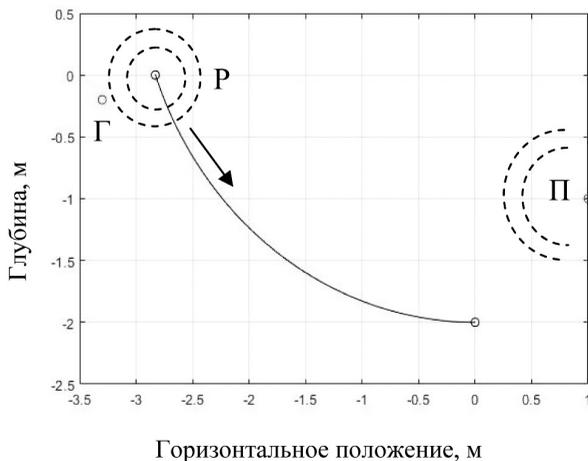


Рис. 3. Вид сбоку схемы расположения ретранслятора и контрольной аппаратуры в гидроакустическом бассейне.

Р — погружной модуль ретранслятора; Г — контрольный гидрофон; П — контрольная приемо-передающая система: излучатель, гидрофон, коммутатор и аппаратный блок

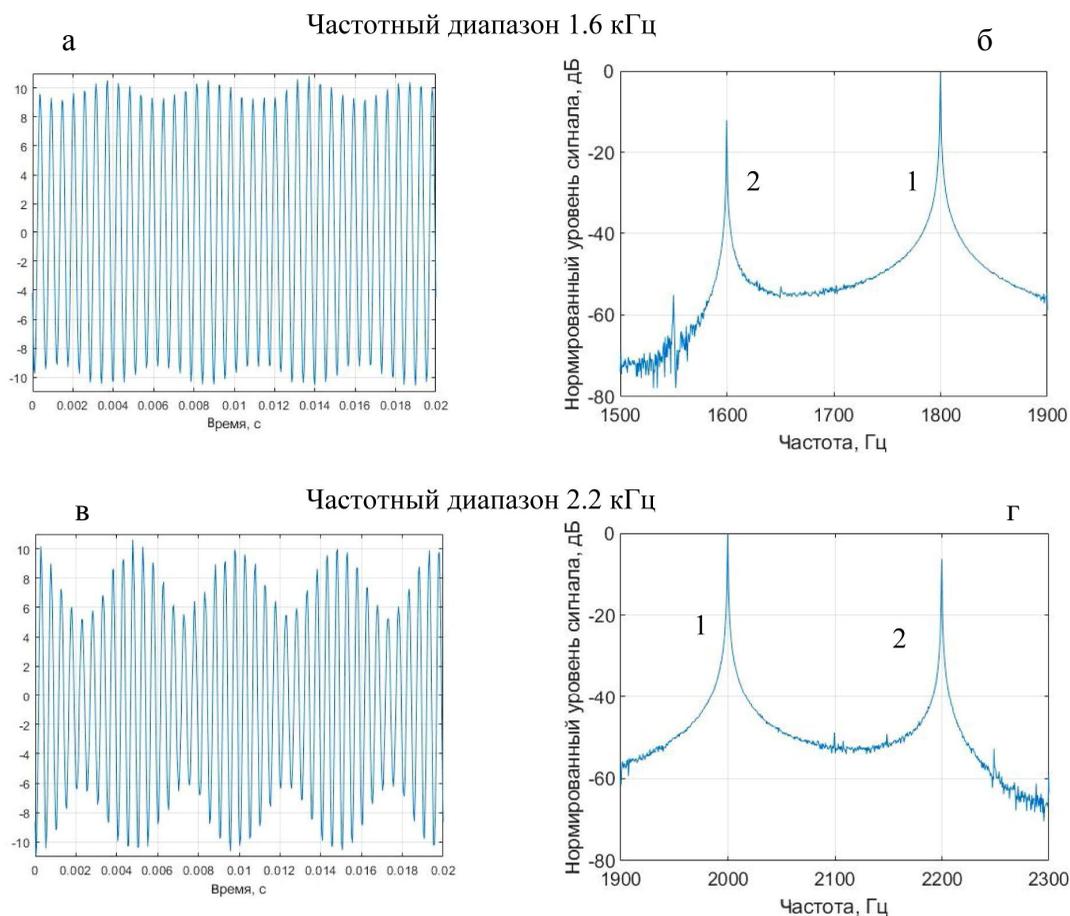


Рис. 4. Осциллограммы сигналов, принятых контрольным гидрофоном, в частотных диапазонах 1.6 кГц (а) и 2.2 кГц (в) и их нормированные спектры для диапазонов 1.6 кГц (б) и 2.2 кГц (г). Цифрами на спектрах (в) и (г) обозначены: 1 — сигнал возбуждения, 2 — сигнал ретранслятора

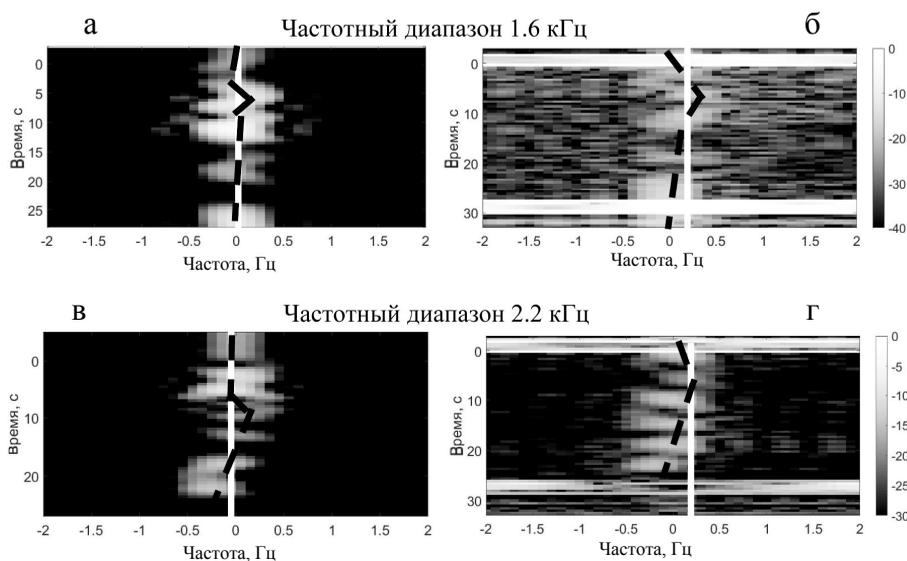


Рис. 5. Сонограммы переизлучаемых ретранслятором сигналов на смещенной частоте $f - Df$ для частотного диапазона 1.6 кГц в точках Г (а) и П (б) и на смещенной частоте $f + Df$ для частотного диапазона 2.2 кГц в точках Г (в) и П (г)

обозначают метки, соответствующие началу и концу движения ретранслятора. Ломаный характер пунктирных кривых объясняется криволинейным характером движения ретранслятора, а прерывистость спектра переизлученного сигнала — высокой чувствительностью гидрофона ретранслятора, переходящего в режим перегрузки из-за гидродинамического шума при движении.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕТРАНСЛЯТОРА

Поскольку каждый из разработанных приборов (выполняющий временную задержку и реализующий частотный сдвиг) содержит два электроакустических преобразователя и два тракта — входной и выходной, — перед проведением измерений необходима калибровка системы. Главной величиной, которая характеризует работу ретранслятора, является коэффициент усиления (КУ), выражаемый через соотношение

$$КУ = \frac{p_2}{p_1}, \quad (1)$$

где p_1 — амплитуда акустического давления прошедшей волны, p_2 — амплитуда акустического давления излученной волны, приведенного к 1 м. Требуемое значение КУ достигается регулировкой в аналоговой части схемы (во входном предварительном усилителе гидрофона и усилителе мощности системы возбуждения излучателя), а также заданием числового параметра, который связывает единицы АЦП с единицами ЦАП в программе сигнального процессора. Калибровка КУ ретранслятора выполняется с помощью технологической установки, схема которой приведена на рис. 6.

Схема включает задающий излучатель I_3 , контрольный гидрофон Γ_k и части испытуемого ретранслятора: излучатель I_p и гидрофон Γ_p . Все погружные части расположены в вершинах квадрата со стороной 1 м, учитывая, что калибровка

проводится в акустическом бассейне или достаточно глубоком водоеме. Во время калибровки задающий излучатель генерирует сигналы в рабочем диапазоне частот. Если калибруется ретранслятор с временной задержкой, то импульсы должны быть длительностью менее 0,5 мс. Во время калибровки ретранслятора с частотным сдвигом возможно применение непрерывных синусоидальных сигналов. Ввиду равных расстояний в приближении свободного пространства можно считать, что амплитуда излучаемого I_3 сигнала p_1 , принимаемого гидрофоном Γ_p , равна амплитуде сигнала p_1' , поступающего от того же источника на гидрофон Γ_k . Тогда с помощью имеющихся средств регулировки амплитуда излучаемого ретранслятором сигнала в точке Γ_k устанавливается на уровне

$$p_2 = КУ^* \cdot p_1', \quad (2)$$

где $КУ^*$ — требуемый коэффициент усиления.

В данной схеме p_1' и p_2 измеряются одним и тем же контрольным гидрофоном из технологической установки. Поскольку при таком методе измерений для гидрофона (вместе с трактом усиления и средством индикации) достаточно возможности измерения относительных величин, то к нему не предъявляются требования поверки или эталона давления. Это значительно упрощает метрологическое обеспечение работ с ретранслятором в целом и его калибровку в частности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эксперимент показал, что разработанный ретранслятор действительно может работать в непрерывном режиме и отрабатывать модуляцию сигнала подсветки в реальном времени. Во-вторых, такой ретранслятор обеспечивает имитацию сигнала, который мог бы отражаться от крупного движущегося объекта.

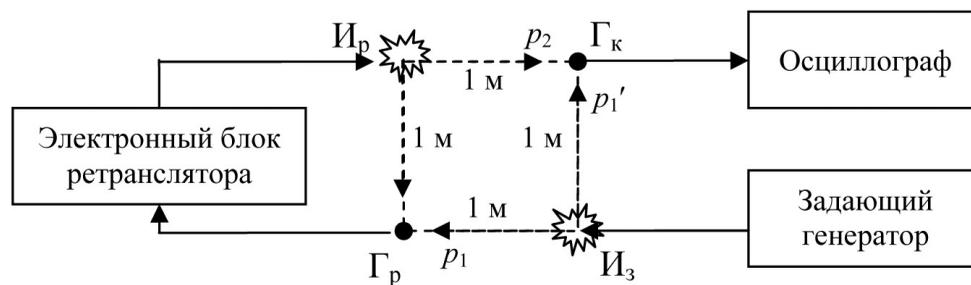


Рис. 6. Схема калибровки ретранслятора

Частота Доплера отраженного сигнала зависит как от проекции скорости на направление падающей волны, так и от проекции на направление отраженной волны. Прием осуществляется во множестве точек, и каждая из них характеризуется своим направлением рассеяния и своей частотой Доплера принятого сигнала. Подвижный маяк-ответчик мог бы имитировать поправку за счет эффекта Доплера для обратного рассеяния, но не целиком для трехмерного случая, как в случае описанных экспериментов. Сравнивая рис. 5, а, с рис. 5, б (а также рис. 5, в, с рис. 5, г), можно убедиться, что в точках Г и П частотная модуляция ретранслированного сигнала различается. В соответствии с выбранной таким образом геометрией эксперимента, в точке П (рис. 3, а) наблюдается вызванное эффектом Доплера двойное смещение частоты, убывая в точке Г практически до нуля. Полученные значения частоты Доплера с учетом криволинейности движения и аппаратной точности повторяют расчетные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в работе методика применения гидроакустических ретрансляторов в научных экспериментах может использоваться в задачах изучения слоев рассеяния звука в океане. Рассматриваемый принцип построения ретрансляторов сигнала позволяет избежать нежелательной обратной связи, обеспечивая устойчивость такой системы переносом спектра для переизлучаемого сигнала на другой частоте. Предложенный метод с перестраиваемой частотой позволяет использовать сигналы различной формы, в том числе непрерывные, что с успехом может применяться для акустической диагностики разномасштабных природных аномалий в морской среде, таких как пузырьковые струи, мезомасштабные неоднородности течения и волнения. В рамках развития описанной методики возможно расширение диапазона скоростей движения объекта с установленным ретранслятором при использовании методов подавления гидродинамических помех на приемном элементе.

ПРИЛОЖЕНИЕ



а



б

Рис. 2. Аппаратура эксперимента. а — контрольная приемно-передающая система: излучатель, гидрофон, коммутатор и аппаратный блок (П на рис. 3); б — погружной модуль ретранслятора Р; в — контрольный гидрофон Г



в

Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь в подготовке оборудования и обеспечении экспериментальных работ старшему лаборанту-исследователю Р.В. Травину. Авторы признательны заведующему отделом акустики океана Д.А. Касьянову и заместителю директора по научной работе ИПФ РАН П.И. Коротину за научные дискуссии, и в том числе по обсуждению результатов исследований.

Грантовая поддержка

Подготовка 3D НЧИ к работе в составе ретранслятора выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН по проекту FFUF-2024-0041.

В части создания и испытания приборов исследования проводились в соответствии с государственным заданием ИПФ РАН по проекту FFUF-2024-0040.

В части оценок применимости приборов к задачам диагностики среды работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-77-10081.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 № 645 "О стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года". URL: <https://base.garant.ru/74810556/>
2. Кобылкин Д.Н. Ресурсы арктического шельфа — это наш стратегический запас // Энергетическая политика. 14.11.2019. URL: <https://energypolicy.ru/resursy-arkticheskogo-shelfa-eto-nash/business/2019/22/14/>
3. Yamaoka H., Kaneko A., Park J.-H., Zheng H., Gohda N., Takano T., Zhu X.H., Takasugi Y. Coastal acoustic tomography system and its field application // IEEE J. Ocean. Eng. 2002. Vol. 27, no. 2. P. 283–295. DOI: 10.1109/JOE.2002.1002483
4. Munk W. Acoustic thermometry of ocean climate (АТОС) // J. Acoust. Soc. Am. 1999. Vol. 105, no. 2. Id. 982. DOI: 10.1121/1.425359
5. Богданович М.Л., Бородин М.А., Коваленко Ю.А., Хаметов Р.К. Возможность уточнения координат подводного аппарата в навигационном поле навигационных маяков с использованием данных от его инерциальной навигационной системы // Гидроакустика. 2020. № 44, № 4. С. 37–44. URL: <https://oceanpribor.ru/docs/SbGA44.pdf>
6. Каралон В.Ю. Гидроакустический маяк-ответчик. Патент RU 2125733 C1, 27.01.1999. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2125733C1/ru>
7. Миронов А.С., Габов В.С. Применение микропроцессора с гетерогенной архитектурой при реализации информационно-управляющей системы гидроакустического маяка // SCIENCE PROSPECTS. 2022. № 4 (151). С. 26–31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49162453>
8. Филиппов Б.И., Рудковский А.А. Проектирование ретрансляционной линии гидроакустического канала связи // Сборник научных трудов НГТУ. 2017. № 4 (90). С. 77–96. DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-77-96
9. Murphy S.M., Scrutton J.G.E., Paul C. Hines Experimental Implementation of an Echo Repeater for Continuous Active Sonar // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2017. Vol. 42, no. 2. P. 289–297. DOI: 10.1109/JOE.2016.2595380
10. Bates J.R., Hines P.C., Canepa G., Tesei A., Ferri G., LePage K.D. Doppler estimates for large time-bandwidth products using linear fm active sonar pulses // UACE2017 — 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition. P. 169–176. URL: https://www.uaconferences.org/docs/UACE2017_Papers/169_UACE2017.pdf
11. Андреев М.Я., Боголюбов Б.Н., Ключин В.В., Рубанов И.Л. Низкочастотный малогабаритный продольно-изгибный электроакустический преобразователь // Датчики и системы. 2010. № 12. С. 51–55. URL: <https://sensors-and-systems.ru/issues/148>
12. Боголюбов Б.Н., Кирсанов А.В., Леонов И.И., Смирнов С.А., Фарфель В.А. Расчет и экспериментальные исследования компактного продольно-изгибного гидроакустического преобразователя с центральной частотой излучения 520 Гц // Гидроакустика. 2015. № 23(3). С. 20–26. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30598910>
13. Бритенков А.К., Фарфель В.А., Боголюбов Б.Н. Сравнительный анализ электроакустических характеристик компактных низкочастотных гидроакустических излучателей высокой удельной мощности // Прикладная физика. 2021. № 3. С. 72–77. DOI: 10.51368/1996-0948-2021-3-72-77
14. Салин М.Б., Ермошкин А.В., Разумов Д.Д., Салин Б.М. Модели формирования доплеровского спектра поверхностной реверберации для звуковых волн метрового диапазона // Акустический журнал. 2023. Т. 69. № 5. С. 595–607.
15. Салин Б.М., Кемарская О.Н., Салин М.Б. "Ближне-полное" измерение характеристик рассеяния движущегося объекта, основанное на доплеровской фильтрации сигнала // Акустический журнал. 2010. Т. 56, № 6. С. 802–812. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15524483>
16. Ermoshkin A.V., Kosteev D.A., Ponomarenko A.A., Razumov D.A., Salin M.B. Surface Waves Prediction Based on Long-Range Acoustic Backscattering in a Mid-Frequency Range // J. Mar. Sci. Eng. 2022. Vol. 10, no. 6. Id. 722. DOI: 10.3390/jmse10060722

17. Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Kosteev D.A., Ponomarenko A.A., Razumov D.D., Salin M.B. Monitoring Sea Currents with Midrange Acoustic Backscattering // *Water*. 2023. Vol. 15, no. 11. Id. 2016. DOI: 10.3390/w15112016
18. Бритенков А.К., Норкин М.С., Стуленков А.В., Травин Р.В. Исследование электроакустических характеристик компактного 3D НЧИ – низкочастотного гидроакустического преобразователя продольно-изгибного типа сложной формы // *Научное приборостроение*. 2023. Т. 33, № 4. С. 28–39. URL: <http://iairas.ru/mag/2023/abst4.php#abst2>

Федеральный исследовательский центр "Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН", Нижний Новгород, Россия

Контакты: *Костеев Дмитрий Алексеевич*, dkosteev@ipfran.ru

Материал поступил в редакцию 26.04.2024

APPLICATION OF DEVICES FOR RELAYING SIGNALS DURING HYDROACOUSTIC MEASUREMENTS

D. A. Kosteev, A. K. Britenkov, N. E. Zemnyukov, A. V. L'vov, M. B. Salin

*Federal Research Center "A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of RAS",
Nizhny Novgorod, Russia*

The use of repeaters in hydroacoustic experiments makes it possible to increase the accuracy of measured parameters such as the speed of an object, its scattering force, and propagation losses. The paper discusses the use of a frequency-shifted repeater when emitting hydroacoustic signals in continuous and pulsed modes. A technique has been tested for determining the speed of a moving object using a repeater based on a compact 3D LF — a low-frequency hydroacoustic transducer of the longitudinal-bending type with a complex shape of the radiating shell. It is shown that the proposed technique provides modulation of the backlight signal in real time as well as simulation of signals reflected by large moving objects. The results of the experiments are consistent with preliminary calculations and confirm, within the framework of the proposed methodology, the possibility of using signals (including continuous signals) of various shapes for the acoustic diagnosis of anomalies in the marine environment.

Keywords: hydroacoustics, signal relay, hydroacoustic emitter, scattering force, Doppler effect, piezoelectric transducer, acoustic power

REFERENCES

1. Garant. *Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 26.10.2020 № 645 "O strategii razvitiya Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii i obespecheniya natsional'noi bezopasnosti na period do 2035 goda"* [Decree of the President of the Russian Federation of 26.10.2020 No. 645 "On the Strategy for the Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and Ensuring National Security for the Period until 2035"]. URL: <https://base.garant.ru/74810556/> (In Russ.).
2. Kobylkin D.N. [Arctic shelf resources are our strategic reserve]. *Ehnergeticheskaya politika* [Energy policy]. 14.11.2019. URL: <https://energypolicy.ru/resursy-arkticheskogo-shelfa-eto-nash/business/2019/22/14/> (In Russ.).
3. Yamoaka H., Kaneko A., Park J.-H., Zheng H., Gohda N., Takano T., Zhu X.H., Takasugi Y. Coastal acoustic tomography system and its field application. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2002, vol. 27, no. 2, pp. 283–295. DOI: 10.1109/JOE.2002.1002483
4. Munk W. Acoustic thermometry of ocean climate (ATOC). *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999, vol. 105, no. 2, Id. 982. DOI: 10.1121/1.425359
5. Bogdanovich M.L., Borodin M.A., Kovalenko Y.A., Hametov R.K. [Possibility of refining coordinates of underwater vehicle in navigation field of navigation beacons using its inertial navigation system data]. *Gidroakustika* [Hydroacoustics], 2020, no. 44(4), pp. 37–44. URL: <https://oceanpribor.ru/docs/SbGA44.pdf> (In Russ.).

6. Karalyun V.Yu. *Gidroakusticheskii mayak-otvetchik* [Hydroacoustic transponder beacon]. Patent RF no. RU 2125733 C1. Prioritet 27.01.1999. (In Russ.). <https://patents.google.com/patent/RU2125733C1/ru>
7. Mironov A.S., Gabov V.S. [Using microprocessor with a heterogeneous architecture for the implementation of the information and control system for the hydroacoustic beacon]. *Perspektivy nauki* [SCIENCE PROSPECTS], 2022, no. 4 (151), pp. 26–31. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49162453>
8. Filippov B.I., Rudkovskiy A.A. [Design of the relaying line of a hydroacoustic communication channel]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university], 2017, no. 4 (90), pp. 77–96. DOI: 10.17212/2307-6879-2017-4-77-96 (In Russ.).
9. Murphy S.M., Scrutton J.G.E., Paul C. Hines Experimental Implementation of an Echo Repeater for Continuous Active Sonar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2017, vol. 42, no. 2, pp. 289–297. DOI: 10.1109/JOE.2016.2595380
10. Bates J.R., Hines P.C., Canepa G., Tesei A., Ferri G., LePage K.D. Doppler estimates for large time-bandwidth products using linear fm active sonar pulses. *UACE2017 — 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition*, 2017, pp. 169–176. URL: https://www.uaconferences.org/docs/UACE2017_Papers/169_UACE2017.pdf
11. Andreev M.Ya., Bogolyubov B.N., Klyushin V.V., Rubanov I.L. [Low-frequency small-sized longitudinal flexural electroacoustical converter]. *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems], 2010, no. 12, pp. 51–55. URL: <https://sensors-and-systems.ru/issues/148> (In Russ.).
12. Bogolyubov B.N., Kirsanov A.V., Leonov I.I., Smirnov S.A., Farfel V.A. [Design and experimental testing of compact flexensional hydroacoustic transducer with central radiation frequency 520 Hz]. *Gidroakustika* [Hydroacoustics], 2015, no. 23(3), pp. 20–26. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30598910>
13. Britenkov A.K., Farfel V.A., Bogolyubov B.N. [Comparison and analysis of electroacoustic characteristics of high power density compact low frequency hydroacoustic transducers]. *Prikladnaya fizika* [Plasma Physics Reports], 2021, no. 3, pp. 72–77. DOI: 10.51368/1996-0948-2021-3-72-77 (In Russ.).
14. Salin M.B., Ermoshkin A.V., Razumov D.A., Salin B.M. [Models of formation of the Doppler spectrum of surface reverberation for sound waves of the metre range]. *Akusticheskij zurnal* [Acoustical Physics], 2023, vol. 69, no. 5, pp. 595–607. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54493934> (In Russ.).
15. Salin B.M., Kemarskaya O.N., Salin M.B. ["Near-field" measurement of scattering characteristics of a moving object based on Doppler signal filtering]. *Akusticheskij zurnal* [Acoustical Physics], 2010, vol. 56, no. 6, pp. 802–812. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15524483> (In Russ.).
16. Ermoshkin A.V., Kosteev D.A., Ponomarenko A.A., Razumov D.A., Salin M.B. Surface Waves Prediction Based on Long-Range Acoustic Backscattering in a Mid-Frequency Range. *J. Mar. Sci. Eng.*, 2022, vol. 10, no. 6, Id. 722. DOI: 10.3390/jmse10060722
17. Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Kosteev D.A., Ponomarenko A.A., Razumov D.D., Salin M.B. Monitoring Sea Currents with Midrange Acoustic Backscattering. *Water*, 2023, vol. 15, no. 11, Id. 2016. DOI: 10.3390/w15112016
18. Britenkov A.K., Norkin M.S., Stulenkov A.V., Travin R.V. [Study of the electroacoustic characteristics of the compact low-frequency hydroacoustic transducer (3D LFHE) of a longitudinal-bending type and a complex shape]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2023, vol. 33, no. 4, pp. 28–39. URL: <http://iairas.ru/mag/2023/abst4.php#abst2> (In Russ.).

Contacts: *Kosteev Dmitriy Alekseevich*,
 dkosteev@ipfran.ru

Article received by the editorial office on 26.04.2024

INTRODUCTION

The development of the oceans is one of the most important areas of human development. For the Russian Federation, development of the seas and oceans is mainly associated with the expansion of the areas of use in the northern regions, including the Arctic Ocean [1]. Taking into account the difficult ice situation, the increase in transportation along the Northern Sea Route, the intensification of mining, and the development of other resources on the Arctic shelf [2], the use of unmanned underwater vehicles is a promising way to carry out many operations in this region.

Sonar is practically the only reliable way to navigate underwater and remotely survey the seabed. In this regard, hydroacoustic stations of one purpose or another are present in the equipment of both unmanned and inhabited underwater vehicles, as well as research vessels. Carrying out research on the propagation and scattering of sound in the marine environment plays an important role in world science as a whole [3, 4].

Measurements of the following values are most often required in marine sonar surveys:

- signal attenuation when passing from point A to point B;
- cross-section of the dispersion of a secluded object;
- specific value of the cross-section for a cluster of diffusers.

Improving the accuracy of such measurements significantly affects the final result. When conducting full-scale hydroacoustic studies, in contrast to laboratory experiments, the assessment of error is a separate task. For example, due to the weak non-stationary inhomogeneities of the medium, a significant correction of the measured scattering level is possible when sound propagates over long distances. As a rule, any natural water area contains significant anomalies, stratification by depth and multi-scale heterogeneities. This means that in order to control the conditions of the experiment in the area under study (for example, in the region of a bubble cloud), it is necessary to have an object with known and rather high reflective properties. In the case of the movement of the object under study, for example, under the influence of wind or current, it is desirable that the reference object moves along with it. Synchronous movement of the reference object together with the subject allows for more accurate orientation of the receiving system along the angle and possibly delay, as well as the calibration of the echo signal level.

A repeater or transponder beacon can be used as a reference object. The specific experimental conditions in which the scattering of continuous and qua-

si-continuous signals is investigated do not allow the effective use of standard types of transponders, and therefore a new type of repeater has been developed to perform a frequency shift of the signal. This article describes a laboratory experiment conducted with a frequency shift repeater, and also describes a method for estimating the error of parameters of a moving target using such a repeater.

USE OF TRANSPONDER BEACONS IN HYDROACOUSTIC STUDIES

Mechanical solutions similar to angle reflectors used in radar are irrational (and sometimes impossible) to use in low-frequency sonar. The dimensions of the effectively reflecting acoustic analogue of the angle reflector for the frequency range of 1–2 kHz, due to the required wave size, create significant difficulties in design and, more importantly, have a small range. For the purpose of compact design, it is most expedient to use electronic devices containing receiving and transmitting acoustic paths.

One of the ways to improve the accuracy of measurements, as well as to assess errors, is through the use of repeaters. A sonar repeater is a device that, after recording an acoustic signal, either repeats it without changing the main characteristics, or emits it with some predetermined correction. In the simplest case, the device transmits a sound signal of a set type in response to an incoming pulse of another set type and is called a transponder-beacon. Transponder beacons are used for navigation of underwater vehicles [5] or for marking underwater equipment to facilitate search operations in the event of loss or accident [6]. More complex systems are actively used in the creation of communication and control lines [7, 8], as well as target simulators in the study of the effectiveness of sonars [9, 10]. Modern repeaters equipped with digital signal processors, can not only re-emit a received signal but also analyze its parameters, record data, transmit a signal with a selected time delay and a predetermined frequency offset.

Devices of this type traditionally have conflicting requirements for increasing the battery life and increasing the acoustic power of the emitted signals. To meet such requirements, the device must include an emitter with high sensitivity and efficiency [11, 12] together with an energy-efficient excitation path. As a rule, the main problem in the development of such a transponder beacon is the creation of compact low-frequency hydroacoustic emitters (LFI) of high specific power [13].

When conducting scientific research, the transponder has slightly different requirements, since the main task of the device is to accurately reproduce the form of the received signal while providing a prede-

terminated amplitude gain. Placement of such a system near the object of study (or directly on it) allows you to measure propagation losses with a given accuracy, including taking into account the effect of multipath and multiplicative (reverberation) interference. Based on the analysis of the direct signal received by the repeater, considering the repeater signal as a reference, it is possible to assess the variability of the medium and the accuracy of measuring scattering levels, for example, surface reverberation [14].

Obviously, in a device that simultaneously transmits and receives signals, it is necessary to exclude self-excitation. To ensure a stable mode, the classic repeater repeats the incoming signal with a slight delay, while determining the moment of time (using a predetermined threshold), starting from which the recording of the incoming signal into the buffer begins and the emission count starts. While such a repeater is operating in emission mode, signal reception is suspended.

It should be noted that for pulses of long duration or continuous signals, their transmission by the repeater at the frequency of the received signal with a delay is practically excluded, since the device is not able to start radiation until the end of the initial transmission. However, the use of such signals is not exotic. Thus, the paper [15] proposes a technique for measuring the scattering cross section of complex bodies under water in the continuous radiation mode. In the works [16, 17], low-frequency tone pulses with a duration of 2 to 8 s are used to diagnose surface waves and underwater currents.

A solution that allows the use of repeaters in quasi-continuous radiation scenarios is a re-emission of the frequency-shifted signal. In this case, radiation is carried out simultaneously with reception in the adjacent frequency range relative to the band of the received signal, which allows for continuous operation. The receiving and transmitting frequency bands must be sufficiently separated so that the transmitting path does not affect the receiving path, but at the same time, they must be close enough so that the physical processes of sound propagation in these ranges can be considered identical.

TIME DELAY REPEATER

Classical repeaters using time delay work well when probing with short pulses. A time-delay repeater is designed to relay signals coming from external systems. Fig. 1, a, shows the oscillogram of the hydroacoustic signal recorded by the receiving element of a repeater, including a packet of three pulses with a duration of 3 ms with a period of 600 ms and three re-emitted pulses with a delay of 250 ms for each.

Fig. 1, б, shows a sonogram of the received and re-emitted pulses.

Fig. 1. Oscillogram of signals recorded by the receiving element of the repeater (a) and sonogram of received and retransmitted pulses (б)

The device used in the experiments has several operating modes: a beacon, a transponder beacon, a time-delay repeater. The sampling frequency of the input ADC repeater is 24414 Hz. The device is managed from the laptop via a LAN cable using the Ethernet protocol and externally installed software. The generation and processing of hydroacoustic signals are performed in the internal repeater hardware unit. Data processing, signal generation and control are performed using the NUCLEO-H743ZI module.

FREQUENCY SHIFT REPEATER

A frequency tuning repeater was created in order to conduct the continuous signal experiments outlined in the introduction using a signal processor ADAU1701. A block diagram of the algorithm implemented in the signal processor is shown in Fig. 2.

Fig. 2. Block diagram of the repeater operation algorithm

The signal received by the hydrophone after heterodyning and passing through the bandpass filter in the $f_0 \pm \Delta f$ band is supplied to the fast Fourier transform (FFT) unit, after which its spectrum is shifted by Df and, with a given conversion factor k of ADC units into DAC units, transmitted to the emission path. Such a repeater was configured to operate in two frequency ranges: 1800 and 2000 ± 25 Hz for the receiving and 1600 and 2200 ± 25 Hz for the emitting signals, respectively. The device works in continuous mode, i.e., re-emits a signal of any amplitude in the selected range with proportional power gain (attenuation).

The disadvantages of such a device include clipping when a signal with an amplitude exceeding the maximum permissible input level of the ADC comes from the hydrophone.

The design of the experiment was developed taking into account the possibility of using a repeater of this type on moving objects and the dimensions of the acoustic pool $3 \times 4 \times 3$ m with damped walls (Fig. 3).

The transceiver system II was located at a distance from the pool wall and a depth of

1 m, (Appendix, Fig. П, а), the digital reference hydrophone Γ was placed at the water surface on the opposite wall (Fig. 3).

Fig. 3. Side view of repeater and control equipment location in hydroacoustic pool.
 P — repeater submersible module; Γ — a reference hydrophone; П — control transceiver system: emitter, hydrophone, commutator and hardware unit

Hingedly fixed repeater P (Appendix, Fig. П, б) was installed on the lower end of the rod. The repeater moved like a pendulum along the arc of a circle with a radius of 3 m, being in the starting position near the hydrophone Γ (Appendix, Fig. П, в).

During the experiment, the transceiver system emitted a continuous tone signal at 2.0 kHz, which was received by the repeater and re-emitted at 2.2 kHz. Using a digital hydrophone, the signal was recorded by the transceiver system. A similar procedure was carried out for a signal at a frequency of 1.8 kHz with re-emission at 1.6 kHz. A compact low-frequency hydroacoustic transmitter of the longitudinal-bending type with a complex shape of the radiating shell — 3D LFHE [18], fixed in an elastic suspension on a polypropylene truss, was used as a repeater emitter. The fundamental resonance frequency of such a 3D LFHE is about 1.7 kHz with a relative bandwidth of 15%.

The oscillograms of the signals received at point Γ by the reference hydrophone are shown in Figs. 4, а, and 4, в, for both frequencies. The spectra of these signals, normalized according to the level of the excitation signal, are shown in Figs. 4, б, and 4, г.

Fig. 4. Oscillograms of signals received by the reference hydrophone in the frequency ranges of 1.6 kHz (а) and 2.2 kHz (в) and their normalized spectra for the ranges of 1.6 kHz (б) and 2.2 kHz (г). The numbers on the spectra (в) and (г) indicate: 1 — excitation signal, 2 — repeater signal

In the frequency range of 1.6 kHz, the repeater received signals at a frequency of 1.8 kHz with spectrum transfer down, and re-emission at a frequency of 1.6 kHz. In the range of 2.2 kHz, the received signals at a frequency of 2.0 kHz were transferred up the spectrum, and re-emission was carried out at a frequency of 2.2 kHz. Sonograms of received signals with frequency shift ($f \pm Df$, where Df was 0.2 kHz) at points Γ and П are shown in Fig. 5.

The black dotted line on the graphs shows the frequency, taking into account the Doppler shift determined by the maximum of the obtained spectral power density, the white line shows the frequency

shift under the assumption of rectilinear motion. The horizontal lines in Figs. 5, б, and 5, г, indicate the marks corresponding to the beginning and end of the repeater movement.

Fig. 5. Sonograms of signals re-emitted by the repeater at a shifted frequency $f - Df$ for frequency range 1.6 kHz at points Γ (а) and П (б) and at a shifted frequency $f + Df$ for the frequency range of 2.2 kHz at points Γ (в) and П (г)

The broken nature of the dashed curves is explained by the curvilinearity of the movement of the repeater, and the discontinuity of the spectrum of the re-emitted signal is explained by the high sensitivity of the repeater hydrophone, overloaded due to hydrodynamic noise during movement.

METROLOGICAL ASPECTS OF REPEATER APPLICATIONS

Since each of the developed devices (performing time delay and using frequency shift) contains two electroacoustic transducers and two paths — input and output — a system calibration is required before measurements. The main value that characterizes the operation of the repeater is the gain (KY), expressed in terms of the ratio

$$KY = \frac{p_2}{p_1}, \quad (1)$$

where p_1 is the amplitude of the acoustic pressure of the incoming wave, p_2 is the amplitude of the acoustic pressure of the emitted wave reduced to 1 m. The required KY value is achieved by adjusting the analog part of the circuit (in the input hydrophone preamplifier and power amplifier of the emitter excitation system), as well as by setting a numerical parameter that connects the ADC units with the DAC units in the signal processor program. Calibration of the repeater KY is performed using the process unit, the diagram of which is shown in Fig. 6.

Fig. 6. Repeater calibration diagram

The circuit includes master radiator I_3 , reference hydrophone Γ_k and parts of the tested repeater: radiator I_p and hydrophone Γ_p . All submerged parts are located at the tops of a square with a side of 1 m, taking into account that calibration is carried out in an acoustic pool or a sufficiently deep reservoir. During the calibration, the master emitter generates signals in the operating frequency range. If the time-delayed repeater is calibrated, the pulses must be less

than 0.5 ms. Continuous sinusoidal signals may be used during the calibration of the frequency shifted repeater. In view of the equal distances in the free space approximation, it can be considered that the amplitude of the signal p_1 emitted by the Π_3 and received by the hydrophone Γ_p is equal to the amplitude of the signal p_1' coming from the same source to the hydrophone Γ_k . Then, using the available means of adjustment, the amplitude of the signal emitted by the repeater at the point Γ_k is set at the level

$$p_2 = KY^* \cdot p_1', \quad (2)$$

where KY^* is the required gain factor.

In this scheme, p_1' and p_2 are measured by the same reference hydrophone in the process unit. Since this method of measurement provides sufficient ability to measure relative values for the hydrophone (together with the amplification path and the display means), there are no requirements for verification or pressure standard. This greatly simplifies the metrological support of the repeater operation in general and its calibration in particular.

DISCUSSION OF RESULTS

The experiment showed that the developed repeater can operate in continuous mode and work out the modulation of the backlight signal in real time. Secondly, such a repeater provides a simulation of a signal that could be reflected from a large moving object.

The Doppler frequency of the reflected signal depends both on the velocity projection in the direction of the incident wave and in the projection on the direction of the reflected wave. Reception is carried out at a plurality of points, and each of them is characterized by its scattering direction and the Doppler frequency of the received signal. A mobile transponder beacon could simulate correction for back-scattering due to the Doppler effect, but not entirely

for the three-dimensional event, as in the case of the experiments described. Comparing Figs. 5, a, with Fig. 5, б, (as well as Fig. 5, в, Fig. 5, г), one can reveal that the frequency modulation of the repeated signal differs at points Γ and Π . According to the geometry of the experiment, at point Π (Fig. 3, a), the double frequency shift caused by the Doppler effect is observed, decreasing at point Γ to almost zero. Obtained Doppler frequency values were repeated by calculated ones taking into account motion curvilinearity and hardware accuracy.

CONCLUSION

The method of using hydroacoustic repeaters in scientific experiments presented in this work can be used for studying sound scattering layers in the ocean. The principle of designing signal repeaters lets us avoid unwanted feedback and provide stability for such a system by transferring the spectrum for the re-emitted signal at another frequency. The proposed method with tunable frequency makes it possible to use signals of various shapes, including continuous ones, which can be successfully used for acoustic diagnostics of different-scale natural anomalies in marine environments, such as bubble jets, mesoscale inhomogeneities of current and waves. As part of the development of the described technique, it is possible to expand the range of speeds of movement of an object with a repeater installed using methods of suppressing hydrodynamic interference at the receiving element.

APPENDIX

Fig. II. Experimental equipment.

a — control transceiver system: emitter, hydrophone, commutator and hardware unit (Π in Fig. 3); б — submersible repeater module P; в — reference hydrophone Γ