Физические поля корабля и океана

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-10>
УДК 681.2:534.874.1

Т.Ж. Лобова

ЛОБОВА ТАТЬЯНА ЖАНОВНА – ассистент кафедры физики [аспирант Дальневосточного федерального университета], AuthorID: 1015848, SPIN: 9332-5519,
e-mail: daydream_2012@mail.ru

Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
Верхнепортовая ул., 50а, Владивосток, Россия, 690003

Усовершенствование математической модели точечного излучателя для обнаружения водных биологических ресурсов

Аннотация: Рассматриваются возможности и результаты использования гидроакустических устройств и методов обнаружения водных биологических ресурсов. Принцип действия этих методов основан на решении волновых уравнений (уравнений Гельмгольца), которые при соответствующих граничных условиях позволяют свести их к устойчивым алгоритмам. Такой подход к расчету характеристик излучения антенн означает сложность восприятия единого алгоритма при разработке теории антенн. Специалистам приходится применять разные методики расчета для одной практической задачи – разработки оптимальной конструкции направленной системы.

В настоящей статье рассмотрен математический алгоритм, основанный на теории направленных функций Грина, имеющий угловую зависимость, который позволяет значительно сократить время расчета на компьютере средней мощности. Эта угловая зависимость позволила выделить участки на границах, имеющих однородную структуру. Данная модель позволяет детектировать водные биологические ресурсы по величине давления отраженного сигнала, который характеризует акустическое сопротивление объектов, в том числе плотность и фазовую скорость. Возможности алгоритма продемонстрированы на примере анализа поля точечного источника.

Предлагаемый алгоритм позволяет решать уравнение инженерными приближенными методами в 10 раз быстрее, чем традиционными. Время расчета поля на компьютере средней мощности с использованием программного пакета Mathcad составило примерно 1–2 мин. Получены расчетные модели в криволинейной системе координат. Проведены численные эксперименты, показавшие применимость выведенной математической модели для практических расчетов. Погрешность расчетной модели не превышает 20%. Рассмотренные приближенные методы расчета позволяют проводить инженерные расчеты антенн, расположенных в мелком море с ледовым покровом.

Ключевые слова: эхолокация, гидроакустический метод, оценка биоресурсов, теория функций Грина, поле гидроакустического излучателя, математический алгоритм.

© Лобова Т.Ж., 2020

О статье: поступила: 28.11.2019; финансирование: бюджет ДВФУ.

Руководитель работы – КОРОЧЕНЦЕВ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой приборостроения Инженерной школы, AuthorID: 69973, SPIN: 5700-3169, ScopusID: 6603474562,
e-mail: korochentsev.vi@dvfu.ru, *Дальневосточный федеральный университет*

Введение

Гидроакустические средства (рис. 1) имеют большое значение для рыбной ловли при классификации промыслового скопления рыб вблизи препятствий [5]. Для классификации подводных объектов необходимо формировать диаграммы направленности специальной формы. Назначение диаграмм направленности заключается в уменьшении влияния помех, возникающих при отражении от дна и грунта. Имеющиеся в настоящее время способы и результаты расчета очень сложно анализировать, поэтому для оперативного контроля применяют специальные методы расчета, которые рассмотрены в [3, 10].

Рис. 1. Схема работы гидроакустических средств [9].

Цель настоящей статьи – разработка математического алгоритма, основанного на теории функций Грина для анализа поля сферического излучателя, находящегося в замкнутом объеме (мелком море) с ледовым покровом. Сущность этого метода заключается в формировании математической модели излучения из сферического источника в безграничной среде всея диаграмм направленности [2, 3].

Математическая модель и ее экспериментальная проверка

Рассмотрим постановку следующей задачи анализа сферического излучателя [3, 4]: в морском полупространстве со слоем льда на поверхности. Такая задача может быть использована в качестве исходной при оценке водных биологических ресурсов, расположенных в мелком море с ледовым покровом.

Допустим, известны акустические характеристики (плотность и фазовая скорость) воздуха, льда, воды, координаты элементов сферического излучателя [7, 8]. Поле сферического излучателя можно определить давлением в океане.

Предлагается алгоритм, который основан на теории функций Грина (см. [6]). Интервалы углов $[U_{\min} = k \sin \theta_1, U_{\max} = k \sin \theta_2]$, из которых видны в геометрическом приближении, соответственно, границы ледового покрова (рис. 2).

Рис. 2. Геометрия задачи. Здесь и далее рисунки авторов.

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

Используя выражение для «направленной функции Грина», покажем следующее выражение (функция Грина свободного пространства) [3, 10]:

$$P = \frac{i}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\left[\int_{U_{\min}}^{U_{\max}} \left[\frac{F(U)}{\sqrt{k^2 - U^2}} \cdot e^{i((x-x_0) \cdot \sqrt{k^2 - U^2}) + (y-y_0) \cdot U} \right] dU \right] \right] \quad (1)$$

Окончательное выражение для функции Грина, учитывающей коэффициент отражения от ледового покрова, можно записать в виде:

$$P = \frac{i}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\left[\int_{U_{\min}}^{U_{\max}} \frac{F(U)}{\sqrt{k^2 - U^2}} \cdot e^{i((x-x_0) \cdot \sqrt{k^2 - U^2}) + (y-y_0) \cdot U} dU + \int_{U_{\min}}^{U_{\max}} V \left[\frac{F(U)}{\sqrt{k^2 - U^2}} \cdot e^{-i((x-x_0) \cdot \sqrt{k^2 - U^2}) + (y-y_0) \cdot U} \right] dU \right] \right] \quad (2)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число,

V – коэффициент отражения.

$F(U)$ – функция, характеризующая свойства направленных функций Грина.

Для того чтобы найти коэффициент отражения от слоя льда, нужно найти импеданс Z_1, Z_2, Z_3 на границах сред [1].

$$Z_1 = \frac{\rho_2 \cdot c_2}{\cos(\arcsin(\frac{1.31}{1} \sin(\arcsin(\frac{U}{k_2}))))},$$

где ρ_2 – плотность льда,

c_2 – скорость звука во льду,

k_2 – волновое число.

$$Z_2 = \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\cos(\arcsin(\frac{1.31}{1} \sin(\arcsin(\frac{U}{k_2}))))},$$

где ρ_1 – плотность воды,

c_1 – скорость звука в воде,

k_2 – волновое число.

$$Z_3 = \frac{\rho_3 \cdot c_3}{\cos(\arcsin(\frac{U}{k_2}))},$$

где ρ_3 – плотность воздуха,

c_3 – скорость звука в воздухе,

k_2 – волновое число.

Следовательно, коэффициент отражения

$$V = \frac{(Z_2 + Z_1) \cdot (Z_1 - Z_3) \cdot e^{-i \left[k_2 \cdot \sin \left[x \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \cdot d \right] \right]} + (Z_2 - Z_1) \cdot (Z_1 + Z_3) \cdot e^{i \left[\sqrt{k_2^2 - \left[k_2 \cdot \sin \left[x \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right]^2} \right] \cdot d}}}{(Z_2 + Z_1) \cdot (Z_1 + Z_3) \cdot e^{-i \left[k_2 \cdot \sin \left[x \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \cdot d \right] \right]} + (Z_2 - Z_1) \cdot (Z_1 - Z_3) \cdot e^{i \left[\sqrt{k_2^2 - \left[k_2 \cdot \sin \left[x \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right]^2} \right] \cdot d}} \quad (3)$$

где d – толщина слоя льда.

Результаты расчетов

Проведем численные эксперименты с выражением (1).

Для примера рассмотрим функцию Грина для простейшего сферического излучателя в свободном пространстве, без учета отражения от границ.

При выбранной скорости звука в воде 1500 м/с направленная функция Грина в свободном пространстве представлена на рисунках 3 и 4, которые демонстрируют, что погрешность представления поля сферического источника по алгоритму 1 не превышает 20%. Рисунок 3 демонстрирует: погрешность в интервале углов 80–83° и 0–15° не превышает 10%, а рис. 4 – в интервале 15–20° и 81–85° не превышает 5%.

Рис. 3. Направленная функция Грина в свободном пространстве сферического излучателя по расстоянию r от 0 до 100 м. Сферический излучатель малого радиуса, работающий на частоте 38 кГц, находящийся в точке с координатами $x_0 = 5$ м, $y_0 = 5$ м.

Рис. 4. Направленная функция Грина в свободном пространстве сферического излучателя по расстоянию r от 0 до 100 м при коэффициентах отражения равных 0. Сферический излучатель малого радиуса, работающий на частоте 38 кГц, находящийся в точке с координатами $x_0 = 5$ м, $y_0 = 5$ м.

Применим алгоритм 1 и 2 для анализа поля в воде, скорость звука 1500 м/с, с влиянием отражения от ледовой поверхности, скорость звука во льду 3980 м/с (рис 5).

Рис. 5. Диаграмма направленности точечного источника на расстоянии 100 м от источника. Сферический излучатель малого радиуса, работающий на частоте 38 кГц, находящийся в точке с координатами $x_0=5$ м, $y_0=5$ м.

Для определения ошибки численного эксперимента используем алгоритм (2) для расчета поля от сферического излучателя по расстоянию r , с координатами сферического излучателя $x_0=5$ м, $y_0=5$ м, со скоростью звука: в воде – 1500 м/с, в воздухе – 331 м/с, во льду – 3980 м/с (рисунки 6–8).

Рис. 6. Распределение давления в свободном пространстве по расстоянию r от 0 до 100 м. Сферический излучатель малого радиуса, работающий на частоте 38 кГц, находящийся в точке с координатами $x_0 = 5$ м, $y_0 = 5$ м.

Рис. 7. Распределение давления от льда по расстоянию r от 0 до 100 м. Сферический излучатель малого радиуса, работающий на частоте 38 кГц, находящийся в точке с координатами $x_0 = 5$ м, $y_0 = 5$ м.

Рис. 8. Результирующая давления с учетом отражения от льда и с учетом свободного пространства по расстоянию r от 0 до 100 м. Сферический излучатель малого радиуса, работающий на частоте 38 кГц, находящийся в точке с координатами $x_0=5$ м, $y_0=5$ м.

Выводы

Продолжительность вычисления одного варианта на компьютере средней мощности с использованием программного пакета Mathcad составляет приблизительно 1–2 мин.

Построен график расчета поля сферического излучателя, ограниченного поверхностью воды, покрытой льдом. Разработанные алгоритмы расчетов позволяют проводить анализ давления с заданной погрешностью. Анализ давления отражения звукового поля позволяет классифицировать объект (рыбы, металл и т.д.). Используя данный метод, можно предложить макеты реальных дискретных антенн, формирующих семейство диаграмм направленности специальной формы, оптимальных для использования в мелком море с ледовым покровом.

Дальнейшие направления наших исследования связаны с предположением, что математический алгоритм можно распространить на оптимизацию современных поисковых систем кругового и секторного обзора пространства. В дальнейшем планируется провести более широкий набор численных исследований, иллюстрирующих зависимость направленности от изменения волнового числа k , при вариации уже не точечного излучателя, а количества элементов антенной решетки. Также при доработке алгоритма планируется его использование для анализа диаграмм направленности многоэлементных антенных решеток произвольной геометрии, расположенных в замкнутом объеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 340 с.
2. Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Результаты применения акустического профилографа для мониторинга морских акваторий с использованием алгоритмов синтеза и фокусировки // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1(17). С. 33–38.
3. Короченцев В.И. Волновые задачи теории направленных и фокусирующих антенн. Владивосток: Дальнаука, 1998. 192 с. URL: <https://zenodo.org/record/1286028/files/2018-2-9.pdf> (дата обращения: 22.11.2019).
4. Короченцев В.И., Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Потапенко А.А. Анализ и синтез акустических антенн в морском клине // Морские интеллектуальные технологии. 2016. Т. 1, № 3 (33). С. 274–279.
5. 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.
6. Лобова Т.Ж., Белаш А.П. Усовершенствование математической модели антенной решетки для определения скопления пелагических рыб // Вестник Камчат. гос. тех. ун-та. 2018. № 43. С. 6–12.
7. Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Перунов В.В., Чудаков А.И. Исследование пространственно-временных характеристик гидроакустических сигналов и помех с использованием объемных звукопрозрачных антенн // Подводные исследования и робототехника. 2013. №1(15). С. 33–37.
8. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Василенко А.М., Карачун Л.Э., Леоненков Р.В. Нелинейная просветная гидроакустика и средства морского приборостроения в создании Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения атмосферы, океана и земной коры, мониторинга их полей различной физической природы: монография. Владивосток, 2014. 404 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_02000020322/ (дата обращения: 20.11.2019).
9. Находкин Н.А. Современные способы установки рыболовных сетей подо льдом // Наука и техника в Якутии. 2007. № 1(12). С. 97–99.
10. Korochentsev V.I., Zorchenko N.K., Potapenko A.A. Methods for reducing the error of sonar equipment in sea wedge. Materials 2017 Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017). Chelyabinsk, 2017, p. 1432–1435.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 1/42
Physical Fields of Ship and Ocean

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-10>

Lobova T.

TATIANA LOBOVA, Assistant of the Department *Physics*
Postgraduate, Far Eastern Federal University, e-mail: daydream_2012@mail.ru
MSU named after admiral G.I. Nevelskoy
50a Verkhny Portovaya St., Vladivostok, Russia, 690003

Improvement of the mathematical model of a point radiator for detecting aqueous biological resources

Abstract: This article covers the possibilities for and results of usage of hydroacoustic devices and methods for detecting aquatic biological resources. The principle of operation of these methods is based on the solution of wave equations (Helmholtz equations), which can be reduced to stable algorithms under appropriate boundary conditions. Such approach to calculation of characteristics of antennas radiation means the complexity of perception of a single algorithm in the development of

antenna theory. In this case, specialists have to apply different calculation methods for one practical task – development of the optimal design for adirectional system.

This article discusses the mathematical algorithm based on the theory of directed Green's functions and of an angular dependence, which can significantly reduce the calculation time using a common computer. This angular dependence makes it possible to identify areas at the boundaries which are of a uniform structure. This model allows to detect aquatic biological resources by the pressure value of the reflected signal, which characterizes the acoustic resistance of objects, including density and phase velocity. Capabilities of this algorithm are demonstrated with analysis of the field of a point source.

The proposed algorithm enables solving the equation by engineering approximate methods 10 times faster than traditional ones. The time for calculating of the field using a common computer with Mathcad software package was approximately 1–2 min. Calculation models were obtained in a curvilinear coordinate system. Numerical experiments were carried out, which showed the applicability of the derived mathematical model for practical calculations. The error of the calculation model does not exceed 20%. The considered approximate calculation methods allow engineering calculations for antennas located in a shallow sea with ice cover.

Keywords: echolocation, hydroacoustic method, assessment of bioresources, theory of Green functions, field of hydroacoustic radiator, mathematical algorithm.

REFERENCES

1. Brekhovskikh L.M. Waves in layered media. M., Science, 1973, 340 p.
2. Kasatkin B.A., Kosarev G.V. Results of applying the acoustic profiler for maritime monitoring using algorithms synthesize and focus. Underwater researches and robotics. 2014(17);1:33–38.
3. Korochentsev V.I. The wave theory of directed tasks and focusing antenna. Vladivostok, Dal'nauka, 1998, 192 p. URL: <https://zenodo.org/record/1286028/files/2018-2-9.pdf> – 22.11.2019.
4. Korochentsev V.I., Malashenko A.E., Mironenko M.V., Potapenko A.A. Analysis and synthesis of acoustic antennas in a sea wedge. Marine Intelligent Technologies. 2016;1(33):274–279.
5. Kuznetsov M.Yu. Hydroacoustic methods and means for assessing fish stocks and their fishing. Part 1. Hydroacoustic tools and technologies for their use during bioresource research of the TINRO CENTER. Izvestiya TINRO. 2013;172:20–51.
6. Lobova T.Zh., Belash A.P. Improvement of the mathematical model of the antenna array to determine the accumulation of pelagic fish. Bulletin of the Kamchatka State Technical Univ. 2018;43:6–12.
7. Malashenko A.E., Karachun L.E., Perunov V.V., Chudakov A.I. Investigation of spatial-temporal characteristics of sonar signals and interference using volumetric sound-transparent antennas. Underwater Research and Robotics. 2013(15):33–37.
8. Mironenko M.V., Malashenko A.E., Vasilenko A.M., Karachun L.E., Leonenkov R.V. Nonlinear translucent hydroacoustics and marine instrumentation in the development of the Far Eastern radioacoustic system for illuminating the atmosphere, the ocean and the earth's crust, monitoring their fields of various physical nature: monograph. Vladivostok, 2014, 404 p. URL: https://ru-sneb.ru/catalog/000199_000009_02000020322/ – 20.11.2019.
9. Nakhodkin N.A. Modern methods of installing fishing nets under ice. Science and Technology in Yakutia. 2007(12):97–99.
10. Korochentsev V.I., Zorchenko N.K., Potapenko A.A. Methods for reducing the error of sonar equipment in sea wedge. Materials 2017 Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017). Chelyabinsk, 2017, p. 1432–1435.