

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛА ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ВЕЕРООБРАЗНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ

А.М. Павин, К.Д. Шилин

В работе рассматриваются математический аппарат и алгоритмы моделирования акустического сигнала для широкого класса гидролокационных средств, обладающих приемопередающими антеннами с веерообразной диаграммой направленности (гидролокатор бокового и секторного обзора, многолучевой эхолот). Приводится математическая модель генерации рельефа дна естественного и искусственного происхождения с целью моделирования сигнала гидролокатора и получения реалистичных эхолокационных снимков. Описываются применяемые модели расчета сигнала на приемных антеннах гидролокатора. В качестве достоинств используемого подхода можно выделить относительно небольшую вычислительную сложность применяемых алгоритмов (в сравнении с решением волнового уравнения с граничными условиями), а также потенциальную возможность распараллеливания вычислительных ресурсов на нескольких потоках, процессах и компьютерах. С целью проверки адекватности функционирования предлагаемого подхода была проведена серия численных экспериментов по моделированию акустических эхограмм и сигналов двух приемных антенн гидролокатора бокового обзора. Приведенные результаты позволяют судить о применимости изложенного подхода для отладки алгоритмов обработки гидролокационных сигналов, разработки методов обнаружения объектов на эхолокационных изображениях и иных задач, связанных с необходимостью получения модельных гидроакустических снимков.

Ключевые слова: моделирование гидроакустического сигнала, гидролокационные системы, акустические эхограммы, моделирование изображений, гидролокатор бокового обзора, батиметрия, гидролокатор секторного обзора, многолучевой эхолот.

Введение

Одним из наиболее эффективных средств решения задачи инспекции объектов донной промышленной инфраструктуры считается применение гидроакустических средств, в частности: гидролокатора бокового обзора (ГБО), особенно интерферометрического, гидролокатора секторного обзора (ГСО) и многолучевого эхолота, далее – гидролокаторы. Подобные системы позволяют произвести пространственную реконструкцию подводных объектов, восстановить трехмерную форму рельефа дна и обнаружить объекты в толще воды. Для получения высококачественных гидроакустических снимков подобные системы часто используются в виде буксируемых модулей или в составе автономных необитаемых подводных аппаратов. Перечисленные системы обладают одной или несколькими приемопередающими антеннами с ве-

ерообразной диаграммой направленности. Обработка реальных данных, полученных с приемных антенн, является нетривиальной задачей в связи с многообразием существующих методов и алгоритмов, а также со сложностью подбора параметров их функционирования (выбор частоты, длительности и формы зондирующего импульса; определение размера и формы окна свертки; отбор наилучшего алгоритма обработки данных и т.п.). Разработка и настройка алгоритмов функционирования таких систем без применения специализированных средств моделирования гидроакустического сигнала затруднительна. Кроме того, существует целый класс задач, решение которых напрямую зависит от возможности получения (генерации) разнородных модельных изображений гидролокационных средств:

- подбор исходных данных и обучающих выборок гидроакустических изображений морского дна

с объектами искусственного и естественного происхождения с целью обучения алгоритмов распознавания подводных объектов;

- проведение модельных экспериментов для получения изображений подводных объектов, отснятых под разными ракурсами в различных условиях;
- разработка методов и алгоритмов обнаружения объектов на гидролокационных изображениях;
- настройка алгоритмов распознавания на обучающих выборках с последующим тестированием на валидационных выборках и оценка полученных результатов;
- разработка алгоритмов работы автономных подводных роботов по обнаружению объектов на гидролокационных изображениях.

Существует несколько подходов, связанных с решением задачи моделирования эхо-сигнала и предназначенных для различных целей. При необходимости получения модельного акустического «изображения» часто используются графические способы его формирования [1, 2]. Преимущество таких методов – быстрое действие и возможность создания реалистичных подводных сцен, предназначенных для обработки, например, алгоритмами распознавания. Распространение акустической волны при таком подходе рассматривается как распространение света без учета волновых эффектов, поэтому моделирование сигнала на приемных антеннах гидролокаторов не производится. Существуют подходы, связанные с применением алгоритма трассировки лучей, которые также учитывают фазу пришедшего сигнала [3] и его волновые свойства [4]. В данной работе рассматривается задача моделирования сигнала на приемных антеннах гидролокационных систем с учетом волновой природы акустического импульса.

Сама задача моделирования донной реверберации является важным инструментом для оценки средств гидролокации, а также проверки математических гипотез, связанных с вторичной обработкой данных. Однако непосредственное решение волнового уравнения с граничными условиями сопряжено с высокой вычислительной сложностью. В свою очередь, лучевое приближение для точечного источника является одним из простейших и интуитивно понятных приближений в акустике, позволяющих однако решать задачу моделирования сигнала на приемных антеннах гидролокатора на достаточном для практических задач уровне. При допущении постоянства скорости звука на всей трассе распространения сигнала волны имеют форму концентрических сфер, расходящихся из точки излучения. Для удлиненных (не точечных) источников и приемников акустического сигнала с веерообразной диаграммой

направленности в пределах ближней (френелевской) зоны источника в некотором приближении допустимо представление о цилиндрической форме распространения волны. Следует отметить, что для большинства ГБО и ГСО ближняя зона обзора является преобладающей в общей полосе обзора локатора. В этом случае звук распространяется по прямому, перпендикулярному к поверхности цилиндрического волнового фронта. Используемый в данной работе математический аппарат и применяемые алгоритмы излагаются с указанными допущениями.

Для определенности в работе ведется изложение на примере моделирования работы гидролокатора бокового обзора с двухэлементной антенной системой. Однако основные математические выкладки справедливы для приемной антенной системы с большим числом элементов. Кроме того, описываемый подход в значительной степени применим к моделированию работы многолучевого эхолота и гидролокатора секторного обзора, т.к. основные отличия этих систем с точки зрения проводимых модельных экспериментов заключаются в количестве, расположении и перемещении в пространстве приемопередающих элементов антенных систем.

1. Моделирование поверхности дна естественного и искусственного происхождения

Особенности генерации «акустического рельефа» заключаются в специфике формирования гидролокационных эхограмм различных систем. Например, эхограмма ГБО состоит из последовательности строк, которые появляются не одновременно, а по принципу «строчка-за-строчкой» во время перемещения приемопередающей антенны в пространстве. При генерации рельефа для моделирования работы таких систем, как гидролокатор бокового и секторного обзора, а также многолучевого эхолота необходимо учесть веерообразную диаграмму направленности приемопередающих антенн. Для перечисленных гидролокационных средств дискретизация генерируемого рельефа дна должна быть на порядок меньше длины волны, что в противном случае приводит к появлению артефактов в моделируемом сигнале (например, шум и «ступенчатость» при определении фазы сигнала).

В данной работе описание формы поверхности дна и объектов на нем представлено в виде суммы двух функций:

1) макрорельеф, задаваемый аналитически и отвечающий за моделирование существенных ло-

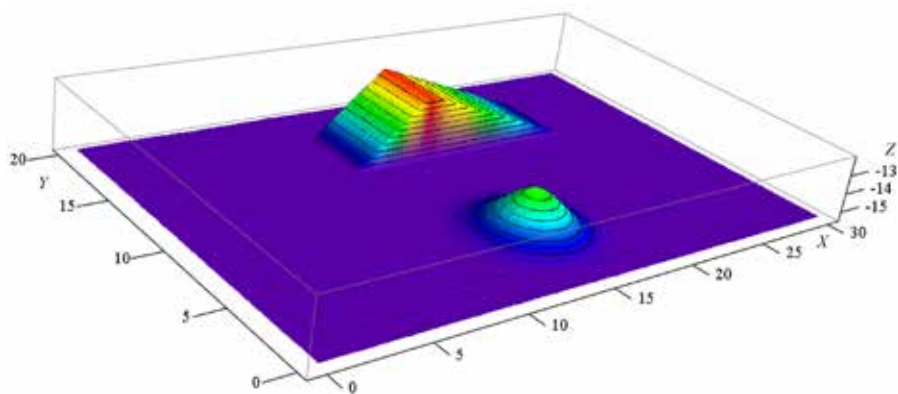


Рис. 1. Пример сгенерированного участка поверхности дна с различными типами макрорельефа

2. Распространение акустического сигнала

Как отмечено выше, в данной работе моделирование донной реверберации производилось с допущением о лучевом распространении сигнала в среде. С целью упрощения дальнейших математических выкладок в изложении опущен ряд существенных, но относительно несложных в дополнительной реализации условий, а именно:

кальных неоднородностей морского дна и донной инфраструктуры (перепады высот грунта, форма моделируемых объектов и т.п.);

2) микрорельеф, отвечающий за мелкомасштабные формы дна и объектов и имитирующий «шероховатость» поверхности.

В простейшем случае макрорельеф может быть описан аналитически как зависимость высоты грунта от координат $macro(x,y)$, где x и y – координаты точек морского дна и объектов на нем в горизонтальной плоскости. В данной работе использовалось две зависимости для генерации различных типов макрорельефа:

1) гладкая непрерывная функция (рис. 1 – возвышение в центральной нижней части изображения), имитирующая плавное локальное возвышение грунта (для описания использовалась функция Гаусса);

2) кусочно-линейная функция (рис. 1 – резкие перепады в центральной верхней части изображения), имитирующая плоские участки дна.

В свою очередь, микрорельеф описывается с применением пространственного спектра поверхности, который подчиняется так называемому «степенному закону» [5]: $W(K)=\varphi/F^\gamma$, где F – пространственная частота (циклов/см); φ – постоянная степенного закона; γ – показатель степенного закона. Постоянные коэффициенты φ и γ в данном выражении берутся из экспериментальных данных. В работе использовались значения ($\varphi=0,00077$; $\gamma=2,54$), полученные в ходе эксперимента SAX99 [6] на побережье Флориды, т.к. среда моделирования (морская вода) и интересующая частота несущего сигнала наиболее близки к условиям проводимых исследований. Пример сгенерированного морского дна с различными формами макрорельефа и постоянной «шероховатостью» микрорельефа представлен на рис. 1.

- диаграмма направленности приемопередающих антенн представлена «идеальным веером» с шириной диаграммы направленности (в направлении перемещения антенны), равной одному периоду излучения/приема (рис. 1 – одна строка моделируемого ГБО-изображения при движении вдоль оси Y);

- диаграмма направленности в вертикальной плоскости покрывает всю моделируемую поверхность сцены без искажений, связанных с затуханием на границах диаграммы, боковыми лепестками и т.п.;

- распространение сигнала от излучающей антенны до сцены не рассматривается и ограничено описанием процесса обратного рассеяния эхо-сигнала от моделируемой поверхности и его приемом на акустической антенне;

- предполагается, что перемещения антенн гидролокатора за время между отправкой импульса и приемом самого последнего отклика не происходит и антенна перемещается «скачкообразно» только между тактами отправки/приема.

Вследствие линейности волнового уравнения, описывающего распространение волн в однородном пространстве, любой пришедший от поверхности сигнал можно представить в виде суммы сигналов от дискретных рассеивателей [7]. Таким образом, принятый сигнал на приемнике P_{II} в момент времени t можно описать следующим выражением:

$$P_{II}(t) = \sum_{i=1}^N P_{II}(t-t_i)A_i, \quad (1)$$

где $P_{II}(t)$ – излучаемый сигнал; t_i – время прихода сигнала от i -го рассеивателя; A_i – коэффициент пропорциональности, связанный с эффективной площадью рассеяния и затуханием волны; N – количество элементарных рассеивателей.

Если за $A(t)$ обозначить сумму коэффициентов A_i , связанных с элементарными рассеивателями i , находящимися на расстоянии $R_i=ct_i$, где c – скорость зву-

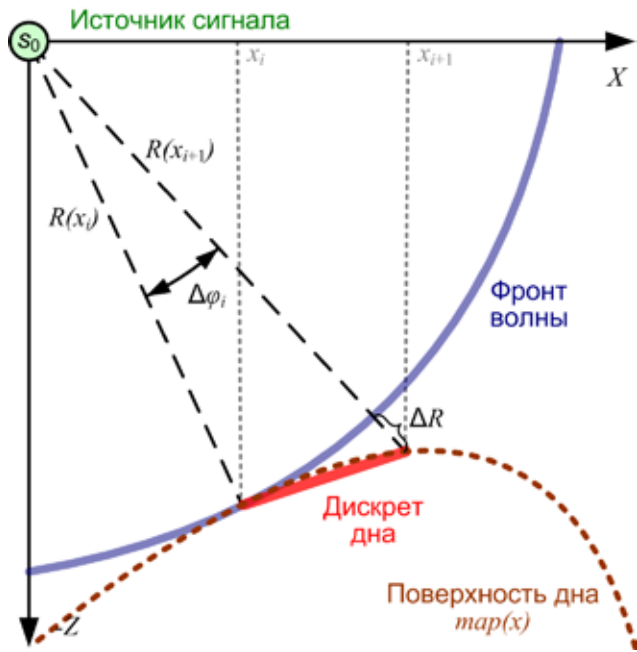


Рис. 2. Схематическое представление распространения акустической волны и способа дискретизации поверхности дна

ка в воде, то принятый сигнал будет являться сверткой излученного сигнала и импульсной функции $A(t)$: $P_{\Pi} = P_{\text{и}}(t-t) * A(t)$. На малых дистанциях можно полагать, что скорость звука постоянна и распространение волн происходит прямолинейно. При этом дискретизация временной области будет производиться по линейному закону: $t = n\Delta t$, где Δt – дискрет по времени; n – номер узла сетки $n = 0, 1, 2, \dots, K-1$; K – количество узлов. Допустим, что описываемая поверхность дна (рис. 2) задана непрерывной функцией $\text{тар}(x)$, где x – координата вдоль оси, перпендикулярной движению антенны гидролокатора (согласно ранее введенным допущениям – координата у сгенерированного рельефа считается константой за время отправки, отражения и приема импульса). Таким образом, для решения задачи построения сигнала донной реверберации требуется дискретизировать функцию рельефа $\text{тар}(x)$.

Для отладки алгоритмов работы гидролокационных систем результирующий сигнал приемных антенн должен быть рассчитан во временной области. Следовательно, дискретизация поверхности должна производиться по времени исходя из требования $\Delta t = \text{const}$. Исходя из рис. 2 $\Delta t = \Delta R / c$, что приводит к требованию дискретизации дна в пространственной области с сеткой $R_n = nc\Delta t$. Пусть $R(x_i)$ – расстояние от приемника до некоторой точки на поверхности дна (см. рис. 2). Тогда последующая точка x_{i+1} на поверхности дна берется исходя из условия $\Delta R = R(x_{i+1}) - R(x_i) = c\Delta t$. Один из приемников (обозначим его s_0) используем как начальную точку отсчета

системы координат и проведем дискретизацию в соответствии с вышеописанными требованиями. При моделировании сигнала гидролокационной системы с несколькими приемниками акустического сигнала возможен расчет сетки для каждого приемника аналогичным способом. Однако такой подход не гарантирует совпадения координат одних и тех же точек рельефа дна для различных приемников, что необходимо для корректного расчета фазы сигнала (в случае моделирования работы интерферометрического ГБО или многолучевого эхолота). Таким образом, целесообразно использовать единую дискретизацию дна для всех приемников.

Искомый коэффициент A_i должен учитывать большинство явлений, связанных с донной реверберацией в достаточной для решения задачи моделирования степени. К таковым можно отнести:

- расширение фронта волны;
- затухание сигнала с расстоянием, обусловленное поглощением и пространственным рассеянием;
- мощность, соответствующую одному дискрету дна;
- коэффициент рассеяния дна в данной точке моделируемого пространства.

Не нарушая общности, источник самого сигнала совместим с приемником антенной системы s_0 (рис. 2). Расстояние от j -го приемника до некоторого i -го дискрета дна обозначим за $R_{i,j}$. Как указывалось ранее, волновой фронт (распространяющийся от источника сигнала s_0 до элементов сцены) для интересующих нас дистанций можно приближенно считать цилиндрическим. В этом случае коэффициент пропорциональности A_p , связанный с эффективной площадью рассеяния и затуханием волны, примет вид:

$$A_i \sim \frac{1}{\sqrt{R_{i,j} + R_{i,0}}} \quad (2)$$

Коэффициент затухания волны с расстоянием α (дБ/км) для частоты f (кГц) можно рассчитать по формуле Франца–Гаррисона [8]:

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2, \quad (3)$$

где: f_1 – частота релаксации борной кислоты; f_2 – частота релаксации сульфата магния; A_p, A_2, A_3 – эмпирические константы; P_p, P_2, P_3 – коэффициенты, зависящие от давления (см. таблицу).

В соответствии с [8] влияние глубины на коэффициент затухания незначительно (менее 2 дБ/км

Параметры расчета коэффициента затухания

№	Параметр	Значение
1	A_1	0,0409
2	A_2	0,7439
3	A_3	0,0002
4	P_1	1,0000
5	P_2	0,9972
6	P_3	0,9992
7	f_1	1,5708
8	f_2	132,022

для перепада глубин менее 100 м). Учитывая, что коэффициент затухания α имеет единицы измерения дБ/км, коэффициент A_i вычисляется по формуле:

$$A_i \sim 10^{-\frac{\alpha(R_{i,j} + R_{i,0})}{20000}} \quad (4)$$

Мощность сигнала, соответствующая одному дискрету дна связана с тем фактом, что не вся энергия излучается на каждый отдельно взятый участок дна, а лишь некоторая её часть. Для изотропного излучателя в двумерном приближении полный угол излучения равен 2π . Таким образом, если одному дискрету соответствует угол $\Delta\varphi_i$, то коэффициент пропорциональности, связанный с эффективной площадью рассеяния на элементе i , будет иметь зависимость:

$$A_i \sim \sqrt{\Delta\varphi_i / 2\pi} \quad (5)$$

Рассеяние отдельно взятого дискрета дна в направлении пришедшего импульса может быть описано на основе анализа проекции эффективной площади рассеяния в данном направлении. В частности, в работе используется закон Ламберта [9, 10], который с достаточной точностью описывает рассеяние от сильно шероховатого дна следующим образом: $A_i \sim \mu_0 \cos(\varphi_{И}) \cos(\varphi_{ПР})$, где μ_0 – коэффициент рассеяния для угла нормального отражения, $\varphi_{И}$ – угол от источника к дискрету дна, $\varphi_{ПР}$ – угол от дискрета дна к приемнику. В итоге общая формула для определения коэффициента A_i , связанного с отсчетом i , примет вид:

$$A_i = \frac{\mu_0 \cos(\varphi_{И}) \cos(\varphi_{ПР})}{\sqrt{R_{i,j} + R_{i,0}}} 10^{-\frac{\alpha(R_{i,j} + R_{i,0})}{20000}} \quad (6)$$

Из вышеизложенного следует, что итоговый коэффициент пропорциональности A_i , связанный с эффективной площадью рассеяния волны на элементе i , учитывает расширение фронта, затухание

волны с расстоянием, рассеяние волны дном вследствие неоднородности поверхности и мощность, соответствующую площади дискрета дна. Приведенные зависимости выглядят достаточными для проведения модельных экспериментов с заявленными ранее целями.

3. Моделирование акустического сигнала

Для проведения модельных экспериментов была сгенерирована сцена морского дна прямоугольной формы 20×40 м (см. рис. 1). Большую часть сцены покрывает относительно ровное дно с «шероховатостью», определяемой ранее описанным микрорельефом. В нижней правой части сцены горизонтальное дно плавно переходит в локальную неоднородность в виде функции Гаусса с возвышением на 2 м и центром в координатах $x = 15$ м, $y = 5$ м. Верхний левый регион содержит объект прямоугольной формы с угловым выступом высотой 3,3 м. Движение приемноизлучающей антенной системы происходит вдоль оси Y с сохранением координат $X = 0$, $Z = 0$. Предполагается, что веер диаграммы направленности антенны расположен поперек траектории перемещения самой антенны и направлен вдоль оси X . При этом сама диаграмма направленности в каждый момент времени t покрывает всю моделируемую часть рельефа в плоскости OXZ (треугольник: антенна, точка рельефа под антенной, дальняя точка рельефа на оси X).

В проводимых модельных экспериментах использовались один источник сигнала и два приемника. Приемники сигнала расположены на расстоянии 1 см друг от друга на глубине 0 м (поверхность раздела вода–воздух не моделируется). Таким образом, расстояние между приемниками сигнала считается много меньшим, чем расстояние от них до точек сцены (десятки метров). Излучаемым сигналом является синусоидальный импульс с частотой 400 кГц и длиной импульса 45 мкс, форма огибающей – меандр.

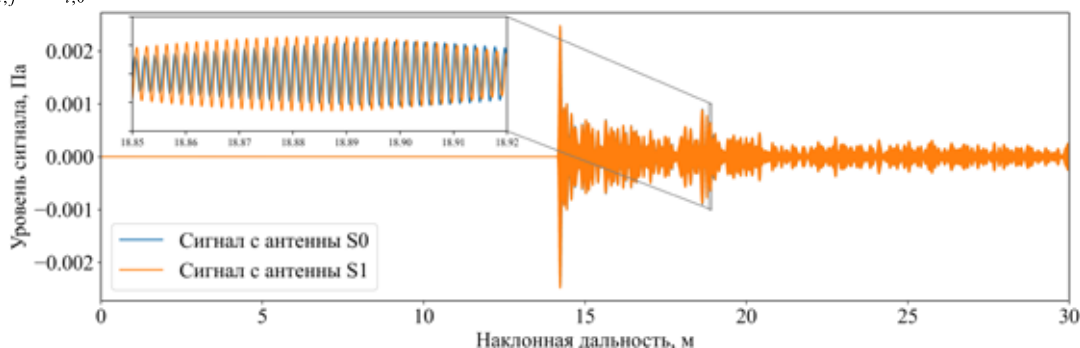


Рис. 3. Полученные в результате моделирования сигналы приемных антенн

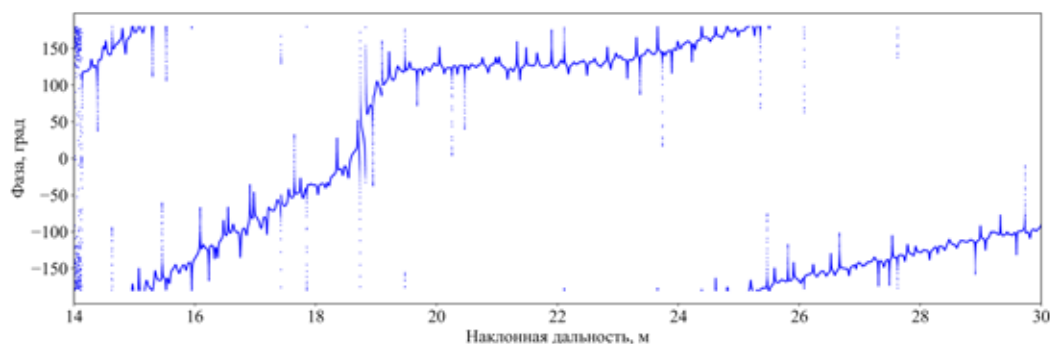


Рис. 4. Определение фазы акустического сигнала

На рис. 3 приведен сигнал, принимаемый двумя приемными антеннами s_0 и s_1 . На отрезке 0~14 м сигнал отсутствует, что соответствует водяному столбу до поверхности дна. На отметке 14 м хорошо виден сильный всплеск сигнала, соответствующий первому отклику от сгенерированного морского дна. Максимальная амплитуда в данной точке объясняется коллинеарностью между векторами распространения сигнала и нормалью к поверхности грунта. Далее амплитуда сигнала убывает до точки, соответствующей наклонной дальности в 18 м. В данной точке наблюдается увеличение амплитуды сигнала, что соответствует началу «гладкого» объекта, представленного в виде функции Гаусса (рис. 1). В районе 18,5 м следует максимум сигнала, который соответствует отражению волны от участков «возвышенности» под прямым углом. Последующее резкое затухание происходит благодаря спаду высоты на обратной стороне представленного препятствия. Оставшаяся часть сигнала соответствует плоскому участку дна за пределами гауссиана.

На врезке рис. 3 представлен фрагмент принимаемого сигнала, соответствующего диапазону 18,85~18,92 м наклонной дальности. На фрагменте видна разность фаз сигналов двух акустических приемников, которая соответствует угловому положению точек моделируемого рельефа относительно приемопередающей антенной системы. Используем классическое выражение для вычисления фазы θ [11]: $\theta = a \sin(\lambda \arg(s_0, s_1) / 2\pi h)$, где λ – длина волны, h – расстояние между приемниками. Вычисленная таким образом фаза сигнала для представленных на рис. 3 данных обладает значительным шумом, что, как показали модельные эксперименты, связано с шероховатостью дна и погрешностью вычислений. Для расчета значения фазы сигнала и с учетом, что изменение фазы происходит на частотах порядка кГц, был применен ряд фильтрующих процедур, а именно: фильтрация принимаемого сигнала, используя полосовой фильтр Баттерворта 5-го порядка (на-

строенный на несущую частоту излучаемого сигнала 400 кГц с полосой пропускания в 10 кГц) и уменьшение коэффициента γ , отвечающего за «шероховатость» грунта, до 1,2.

На рис. 4 показана вычисленная фаза сигналов для расстояния между приемниками в 1 см. Можно видеть, что в точке 18,8 м наблюдается резкое отклонение фазы в сторону увеличения, которое соответствует подъему грунта на гладком объекте. Далее на интервале 19~22 м происходит возвращение графика к медленно нарастающим значениям, соответствующим плоскому дну. В районе 15 и 25 м наклонной дальности на графике наблюдается эффект неопределенности фазы, так как расстояние между антеннами (1 см) больше, чем половина длины волны (1,875 мм).

4. Обработка модельного сигнала и реконструкция рельефа дна

С целью проверки адекватности функционирования предлагаемых алгоритмов была проведена серия численных экспериментов. На рис. 5 приведен фрагмент полученной эхограммы ГБО для модельной сцены, изображенной на рис. 1. В левой части эхограммы (рис. 5) отчетливо видна черная полоса, соответствующая так называемому «водяному столбу». Ширина данной полосы соответствует высоте (отстоянию) антенны от поверхности модельного грунта (левая часть водяного столба не показана, поскольку не несет полезной информации). После водяного столба следует засветка, характерная для снимков ГБО, которая появляется вследствие отражения акустического сигнала «в среднем» под прямым углом к поверхности дна. В нижней части эхограммы находится гладкое локальное возвышение грунта, а в верхней – фрагмент «угловатого» объекта с прямыми гранями. Можно видеть, что перепадам моделируемого рельефа «вверх» соответствует локальная засветка на эхограмме, а перепадам «вниз»

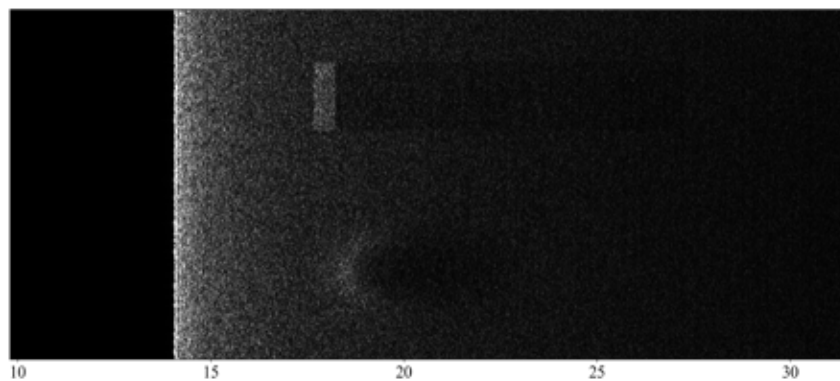


Рис. 5. Моделирование правой ветки эхограммы гидролокатора бокового обзора

– локальное затемнение, что весьма специфично для эхограмм ГБО. Кроме того, при отдалении точек дна от приемопередающей антенны (рис. 5 – правая затемняющаяся область) наблюдается плавное ослабление яркости ГБО-эхограммы, что является логичным следствием увеличения угла между направлением распространения акустического сигнала и нормалью к поверхности грунта, а также затухания сигнала с пройденным расстоянием.

Рис. 6 демонстрирует графики восстановленного профиля дна по сигналам двух приемных антенн. Гидролокационные приемники расположены на расстоянии 1 см друг над другом, что много меньше, чем расстояние от приемников до точек рельефа дна. Для восстановления формы дна использовались не фильтрованные данные о полученной фазе пришедшего сигнала. Можно видеть, что полученные значения профиля дна «в среднем» повторяют сгенерированные значения. Задача всесторонних исследований, связанных с обработкой сигнала с двух, трех и более приемных антенн, также как и задача выбора наилучшего алгоритма восстановления поверхности дна, на данном этапе не рассматривались и относятся к области будущих исследований.

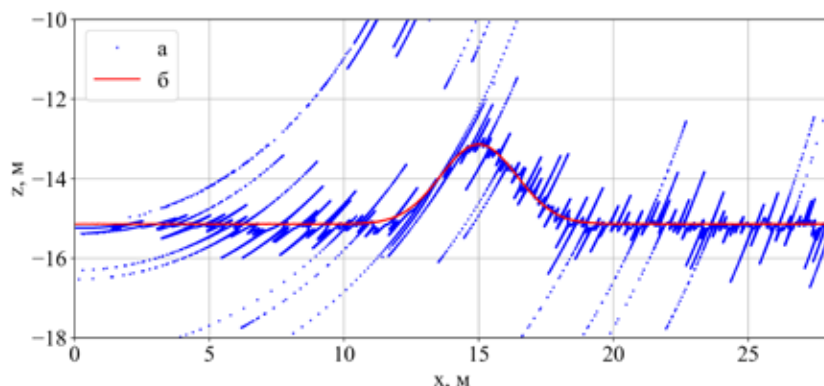


Рис. 6. Восстановление поверхности дна: а – восстановленный рельеф дна; б – исходная поверхность дна

Заключение

Описанный в работе подход планируется к использованию в разработках ИПМТ ДВО РАН при проверке и тестировании алгоритмов обработки данных гидролокационных средств различного спектра и назначения. В частности, приведенная математическая модель используется при проектировании нового интерферометрического гидролокатора бокового обзора, размещаемого на борту автономного необитаемого подводного аппарата

и предназначенного для решения задач инспекции подводных объектов. Полученные модельные снимки гидролокатора используются в экспериментах по подбору исходных данных и обучающих выборок гидролокационных изображений морского дна с расположенными на нем объектами искусственного и естественного происхождения.

В качестве достоинств описанного подхода можно выделить относительно небольшую вычислительную сложность применяемых алгоритмов (в сравнении с решением волнового уравнения с граничными условиями), а также потенциальную возможность распараллеливания вычислительных ресурсов на нескольких потоках, процессах и компьютерах (каждая строчка эхограммы гидролокатора может обрабатываться независимо друг от друга). Кроме того, у предложенного подхода существует потенциал по увеличению быстродействия при использовании графических сопроцессоров, т.к. в основе используемой математики лежит вычисление свертки сигнала.

Дальнейшее направление работ видится в реализации данного подхода в виде компоненты специализированного моделирующего комплекса [12],

позволяющего проводить эксперименты по моделированию сигналов гидролокатора в режиме реального времени. В этом случае станет возможным решение таких задач, как получение гидролокационных изображений подводных объектов с различных ракурсов, разработка методов и алгоритмов обнаружения таких объектов, настройка алгоритмов распознавания на обучающих выборках и др.

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам ИПМТ ДВО РАН Золотареву Владимиру Витальевичу и Инзарцеву Александру

Вячеславовичу за творческую поддержку при проведении исследований, консультации и полезные замечания по содержанию и оформлению данной статьи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00032, <https://rscf.ru/project/22-11-00032/> и при финансовой поддержке

Гранта Министерства науки и высшего образования РФ 13.1902.21.0012 «Фундаментальные проблемы изучения и сохранения глубоководных экосистем в потенциально рудоносных районах Северо-западной части Тихого океана» (соглашение № 075-15-2020-796).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хмельнов А.Е., Золотарев В.В. Моделирование гидролокационных изображений с использованием графических ускорителей // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 1(11). С. 41–48.
2. Багницкий А.В., Инзарцев А.В., Павин А.М., Мельман С.В., Морозов М.А. Модельное решение задачи автоматической инспекции подводных трубопроводов с помощью гидролокатора бокового обзора // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 1(11). С. 17–23.
3. Костоусов А.В., Костоусов В.Б. Моделирование гидролокатора бокового обзора с синтезированной апертурой // Подводные исследования и робототехника. 2008. № 2(6). С. 16–29.
4. Агеев А.Л., Игумнов Г.А., Костоусов В.Б., Агафонов И.Б., Золотарев В.В., Мадисон Е.А. Синтезирование апертуры многоканального гидролокатора бокового обзора с компенсацией траекторных нестабильностей // Подводные исследования и робототехника. 20012. № 2 (14). С. 13–27.
5. Gorm Wendelboe, Finn Jacobsen, Judith M. Bell. An equivalent roughness model for seabed backscattering at very high frequencies using a band-matrix approach // The Journal of the Acoustical Society of America. 2007. Vol. 121, No. 4. P. 814–823.
6. Darrel R. Jackson, Michael D. Richardson. High-Frequency Seafloor Acoustics New York: Springer Science+Business Media, 2007.
7. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации. Ленинград: Судостроение, 1983.
8. R.E. Francois, G. R. Garrison. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption // The Journal of the Acoustical Society of America. 1982. Vol. 72, No. 6. P. 1879–1890.
9. Житковский Ю.Ю. Обратное рассеяние звука дном океана // Акустический журнал. Т. 41, № 5. С. 779–783.
10. Judith M. Bell. A Model for the Simulation of Sidescan Sonar. Edinburgh: Heriot-Watt University, 1995.
11. P. Blondel The Handbook of Sidescan Sonar. Chichester: Praxis Publishing, 2009. P. 313.
12. Мельман С.В., Бобков В.А., Инзарцев А.В., Павин А.М., Черкашин А.С. Программный моделирующий комплекс для автономных подводных аппаратов на базе многопроцессорной архитектуры // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1(19). С. 23–32.

Об авторах

ПАВИН Александр Михайлович, к.т.н., зав. лаборатории гидролокационных систем, ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А.

Ведущий научный сотрудник лаб. № 33
Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

Область научных интересов: системы управления подводными аппаратами, системы технического зрения, обработка сигнала, гидролокационные системы.

E-mail: pavin@bk.ru
Тел.: 8(423)2215545, доб. 510
ORCID: 0000-0001-8878-7888

ШИЛИН Константин Дмитриевич, м.н.с. лаборатории гидролокационных систем
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А
Младший научный сотрудник лаб. № 33
Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5.

Область научных интересов: компьютерное моделирование, обработка сигнала, гидролокационные системы.

E-mail: konshilin@gmail.com
Тел.: 8(423)2215545, доб. 407
ORCID: 0000-0003-3322-0184

Для цитирования:

Павин А.М., Шилин К.Д. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛА ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ВЕЕРОБРАЗНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 2 (40). С. 19–28. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_40_02_03. EDN: EBMJZC.

