Физические поля корабля и океана

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-11>
УДК 534.231-14:51:639.2.081.7:681.883.4

А.В. Корчака, А.А. Эм, В.И. Короченцев

КОРЧАКА АНАТОЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ – аспирант, AuthorID: 1040423, SPIN: 8836-3439,
e-mail: anatoliy_korchaka_informbox@mail.ru

ЭМ АРТЕМ АЛЕКСАНДРОВИЧ – аспирант, AuthorID: 1040463, SPIN: 2053-3840,
e-mail: art_of_motion@mail.ru

КОРОЧЕНЦЕВ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой,
AuthorID: 69973, SPIN: 5700-3169, ScopusID: 6603474562, e-mail: korochentsev.vi@dvfu.ru

Кафедра приборостроения Инженерной школы
Дальневосточный федеральный университет
Суханова ул., 8, Владивосток, Россия, 690091

Математическая модель рыбопоискового гидролокатора

Аннотация: Для развития рыбного хозяйства очень важны современные гидроакустические средства обеспечения рыбопромышленного флота, которые постоянно совершенствуются. Антенна – ответственная часть большинства гидроакустических приборов, обязательная составляющая их проектирования – анализ волнового поля – актуальная, но трудоемкая исследовательская задача. Известные методы ее решения требуют значительных затрат машинного времени на вычисления и не всегда обладают приемлемой точностью. Математическая модель, представленная авторами настоящей статьи, позволяет более эффективно решать задачу анализа волнового поля гидроакустической антенной решеткой (гидролокатора), расположенной в неоднородном физическом объеме. В основе предлагаемого подхода лежит метод направленных функций Грина, который позволяет снизить требования к производительности вычислительных машин, используемых для моделирования. Для учета неоднородностей задействована классическая теория распространения акустических волн в слоистых средах. Для решения рассматриваемых в статье задач названный метод применяется впервые. На базе представленной модели разработаны расчетные алгоритмы, позволяющие производить численное моделирование волновых полей в слоистых средах. Работоспособность предлагаемых алгоритмов демонстрируется на примере расчета поля простой трехэлементной антенной решеткой в морской среде, близ объемных акустических неоднородностей (скоплений рыб или других гидробионтов). Практическая значимость результатов данного исследования – возможность применения предлагаемых нами алгоритмов для выполнения инженерных расчетов при проектировании гидроакустической техники. Использование предложенного подхода позволяет сократить затраты машинного времени без существенных потерь в точности результатов расчета.

Ключевые слова: проектирование антенн, гидроакустическая антенная решетка, анализ волнового поля, акустическая неоднородность, слоистая среда, функции Грина, коэффициент отражения.

Введение

Освоение ресурсов Мирового океана – одно из важнейших направлений экономического развития ведущих морских держав. В нашей стране запасы многих видов водных биоресурсов (например, сайры, сельди и др.) не осваиваются в полной мере. Общий размер добычи не превышает половины допустимого к вылову количества гидробионтов [4]. В то же

время действующая концепция развития рыбного хозяйства России предусматривает наращивание объемов освоения водных биологических ресурсов при условии обеспечения рационального их использования. Важная роль здесь отводится мониторингу состояния запасов эксплуатируемых гидробионтов, их искусственному воспроизводству, а также научным исследованиям и разработкам в области рыбного хозяйства.

Процесс решения таких задач сложно представить без использования гидроакустических средств (далее ГАС). Главные направления использования ГАС в промышленном рыболовстве – поиск, обнаружение и оценка значимости биологических скоплений в зоне промысла невозможны без развития средств гидроакустической телеметрии и телеуправления [7]. Второе перспективное направление – использование гидроакустических полей для управления поведением водных биообъектов с целью повышения эффективности промысла [9]. Контроль состояния запасов гидробионтов, определение успешности их откорма, воспроизводства и выживаемости также требуют применения гидроакустической техники.

В нашей стране активно разрабатываются системы автоматического гидроакустического мониторинга водных биоресурсов. В общем случае такая система представляет собой сеть исследовательских станций, расположенных на промысловых судах, информация с которых собирается, обрабатывается и формируется в карту, отражающую подводную обстановку в конкретном районе [2, 3, 8].

В современном мире процесс проектирования ГАС предполагает проведение компьютерного моделирования работы ее составных частей и устройства в целом. Данный подход позволяет на первоначальном этапе выполнить детальный анализ будущей конструкции, сводя к минимуму количество требуемых натурных испытаний, что соответственно снижает стоимость разработки. Основным элементом любой ГАС является антенная решетка, ориентированная на получение заданной диаграммы направленности. Базовая часть моделирования специализированной антенной решетки – решение задачи анализа ее волнового поля, т.е. определение давления в некоторой точке (на некоторой поверхности) по заданной геометрии и функции возбуждения.

Существует множество классических методов решения названной задачи, значительная часть которых подробно рассмотрена в работах Н.Д. Смаришева, В.Б., Жукова и др. Некоторые из них сравнительно просты и использованы в различных инженерных приложениях. Вместе с тем близость результатов моделирования волнового поля к реальным характеристикам будущей антенны обусловлена, в частности, полнотой учета различных факторов морской среды. Введение ограничений (дно, поверхность воды), учет неоднородностей (скопления биообъектов), учет отражения и преломления сигнала на границах разделов и прочие приближения к реальным условиям непременно ведут к усложнению расчетных моделей. Здесь применение классических методов становится затруднительным ввиду значительного увеличения требований к производительности вычислительных машин и недопустимо большого времени расчета.

Цель нашего исследования – представить обобщенную математическую модель, позволяющую описывать поле, создаваемое направленным излучателем в неоднородном объеме.

Для этого нам необходимо решить следующие задачи:

- сформировать математическую модель решения задачи анализа волнового поля гидролокатора в неоднородном объеме;
- на основе модели разработать расчетные алгоритмы численного моделирования волновых полей в слоистых средах.

Для решения рассматриваемой задачи авторами предлагается использование метода направленных функций Грина [5, 6], который позволяет строго решить уравнение Гельмгольца и соответствующее волновое уравнение для замкнутых объемов с известными акустическими параметрами. Основной его принцип заключается в аппроксимации излучаемой сферической волны веером геометрических секторов, делящим объем расположения источника на некоторое количество независимых объемов. При этом есть возможность использо-

вания выражений для коэффициентов отражения и преломления, справедливых для каждого углового сектора, что позволяет строго рассчитать поле при изменяющихся от сектора к сектору акустических параметрах границы раздела сред. Применение данного метода, мы полагаем, значительно упростит расчетные формулы, что позволит снизить требования к производительности компьютеров, используемых для моделирования. В известных подходах акустическая неоднородность часто заменяется границей раздела двух бесконечных полупространств. В настоящей работе авторы предлагают аппроксимировать скопление промышленных объектов конечным слоем, а множественные скопления на акватории – слоистой средой. Для учета отражения и прохождения сигнала мы использовали классическую теорию волн в слоистых средах [1]: для решения конкретной практической задачи она применяется впервые.

Математическая модель приемоизлучающей системы

Пусть в некотором объеме существуют два гармонических поля, первое из которых создается набором активных элементов (излучатель), отдающим энергию в среду, второе – единичным источником (приемник), находящимся в точке M_0 с координатами r_0 . В линейном приближении первое поле описывается следующим уравнением:

$$\Delta\Phi(\bar{r}_0) + k^2\Phi(\bar{r}_0) = -4\pi q(\bar{r}_0). \quad (1)$$

Второе поле описывается функцией $G(\bar{r}_0, \bar{r})$

$$\Delta G(\bar{r}_0, \bar{r}) + k^2 G(\bar{r}_0, \bar{r}) = -4\pi\delta(\bar{r} - \bar{r}_0), \quad (2)$$

где

$k=2\pi/\lambda=\omega/c$ – волновое число,

λ – длина волны,

c – скорость звука в среде,

ω – циклическая частота,

$q(\bar{r}_0)$ – плотность распределения излучателей в объеме W_0 ,

$\delta(\bar{r} - \bar{r}_0)$ – дельта-функция Дирака.

Функция Грина, удовлетворяющая уравнению (2), будет иметь вид

$$G(\bar{r}_0, \bar{r}) = g(\bar{r}_0, \bar{r}) + \psi(\bar{r}), \quad (3)$$

где $G(\bar{r}_0, \bar{r})$ – поле излучения сферического или цилиндрического ненаправленного излучателя в безграничном пространстве; $\bar{r}$ – вектор, характеризующий координаты точки излучателя; $\bar{r}_0$ – вектор, характеризующий координаты точки наблюдения ($\bar{r}$ и $\bar{r}_0$ выражаются через три ортогональные координаты); $\psi(\bar{r})$ – функция рассеяния.

При $\psi(\bar{r})=0$ пространство безгранично. Сферическую волну, излучаемую в свободное пространство, представим в виде

$$G(\bar{r}_0, \bar{r}) = g(\bar{r}_0, \bar{r}) = \frac{e^{ik|\bar{r} - \bar{r}_0|}}{|\bar{r} - \bar{r}_0|} = \frac{e^{ikR}}{R}. \quad (4)$$

Диаграммная направленная функция Грина представляется в виде следующего выражения:

$$G(M, M_0) = \frac{e^{ikr}}{r} = \sum_{i=1}^l \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(U_1, U_2) e^{i(U_1 x + U_2 y + z \sqrt{k_0^2 - U_1^2 - U_2^2})}}{\sqrt{k_0^2 - U_1^2 - U_2^2}} dU_1 dU_2, \quad (5)$$

где: $U_1 = k_0 \cos \theta$, $U_2 = k_0 \cos \theta \sin \varphi$ – обобщенный угловой интервал;

θ, φ – углы, определяющие верхнюю и нижнюю плоскости рассматриваемого сектора;

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число.

Сектор направленности функции (5) в некотором интервале ΔU :

$$F = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{1\min} \leq U_1 \leq U_{1\max}, U_{2\min} \leq U_2 \leq U_{2\max} \\ 0, & \text{в остальных значениях } U \text{ и в зоне видимости} \\ f(U_1, U_2) & \text{– в зоне мнимых углов} \end{cases} \quad (6)$$

Функция (5) будет основой для проведения численных экспериментов.

Окончательные выражения функций Грина для среды расположения излучателя (среда 3) и среды, находящейся за внешней границей слоя (среда 1, см. рис. 1), в общем виде будут даваться формулами (7) и (8) соответственно:

$$G_3(\bar{r}, \bar{r}_0) = \frac{e^{ik_3 R}}{R} + V \frac{e^{-ik_3 R}}{R}, \quad (7)$$

$$G_1(\bar{r}, \bar{r}_0) = \frac{e^{ik_1 R_{np}}}{R_{np}} W, \quad (8)$$

где

$R = |\bar{r} - \bar{r}_0|$, $R_{np} = |\bar{r}_{np} - \bar{r}_0|$ – координаты точки наблюдения относительно источника;

V – коэффициент отражения волны от плоского слоя;

W – коэффициент прохождения (прозрачности) слоя.

В процессе моделирования поля антенной решетки, ориентированной на обнаружение, определение плотности и других параметров скопления промысловых рыб, к существенной ошибке приводят отраженные сигналы. Известно, что большая часть промысловых гидробионтов (сельдь, скумбрия, сайра, и пр.) ведет стайный образ жизни. Концентрация рыб в стае, как правило, высока. По данным [11, с. 49–54], плотность скопления ставриды длиной 16–18 см может достигать 70 особей на 1 м^3 при размерах стаи около 2000 м^3 . Горизонтальные размеры скоплений изменяются в пределах от десяти до нескольких сотен метров, а вертикальные чаще всего не превышают 100 м. Биологически богатые районы обладают высокой плотностью распределения скоплений пелагических рыб – на одной акватории в сотню квадратных километров может существовать до нескольких тысяч разнородных стай. Зная, что акустические свойства тел рыб, обитающих в водах Мирового океана, отличаются от свойств морской среды без гидробионтов, предлагается представлять скопление морских организмов в виде объемной океанической неоднородности (слоя), а участок акватории с множественными скоплениями рыб заменить слоистой средой. Учитывая типичные размеры биоскоплений, допустимо считать границу раздела вода–стая локально-плоской и использовать для расчетов классическую теорию распространения звука в слоистых средах [1].

При замене скопления морских организмов слоем импедансы крайних сред будут одинаковыми, поэтому коэффициент отражения от слоя примет вид

$$V = \frac{Z_2^2 - Z_1^2}{Z_1^2 + Z_2^2 + 2iZ_1 Z_2 \operatorname{ctg} k_2 d}. \quad (9)$$

Выражение для коэффициента прозрачности слоя:

$$W = \frac{1 + V}{\cos k_2 d - i(Z_1/Z_2)(Z_2 + Z_3) \sin k_2 d}, \quad (10)$$

где Z_1, Z_2, Z_3 – импедансы сред;

d – толщина слоя;

k_2 – волновое число для слоя.

Постановка задачи

Рассмотрим практическую задачу проектирования рыбопоискового гидролокатора. Предположим, что в морской воде с акустическим импедансом $Z_3 = Z_1$, близ стаи промысловых рыб расположена линейная эквидистантная гидроакустическая антенная решетка M_0 , состоящая из трех элементов, с координатами: $x_1 = 0,3$ м, $x_2 = 0,4$ м, $x_3 = 0,5$ м; $y_1 = y_2 = y_3 = 5$ м (рис. 1). Волна, излучаемая совокупностью элементов, падает под произвольным углом на объемное скопление рыб, которое представим в виде слоя толщиной d с импедансом Z_2 . В прямоугольной системе координат предполагается, что плоскость xz совпадает с верхней границей слоя 2, а плоскость xy совпадает с плоскостью падения волны.

Рис. 1. Схематическое изображение рассматриваемой задачи.
Здесь и далее рисунки авторов.

Требуется определить:

- давление, создаваемое антенной решеткой в среде ее нахождения, в точке M с координатами $\vec{r}$;
- давление, прошедшее сквозь слой биологических объектов, в точке M_{np} с координатами $\vec{r}_{np}$.

Моделирование и результаты

В качестве биологического слоя рассматривается скопление морских лучепёрых рыб семейства ставридовых толщиной 5 м в поперечном сечении. Плотность и скорость звука для слоя взяты по данным [10]. Акустические характеристики морской среды приняты в расчете: $\rho = 1030$ кг/м³, $c = 1618$ м/с.

Компьютерное моделирование распределения давления, создаваемого антенной решеткой, производится в программной среде MathCad. Графическая функция n -го элемента антенной решетки, учитывающая составляющую, отраженную от биологического слоя, имеет вид

$$P_n(x) = \int_{U_{\min}}^{U_{\max}} \frac{F(U)}{\sqrt{k^2 - U^2}} \exp\left(i\left((x - x_n)\sqrt{k^2 - U^2}\right) + (y - y_n)U\right) dU - \int_{U_{\min}}^{U_{\max}} \frac{F(U)}{\sqrt{k^2 - U^2}} \times$$

$$\times \frac{(Z1(x))^2 - (Z2(x))^2}{(Z2(x))^2 + (Z1(x))^2 + 2iZ2(x)Z1(x) \cot\left(\left(k \sin(x) \left(2 \frac{\pi}{360}\right) d\right)\right)} \times$$

$$\times \exp\left(i\left((x - x_n)\sqrt{k^2 - U^2}\right) + (y - y_n)U\right) dU, \quad (11)$$

где P_n – давление, создаваемое n -м излучателем;

$$F(U) = \begin{cases} 1 & \text{if } U_{\min} \leq U \leq U_{\max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} - \text{граничные условия.}$$

Исходные данные:

частота $f = 0,5$ кГц;

длина волны $\lambda = 3,236$ м;

исходное давление $P = 1$ Па;

координаты точки наблюдения (М): x_M изменяется в пределах: 0–1000 м, с шагом 2 м;
 $y_M = 1$ м.

Расчетная зависимость давления от расстояния, создаваемая первым элементом антенной решетки в точке наблюдения М, приведена ниже.

Графики распределения давления, полученные для второго и третьего элемента, имеют значительное сходство с распределением (рис. 2) и в настоящей работе не приводятся.

Рис. 2. Распределение поля первого элемента антенной решетки ($x_1 = 0,3$ м, $y_1 = 5$ м), с учетом отражения от слоя гидробионтов.

Графическое представление поля, создаваемого совокупностью всех элементов рассматриваемой антенной решетки в точке наблюдения М, приведено на рис. 3.

Рис. 3. Суммарное поле антенной решетки с учетом отражения от слоя гидробионтов.

Графическая функция n-го элемента антенной решетки, используемая для расчета распределения давления, прошедшего сквозь слой гидробионтов, имеет вид

$$P_n(x) = \int_{U_{\min}}^{U_{\max}} \frac{F(U)}{\sqrt{k^2 - U^2}} \times \frac{1 + V}{\cos\left(k \sin\left(x \left(\frac{2\pi}{360}\right)\right) d\right) - i \left(\frac{Z_2(x)}{Z_1(x)}\right) \sin\left(k \sin\left(x \left(\frac{2\pi}{360}\right)\right) d\right)} \times \\ \times \exp\left(i\left((x - x_n)\sqrt{k^2 - U^2}\right) + (y - y_n)U\right) dU, \quad (12)$$

где P_n – давление, создаваемое n -м излучателем;

$$F(U) = \begin{cases} 1 & \text{if } U_{\min} \leq U \leq U_{\max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \text{ – граничные условия;}$$

V – коэффициент отражения (см. выражения (9), (11)).

Исходные данные:

частота $f = 0,5$ кГц;

длина волны $\lambda = 3,236$ м;

исходное давление $P = 1$ Па;

координаты точки наблюдения ($M_{\text{пр}}$): $x_{\text{мпр}}$ изменяется в пределах: 0–1000 м, с шагом 2 м;

$y_{\text{мпр}} = -8$ м.

Результат расчета давления, создаваемого первым элементом антенной решетки в среде 1 (точка $M_{\text{пр}}$), приведен на рис. 4. Картины распределения давления, создаваемые вторым и третьим элементами, схожи с распределением рис. 4 и не приводятся.

Рис. 4. Распределение поля первого элемента антенной решетки ($x_1 = 0,3$ м, $y_1 = 5$ м), прошедшего сквозь слой гидробионтов.

Зависимость давления, генерируемого совокупностью трех элементов в точке наблюдения $M_{\text{пр}}$, от расстояния представлена на рис. 5.

Рис. 5. Суммарное поле антенной решетки с учетом отражения от слоя гидробионтов.

Анализ графиков (рисунки 2 и 3) показывает, что закономерность снижения уровня давления подобна сферическому закону, что, по предварительным оценкам, соответствует поведению гидроакустического сигнала в реальной морской среде.

Закключение

Итак, мы представили обобщенную математическую модель, позволяющую описывать поле, создаваемое направленным излучателем в неоднородном объеме. Введены коэффициенты отражения и прозрачности плоского слоя. На основании модели разработан рас-

четный алгоритм решения задачи моделирования волнового поля гидроакустической антенной решетки, расположенной близ стаи промысловых рыб. Работоспособность алгоритма проверена при моделировании поля линейной трехэлементной антенной решетки.

К достоинствам расчетной модели можно отнести доступность аппаратного и программного обеспечения, быстроту расчета, к недостаткам – допущение о статичности характеристик слоев, пренебрежение составляющей поля, поглощаемой средами.

Предлагаемые нами алгоритмы могут быть использованы для теоретической (предварительной) оценки распределения давления излучателей в неоднородных слоистых средах, а также послужить основой для разработки или усовершенствования инженерных методик проектирования гидроакустического оборудования в случае подтверждения их эффективности результатами натурных экспериментов, которые мы планируем провести. Использование предложенного подхода позволит сократить затраты машинного времени без существенных потерь в точности результатов расчета.

В дальнейшем мы предполагаем усовершенствовать представленную модель для учета поглощения, реализации алгоритма расчета колебательной скорости элементов, а также для осуществления сопоставления результатов моделирования с собственными экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 340 с. URL: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-brexovskix-lm-volny-v-sloistykh-sredax-2e-izd-nauka-1973ruk300dpi343sgsps.pdf> (дата обращения: 15.10.2019).
2. Дегтев А.И., Шевляков Е.А., Малых К.М., Дубынин В.А. Опыт оценки численности молоди и производителей тихоокеанских лососей гидроакустическим методом на путях миграции в пресноводных водоемах // Известия ТИНРО. 2012. Т. 170. С. 113–135.
3. Долгов А.Н., Гончаров С.М., Кудрявцев В.И. О создании гидроакустических средств для автоматического мониторинга водных биоресурсов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 6 (95). С. 165–169.
4. Концепция развития рыбного хозяйства Российской Федерации на период до 2020 года: одобрена распоряжением Правительства Российской Федерации от 02 сентября 2003 г., № 1265-р. URL: <http://www.szrf.ru/szrf/doc.phtml?nb=100&iissid=1002008030000&docid=106> (дата обращения: 07.05.2019).
5. Короченцев В.И. Волновые задачи теории направленных и фокусирующих антенн. Владивосток: Дальнаука, 1998. 192 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000575643> (дата обращения: 01.10.2019).
6. Короченцев В.И., Губко Л.В., Мироненко М.В., Горасев И.В. Трехмерная неоднородная модель морской среды // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 10 (183). С. 65–79.
7. Кудрявцев В.И. Развитие средств гидроакустической телеметрии и телеуправления в рыбохозяйственной отрасли // Труды ВНИРО. 2018. Т. 170. С. 153–183.
8. Кузнецов М.Ю. Гидроакустические методы и средства оценки запасов рыб и их промысла. Ч. 1. Гидроакустические средства и технологии их использования при проведении биоресурсных исследований ТИНРО-Центра // Известия ТИНРО. 2013. Т. 172. С. 20–51.
9. Кузнецов М.Ю., Кузнецов Ю.А. Гидроакустические методы и средства оценки запасов рыб и их промысла. Ч. 2. Методы и средства промысловой биогидроакустики // Известия ТИНРО. 2016. Т. 184. С. 264–294.
10. Шишкова Е.В. Исследование акустических характеристик тела рыб // Труды ВНИРО. 1958. Т. 36. С. 259–269. URL: <http://www.vniro.ru/ru/izdatelstvo/periodicheskie-izdaniya/trudy-vniro/arkhiv-publikatsij> (дата обращения: 13.10.2019).
11. Яржомбек А.А. Образ жизни и поведение промысловых рыб. М.: ВНИРО, 2016. 200 с.

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-11>

Korchaka A., Yem A., Korochencev V.

ANATOLY KORCHAKA, Postgraduate, e-mail: anatoliy_korchaka_informbox@mail.ru,
 ARTYOM YEM, Postgraduate, e-mail: art_of_motion@mail.ru
 VLADIMIR KOROCHENTSEV, Doctor of Physics and Mathematical Sciences, Professor,
 Head of Department, ScopusID: 6603474562, e-mail: korochentsev.vi@dvfu.ru
 Department of Instrument Engineering, School of Engineering
Far Eastern Federal University
 8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

Mathematical model of fish finder sonar

Abstract: One of the most important aspects of the development of fishing industry is availability and continuous improvement of up-to-date hydroacoustic means for fishing fleet. The crucial part of most hydroacoustic devices is the antenna. Analysis of its wave field is an integral part of design of any new device. All known methods of solving the aforesaid problem often require considerable computer time for calculations and do not always provide the acceptable accuracy. The purpose of this work is to develop computational algorithms as a solution for the problem of analyzing the wave field of the hydroacoustic antenna array (sonar), located within inhomogeneous physical volume – fishing zone, in the presence of biological clusters (shoals of fish). The proposed approach is based on the method of directed Green's functions, application of which reduces the performance requirements of computers used for modeling. The classical theory of acoustic wave propagation in layered media is applied in order to account for the inhomogeneities. In order to solve the problems considered herein, the said method has been used for the first time. Results have clearly demonstrated that the presented mathematical model is adequate to the purpose, on the basis of which computational algorithms are developed that enable numerical simulation of wave fields in layered environments. The efficiency of the proposed algorithms is demonstrated by the example of calculating the field of a simple three-element antenna array in marine environment, close to considerable volumes of acoustic inhomogeneities (accumulations of hydrobionts). The practical significance of the results of this work consists in the possibility of application of the developed algorithms both for educational purposes and for engineering calculations in the course of design of hydroacoustic equipment. Using the proposed approach allows to reduce the cost of computer time without significant losses in the accuracy of calculation results.

Keywords: antennas designing, hydroacoustic antenna array, analysis of the wave field, acoustic heterogeneity, layered medium, Green's functions, reflection coefficient.

REFERENCES

1. Brekhovskikh L.M. Waves in layered media. Moscow, Nauka, 1973, 340 p. URL: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-brekhovskix-lm-volny-v-sloistykh-sredax-2e-izd-nauka-1973ruk300dpi343sgsps.pdf> – 15.10.2019.
2. Degtev A.I., Shevlyakov E.A., Malykh K.M., Dubynin V.A. Experience in estimating the number of juveniles and producers of Pacific salmon by hydroacoustic method on migration routes in freshwater reservoirs. *Izvestiya TINRO*. 2012;170:113–135.
3. Dolgov A.N., Goncharov S.M., Kudryavtsev V.I. On the creation of hydroacoustic means for automatic monitoring of water biological resources. *Izvestiya of Southern Federal University. Engineering Sciences*. 2009(95):165–169.

4. The concept of development of fishery of the Russian Federation for the period until 2020: approved by the order of the Government of the Russian Federation of September 2, 2003, N 1265-r. URL: <http://www.szrf.ru/szrf/doc.phtml?nb=100&issid=1002008030000&docid=106> – 07.05.2019.
5. Korochentsev V.I. The wave theory of directed tasks and focusing antenna. Vladivostok, Dalnauka, 1998, 192 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000575643> – 01.10.2019.
6. Korochentsev V.I., Gubko L.V., Mironenko M.V., Gorasev I.V. The three-dimensional heterogeneous model of the marine environment. Izvestiya of Southern Federal University. Engineering Sciences. 2016;10:65–79.
7. Kudryavtsev V.I. Development of hydroacoustic telemetry and remote control in the fisheries industry. Trudy VNIRO. 2018(170):153–183.
8. Kuznetsov M.Yu. Hydroacoustic methods and tools for assessing fish stocks and fisheries. Part 1. Hydroacoustic equipment and technologies for their use in conducting biological resources investigations of TINRO-Centre. Izvestiya TINRO. 2013(172):20–51.
9. Kuznetsov M.Yu., Kuznetsov Yu.A. Hydroacoustic methods and tools for assessing fish stocks and fisheries. Part 2. The methods and means of fishery hydroacoustics. Izvestiya TINRO. 2016;184:264–294.
10. Shishkova E.V. Investigation of the acoustic characteristics of the fish body. Trudy VNIRO. 1958;36:259–269. URL: <http://www.vniro.ru/ru/izdatelstvo/periodicheskie-izdaniya/trudy-vniro/arkhiv-publikatsij> – 13.10.2019.
11. Jarzombek A.A. Lifestyle and behavior of commercial fish. Moscow, VNIRO, 2016, 200 p.