

Моделирование распространения широкополосного сигнала в различных типах донных отложений для обнаружения малоразмерных объектов

В. И. Калюта[✉], П. П. Пивнев, С. П. Тарасов

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

[✉] kalyuta@sfedu.ru

Аннотация. Представлено численное моделирование распространения широкополосных ультразвуковых импульсов в диапазоне частот 15...60 кГц с целью оптимизации обнаружения малогабаритных подводных объектов в донных отложениях различной природы (песок, ил, гравий). Выбранный частотный диапазон обеспечивает компромисс между пространственным разрешением, необходимым для идентификации объектов с малыми угловыми размерами, и глубиной проникновения акустической энергии в дисперсные среды с различными акустическими импедансами. Построенная математическая модель, основанная на уравнениях акустики, учитывает диссипативные потери энергии при распространении в водной среде и донных отложениях, зависимость акустической скорости и плотности среды от ее гранулометрического состава и пористости, влияние рельефа дна на когерентное и некогерентное рассеяние сигнала, а также эффект многолучевого распространения, приводящий к временной и пространственной интерференции акустических волн. Проведено сравнительное исследование эффективности линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов и шумоподобных сигналов с псевдослучайной фазовой модуляцией в контексте задач обнаружения с акцентом на анализ их разрешающей способности и способности к подавлению мультипликативных помех и реверберации. Результаты численного эксперимента демонстрируют существенное влияние параметров среды распространения (в частности, акустического импеданса и коэффициента затухания) и формы зондирующего сигнала на вероятность правильного обнаружения малоразмерных объектов, что определяет требования к алгоритмам обработки принимаемых сигналов.

Ключевые слова: широкополосные сигналы, донные отложения, обнаружение подводных объектов, модель распространения сигнала, ЛЧМ-сигналы, шумоподобные сигналы

Для цитирования: Калюта В. И., Пивнев П. П., Тарасов С. П. Моделирование распространения широкополосного сигнала в различных типах донных отложений для обнаружения малоразмерных объектов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 7. С. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-5-14.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Modeling of Broadband Signal Propagation in Different Types of Bottom Sediments for Detection of Small-Sized Objects

V. I. Kaliuta[✉], P. P. Pivnev, S. P. Tarasov

Southern Federal University, Taganrog, Russia

[✉] kalyuta@sfedu.ru

Abstract. This paper presents numerical simulation of broadband ultrasonic pulse propagation in the frequency range of 15...60 kHz to optimise the detection of small-sized underwater objects in bottom sediments of different nature (sand, silt, gravel). The chosen frequency range provides a compromise between the spatial resolu-

tion required for identification of objects with small angular dimensions and the depth of penetration of acoustic energy into dispersed media with different acoustic impedances. A mathematical model based on acoustic equations has been constructed, which takes into account dissipative energy losses during propagation in water medium and bottom sediments, dependence of acoustic velocity and density of the medium on its granulometric composition and porosity, influence of bottom topography on coherent and incoherent signal scattering, as well as the effect of multipath propagation leading to temporal and spatial interference of acoustic waves. A comparative study of the effectiveness of linear-frequency-modulated (LFM) signals and noise-like signals with pseudo-random phase modulation in the context of detection tasks is carried out, with emphasis on analysing their resolution and ability to suppress multiplicative interference and reverberation. The results of numerical experiments demonstrate a significant influence of propagation medium parameters (in particular, acoustic impedance and attenuation coefficient) and the shape of the probing signal on the probability of correct detection of small-sized objects, which determines the requirements to the algorithms for processing the received signals.

Keywords: broadband signals, bottom sediments, underwater object detection, signal propagation model, LFM signals, noise-like signals

For citation: Kaliuta B. I., Pivnev P. P., Tarasov S. P. Modeling of Broadband Signal Propagation in Different Types of Bottom Sediments for Detection of Small-Sized Objects // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 7. P. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-5-14.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Обнаружение малоразмерных подводных объектов, включая фрагменты судов или гидроакустические маяки, представляет собой значимую научно-практическую задачу в сфере гидроакустических исследований и разработок в области морских технологий. Сложность этой задачи обусловлена разнообразием условий распространения звука в морской среде, сложностью донного

рельефа и свойствами донных отложений [1]. Использование широкополосных сигналов позволяет повысить разрешающую способность гидролокаторов и улучшить соотношение сигнал/шум по сравнению с узкополосными методами [2].

Однако распространение широкополосных сигналов в донных отложениях различных типов зависит от множества факторов, включая акустические свойства грунтов, наличие неоднородностей, шероховатость дна и эффект многолучевого распространения [3]. Для оптимизации систем обнаружения необходимо учитывать эти факторы при моделировании распространения сигнала (рис. 1).

В данной статье построена математическая модель распространения широкополосных ультразвуковых сигналов в различных типах донных отложений. Модель учитывает затухание в воде и грунтах, зависимость скорости звука и плотности от типа грунта, шероховатость дна и многолучевое распространение. Для построения модели используются линейно-частотно-модулированные и шумоподобные сигналы.

Математическая модель. Уравнение распространения звука. Распространение акустических волн в упругой среде описывается уравнением Гельмгольца

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0,$$

где p – акустическое давление; k – комплексное волновое число.

Комплексное волновое число учитывает затухание волны в среде и определяется как

$$k = \omega/c + i\alpha,$$

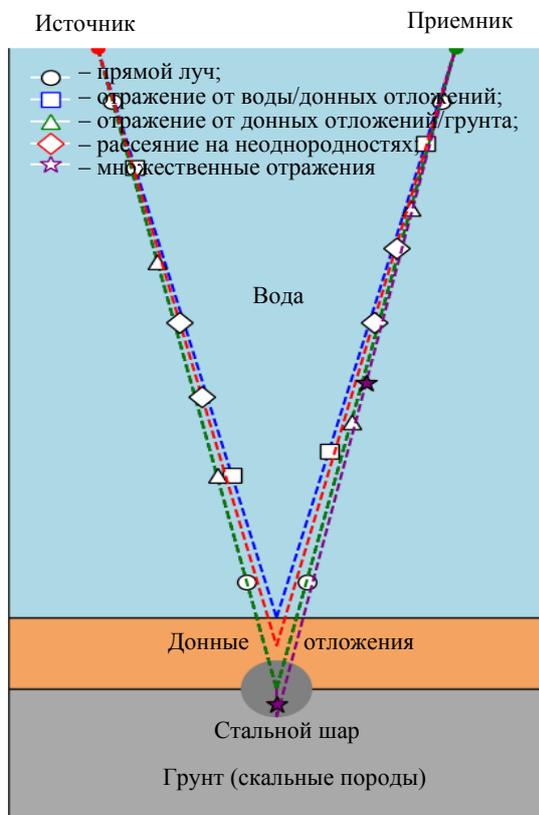


Рис. 1. Схема распространения акустического сигнала
Fig. 1. Schematic of acoustic signal propagation

где $\omega = 2\pi f$ – угловая скорость; f – частота; c – скорость звука в среде; i_α – мнимая часть волнового числа, которая описывает затухание волны в среде.

Уравнение Гельмгольца – частотно-зависимая форма волнового уравнения, описывает распространение гармонических акустических волн в однородной среде. Оно выводится из законов сохранения массы и импульса, а также уравнения состояния среды. Фактически уравнение Гельмгольца описывает, как акустическое давление распределяется в пространстве при заданной частоте.

При использовании уравнения Гельмгольца в данной работе были сделаны следующие упрощения:

– линейность: предполагается, что амплитуда акустических колебаний мала и нелинейные эффекты (например, образование гармоник) пренебрежимо малы;

– однородность среды в пределах элемента сетки: при численном решении методом конечных элементов (МКЭ) предполагается, что среда однородна в пределах каждого элемента сетки. Это означает, что скорость звука и плотность не должны сильно меняться на масштабе размера элемента;

– отсутствие потока: среда предполагается покоящейся, без течений.

Свойства донных отложений. Акустические свойства донных отложений зависят от их типа. В таблице представлены значения скорости звука, плотности и коэффициента затухания для песка, ила и гравия. Значения скорости звука и плотности были взяты из [4].

Свойства донных отложений
Properties of bottom sediments

Тип грунта	Скорость звука c , м/с	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент затухания α , дБ/м
Песок	1700	1900	0.8
Ил	1500	1400	1.5
Гравий	1800	2000	0.5

Коэффициент затухания α для донных отложений зависит от частоты и может быть описан эмпирической формулой [5]

$$\alpha(f) = \alpha_0 f^n,$$

где α_0 и n – эмпирические параметры, зависящие от типа грунта.

Коэффициент затухания α описывает, как быстро уменьшается амплитуда акустической волны при распространении в среде. Высокий

коэффициент затухания означает, что сигнал быстро теряет энергию и распространяется на небольшие расстояния. В донных отложениях, например в иле, затухание обычно выше из-за вязкости и пористости грунта, что приводит к диссипации энергии акустической волны в виде тепла. В грунтах с меньшим затуханием – гравий – сигнал может распространяться на большее расстояние, что облегчает обнаружение объектов [6].

Шероховатость дна. Шероховатость поверхности дна – это характеристика неровностей границы раздела между дном и водой, определяющая степень рассеяния акустической энергии при взаимодействии с этой границей. Она проявляется в виде микрорельефа, включающего песчаные ряби, выступы скал, скопления ракушек и другие неоднородности, размеры которых сопоставимы с длиной волны акустического сигнала или меньше ее.

Шероховатость поверхности дна приводит к рассеянию акустической энергии, уменьшению амплитуды когерентной составляющей отраженного сигнала и увеличению энергии рассеянного поля. Шероховатость моделируется как случайная функция высоты неровностей с заданными статистическими параметрами – среднеквадратическим отклонением σ и корреляционной длиной L [7]. Для учета влияния шероховатости используется модель Кирхгофа, справедливая при больших длинах волн относительно размеров неровностей [8]. Коэффициент рассеяния определяется как

$$R = R_0 \exp(-2L^2\sigma^2 \cos^2(\theta)),$$

где R_0 – коэффициент отражения гладкой поверхности; θ – угол падения.

Модель Кирхгофа, также известная как приближение касательной плоскости, предполагает, что рассеяние акустических волн на шероховатой поверхности происходит локально, как будто каждая точка поверхности – это часть бесконечной касательной плоскости. Эта модель справедлива при выполнении следующих условий:

- радиус кривизны неровностей должен быть большим по сравнению с длиной волны;
- углы наклона неровностей должны быть малыми.

Эти условия обычно выполняются, когда длина волны значительно меньше, чем характерный размер неровностей.

Параметр σ (среднеквадратическое отклонение высоты неровностей) характеризует вертикальный размах неровностей. Чем больше σ , тем

более «высокие» неровности и тем сильнее рассеяние акустической энергии. Параметр L (корреляционная длина) характеризует горизонтальный размер неровностей: чем больше L , тем более «гладкая» поверхность (неровности более протяженные и менее резкие) и тем меньше рассеяние в обратном направлении; чем меньше L , тем рассеяние сильнее. Влияние шероховатости особенно заметно на высоких частотах [9].

Многолучевое распространение. Многолучевое распространение возникает из-за отражений от поверхности воды и дна, а также рефракции в неоднородной среде. Для моделирования многолучевого распространения используется метод геометрической акустики и метод изображения [10].

Полное акустическое поле представляется суммой полей от прямого луча и отраженных лучей:

$$p_{\text{общ}} = \sum (i) A_i \exp[i(kL_i - \omega t)],$$

где A_i – амплитуда i -го луча; L_i – длина пути i -го луча; t – время.

Метод изображений заключается в создании «мнимых» источников, которые расположены симметрично относительно отражающих границ (поверхности воды и дна). Каждый мнимый источник соответствует одному отражению акустического сигнала. Полное акустическое поле в точке приема рассчитывается как сумма полей от прямого источника и всех мнимых источников [11].

Этот метод был выбран из-за его простоты и вычислительной эффективности. Метод геометрической акустики также мог быть использован, но он требует трассировки лучей, что может быть более вычислительно затратным.

В данных исследованиях учитывались отражения от поверхности воды и от дна, а рефракция не учитывалась, поскольку предполагалось, что среда однородна (скорость звука не меняется с глубиной). Учет только первых отражений позволяет снизить вычислительную нагрузку [12].

Типы сигналов и их обработка. Рассматриваются два типа широкополосных сигналов:

1. Линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал:

$$S_{\text{ЛЧМ}_i} = A \sin(2\pi f_0 t + \pi K t^2),$$

где A – амплитуда сигнала; f_0 – начальная частота; $K = \Delta f/T$ – параметр модуляции; Δf – полоса частот; T – длительность сигнала.

2. Шумоподобный сигнал с псевдослучайной последовательностью фаз или кодовым разделением [13]. Обработка сигналов проводится мето-

дом компрессии импульсов с использованием согласованных фильтров. Для ЛЧМ-сигналов применяются фильтры с линейной частотной характеристикой, для шумоподобных – корреляционные обработчики (рис. 2).

Шумоподобный передаваемый сигнал можно описать следующим образом:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \phi(t)), \quad 0 \leq t \leq T,$$

где $\phi(t)$ – фазовая модуляция, основанная на псевдослучайной последовательности.

Псевдослучайная последовательность фаз.

Фазовая модуляция $\phi(t)$ задается псевдослучайной (бинарной) последовательностью $\phi_n \in (0, \pi)$. Фаза сигнала изменяется дискретно с периодом длительности элементарного символа (чипа) T_c :

$$\phi(t) = \sum_n \phi_n \Pi(t) \frac{t - nT_c}{T_c},$$

где $\Pi(t)$ – прямоугольная функция единичного импульса; T_c – длительность каждого элементарного импульса. При распространении сигнала в гидроакустической среде необходимо учитывать затухание, распространение и отражения. Принятый сигнал можно представить как [14]

$$r(t) = \alpha s(t - \tau_d) + n(t),$$

где $\tau_d = 2R/c$ – задержка сигнала, связанная с дальностью R до объекта и скоростью звука в воде c ; $n(\tau)$ – аддитивный шум среды (включая шум моря и внутренние шумы оборудования).

Для обнаружения малоразмерных объектов необходимо выделить слабый отраженный сигнал на фоне шумов [15]. Для этого используется согласованный фильтр, настроенный на переданный сигнал [16]:

$$h(t) = s^{*(-T+t)},$$

где s^* – обозначает комплексно-сопряженный сигнал (если сигнал комплексный; для действительных сигналов $s^* = s$); $-T + t$ – аргумент, задающий зеркальное отражение сигнала во времени с задержкой на T (длительность сигнала).

Выходной сигнал фильтра

$$y(t) = \int_0^T r(\tau) s^{*(\tau-t)} d\tau = \alpha \int_0^T s(\tau - \tau_d) s^{*(\tau-t)} d\tau + \int_0^T n(\tau) s^{*(\tau-t)} d\tau,$$

где $s^*(\tau-t)$ – комплексно-сопряженная версия исходного сигнала $s(t)$, сдвинутого на t и зеркально отраженного во времени; $r(\tau)$ – принятый сигнал в момент времени τ , включающий задержанный и ослабленный исходный сигнал плюс шум:

$$r(\tau) = \alpha s(\tau - \tau_d) + n(\tau).$$

Это ядро согласованного фильтра, настроенного на сигнал $s(t)$.

Например, если $s(t)$ – прямоугольный импульс на интервале $[0, T]$, то $s^*(\tau-t)$ – такой же импульс, отраженный относительно t и сдвинутый на τ ; $n(\tau)$ – аддитивный шум в момент времени τ .

Максимум выходного сигнала $y(t)$ соответствует задержке $t = \tau_d$, что позволяет определить расстояние до объекта:

$$y(\tau_d) = \alpha \int_0^T |s(\tau)|^2 d\tau = \alpha E_s,$$

где $s(\tau)$ – исходный переданный сигнал, зависящий от времени τ ; E_s – энергия переданного сигнала.

Модель включает слой воды и донные отложения с учетом границы раздела и соответствующих граничных условий. Сетка строится с шагом, удовлетворяющим критерию $h \leq \lambda_{\min}/6$, где λ_{\min} – минимальная длина волны в среде. Граничные условия на поверхности воды принимаются как акустические свободные – давление равно нулю. На глубинной границе применяются условия поглощающей границы (Perfectly Matched Layer) для избежания отражений от края области.

Обработка сигналов проводится методом компрессии импульсов с использованием согласованных фильтров (рис. 2). Согласованная фильтрация – это оптимальный линейный метод обнаружения сигнала в аддитивном белом гауссовском шуме (AWGN). Согласованный фильтр максимизирует отношение сигнал/шум на выходе фильтра в момент времени, когда ожидается приход сигнала [17].

Для ЛЧМ-сигналов применяются фильтры с линейной частотной характеристикой. Этот фильтр «сжимает» длительный ЛЧМ-сигнал в короткий импульс, что улучшает разрешение по дальности. Для шумоподобных сигналов – корреляционные обработчики [18]. Корреляционный обработчик вычисляет корреляцию между принятым сигналом и копией переданного сигнала. Максимум корреляции указывает на момент времени, когда пришел отраженный сигнал [19].

Параметры ЛЧМ- и шумоподобных сигналов выбирались исходя из следующих соображений:

- полоса частот (15...60 кГц): выбиралась для обеспечения достаточного разрешения по дальности и возможности проникновения в донные отложения;
- длительность сигнала (10 мс): выбиралась исходя из компромисса между энергией сигнала (чем дольше сигнал, тем больше энергия) и разрешением по дальности (чем короче сигнал, тем лучше разрешение);
- параметр модуляции (для ЛЧМ): определяет скорость изменения частоты ЛЧМ-сигнала. Вы-

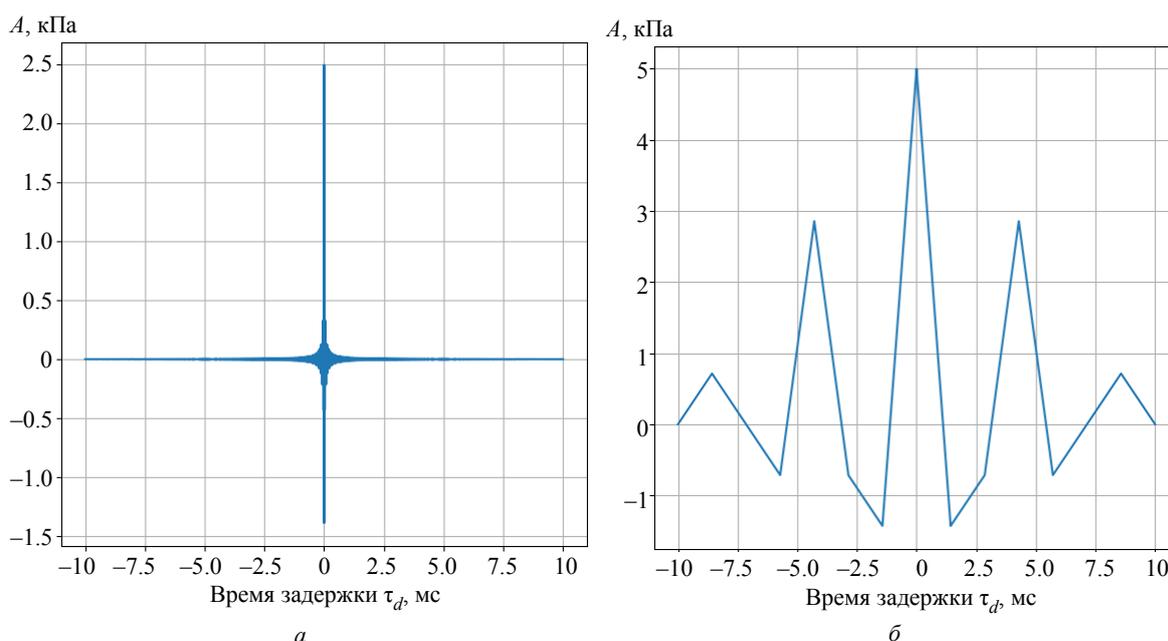


Рис. 2. Результаты компрессии импульсов для ЛЧМ (а) и шумоподобных (б) сигналов
Fig. 2. Pulse compression results for LFM (a) and noise-like (b) signals

бирался таким образом, чтобы обеспечить линейное изменение частоты в заданном диапазоне;

- тип псевдослучайной последовательности (для шумоподобного сигнала): выбирался исходя из требований к автокорреляционной функции (низкий уровень боковых лепестков для уменьшения помех) [20].

Результаты моделирования. Параметры моделирования. Модель представляет собой двумерную область, имитирующую разрез морского дна. Размеры области: глубина воды 50 м, толщина слоя донных отложений 10 м, горизонтальная протяженность области 200 м.

Геометрия модели создавалась в COMSOL Multiphysics с использованием прямоугольных доменов, представляющих слой воды и слой донных отложений. Малоразмерный объект (металлический шар диаметром 10 см) моделировался как сфера, расположенная на глубине 1 м от поверхности дна.

Для дискретизации области использовалась триангулярная сетка второго порядка. Максимальный размер элемента сетки выбирался в соответствии с критерием $h \leq \lambda_{\min}/6$, где λ_{\min} – минимальная длина волны в рассматриваемом диапазоне частот (15...60 кГц). Это обеспечивает достаточную точность численного решения. При частоте 60 кГц и минимальной скорости звука 1500 м/с длина волны составляет 0.025 м, следовательно, максимальный размер элемента сетки составлял примерно 4 мм.

Моделирование выполнялось в модуле Pressure Acoustics, Frequency Domain. В этом модуле COMSOL Multiphysics численно решается уравнение Гельмгольца для акустического давления в частотной области:

Граничные условия:

- На поверхности воды применялось условие акустически мягкой границы, соответствующее нулевому акустическому давлению: $p = 0$.

- На нижней и боковых границах области применялись Perfectly Matched Layers (PML) для поглощения акустической энергии и предотвращения отражений от границ вычислительной области. Ширина слоев PML составляла 10 м.

Допущения, принятые в модели для упрощения расчетов:

- среда (вода и донные отложения) считалась линейной, однородной и изотропной;

- не учитывались вязкие потери в воде и донных отложениях (за исключением затухания, моделируемого с помощью комплексного волнового числа);

- не учитывалась рефракция акустических лучей из-за изменений скорости звука с глубиной.

Диапазон частот: 15...60 кГц; глубина воды: 50 м; толщина донных отложений: 10 м; малоразмерный объект: металлический шар диаметром 10 см; положение объекта: на глубине 1 м в грунте; шероховатость дна: $\sigma = 2$ мм; $L = 10$ см (рис. 3–4).

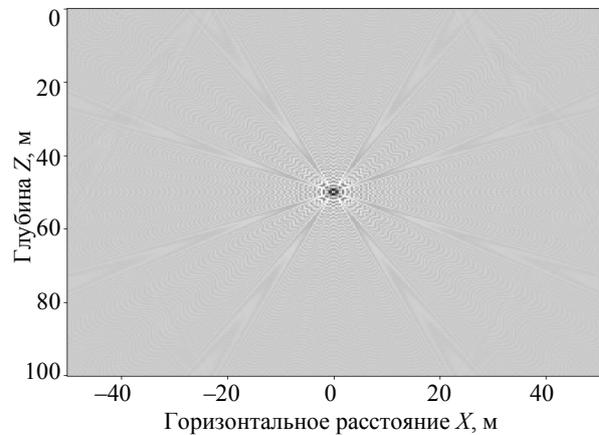


Рис. 3. Распределение акустического давления в модели с учетом границ раздела сред для ЛЧМ
Fig. 3. Acoustic pressure distribution in the model considering media interfaces for LFM

Градации оттенков на рис. 3: темные области соответствуют зонам положительного акустического давления (сжатие), светлые области – зонам отрицательного давления (разрежение), серые области – зонам с нулевым или промежуточным давлением. Интерференционная картина показывает взаимодействие прямой волны от источника с отраженными волнами от границ раздела сред. Максимальные значения акустического давления достигают ~350 Па в области источника, затухая с расстоянием в соответствии с коэффициентом поглощения $\alpha = 0.00117 \text{ м}^{-1}$.

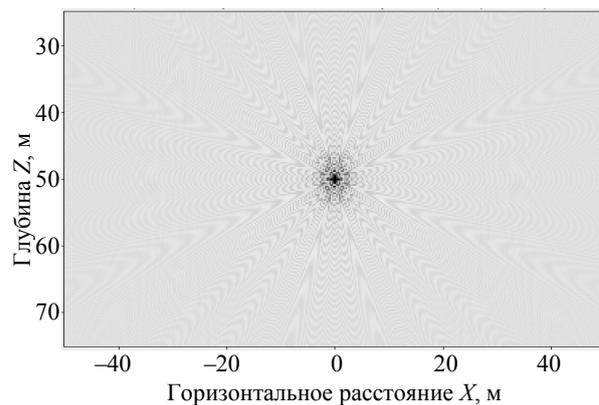


Рис. 4. Распределение акустического давления в модели с учетом границ раздела сред для шумоподобного сигнала

Fig. 4. Acoustic pressure distribution in the model with consideration of media interfaces for the noise-like signal

Градации оттенков на рис. 4: темные области соответствуют зонам максимального положительного акустического давления (до +20 Па),

светлые области – зонам отрицательного давления (до -15 Па), серые области – зонам с нулевым или промежуточным давлением. Интерференционная картина демонстрирует сложное взаимодействие прямой волны от точечного источника (расположенного на глубине 50 м) с отраженными волнами от поверхности раздела вода–воздух (коэффициент отражения $R = -0.98$) и от дна ($R = 0.8$). Характерные концентрические окружности и эллиптические паттерны формируются вследствие конструктивной и деструктивной интерференции на центральной частоте 37.5 кГц.

Влияние типа донных отложений. При моделировании распространения ЛЧМ-сигнала над различными типами донных отложений были получены следующие результаты (рис. 5):

- песок: затухание сигнала умеренное, отраженный сигнал имеет достаточную амплитуду для обнаружения объекта на глубине до 1 м в грунте;
- ил: сильное затухание, амплитуда отраженного сигнала значительно снижается, обнаружение объектов затруднено;
- гравий: минимальное затухание, хорошая отражательная способность, высокая эффективность обнаружения.

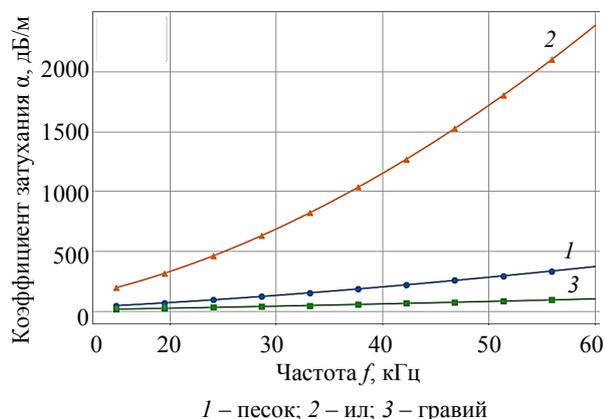


Рис. 5. Зависимость коэффициента затухания от частоты
Fig. 5. Dependence of attenuation coefficient on frequency

Влияние шероховатости дна. Исследование влияния шероховатости показало, что при увеличении σ от 0 до 5 мм амплитуда отраженного сигнала от объекта снижается на 20 (рис. 6).

Сравнение типов сигналов ЛЧМ-сигналы обеспечивают высокое разрешение по дальности благодаря узкой автокорреляционной функции. Это позволяет различать объекты, расположенные на малых расстояниях друг от друга.

Шумоподобные сигналы обладают большей помехоустойчивостью и устойчивы к интерференции за счет низкого уровня боковых лепестков корреляционной функции, однако их разрешающая способность ниже, чем у ЛЧМ-сигналов.

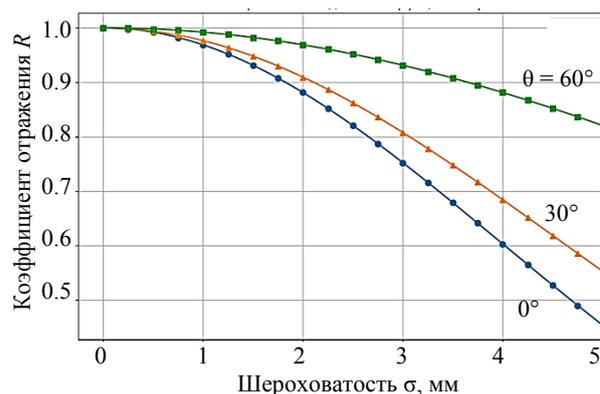


Рис. 6. Влияние шероховатости дна на коэффициент отражения
Fig. 6. Effect of bottom roughness on the reflection coefficient

Влияние многолучевого распространения.

Учет многолучевого распространения показал, что отражения от поверхности и дна приводят к искажению формы принимаемого сигнала и возникновению дополнительных максимумов на корреляционной функции. Это может привести к ложным срабатываниям или трудностям в интерпретации данных.

Результаты моделирования подтверждают, что свойства донных отложений существенно влияют на распространение акустических сигналов и эффективность обнаружения малоразмерных объектов. В условиях слабого затухания (гравий) эффективность обнаружения выше, что позволяет обнаруживать объекты на большей глубине и дистанции. Шероховатость донной поверхности оказывает негативное влияние на амплитуду сигнала, отраженного от подводного объекта, что обусловлено рассеянием акустической энергии на неоднородностях рельефа. Данный эффект приводит к снижению интенсивности сигнала, регистрируемого приемной системой, и требует обязательного учета при калибровке системы обнаружения, а также при выборе оптимальных параметров зондирующего сигнала – частоты, длительности и формы импульса и т. п. Учет шероховатости дна позволяет повысить точность и надежность идентификации объектов в условиях сложной акустической среды. Сравнение типов сигналов показывает, что выбор сигнала зависит от конкретных условий. Многолучевое распространение осложняет обработку сигналов и требует применения продвинутых алгоритмов цифровой обработки адаптивных фильтров и методов доплеровской компенсации.

Заключение. Построенная математическая модель позволяет комплексно оценивать влияние

различных факторов на распространение широкополосных акустических сигналов в воде и их взаимодействие с донными отложениями. Учет физических свойств грунтов, шероховатости донной поверхности и эффектов многолучевого распространения акустических волн представляют необходимое условие для оптимизации параметров гидролокационных систем. Это позволяет минимизировать влияние неоднородностей среды на распространение сигнала, повысить точность обработки данных и, как следствие, увеличить эффективность обнаружения малоразмерных подводных объектов. Сравнение полученных ре-

зультатов с данными, представленными в [15]–[20], подтверждает адекватность построенной модели и ее применимость для решения задач обнаружения подводных объектов.

Предложенный подход может быть использован для разработки новых алгоритмов обработки гидроакустических сигналов, адаптированных к конкретным условиям морской среды. Дальнейшие исследования могут быть направлены на учет нелинейных эффектов при высоких интенсивностях сигналов, а также на разработку адаптивных алгоритмов обработки сигналов, учитывающих изменчивость среды.

Список литературы

1. Акустика дна океана (материалы конф., Специя, Италия, 1980) / под ред. У. Купермана, Ф. Енсена. М.: Мир, 1984. 454 с.
2. Бреховских Л. М., Годин О. А. Акустика неоднородных сред. Т. 2: Звуковые поля в слоистых и трехмерно-неоднородных средах. М.: Наука, 2009. 425 с.
3. Луньков А. А., Шерменева М. А. Взаимодействие мод на сосредоточенной неоднородности в мелководном акустическом волноводе в широкой полосе частот // Акуст. журн. 2022. Т. 68, № 5. С. 510–519.
4. Григорьев В. А., Луньков А. А. Взаимодействие мод на киле тороса в широкой полосе частот // Акуст. журн. 2023. Т. 69, № 4. С. 453–464.
5. Шумейко А. Э., Яскевич М. Л. Акустическое лонцирование донных отложений // Евразийский союз ученых. 2016. Т. 27, № 6–2. С. 81–85.
6. Лёгуша Ф. Ф., Попов Ю. Н. Численное моделирование распространения акустического сигнала в подводном звуковом канале // Тр. Крыловского гос. науч. центра. 2021. Т. 2, № 396. С. 122–133.
7. Колыхалин В. М. Моделирование дистанционного мониторинга твердых остатков нефтепродуктов в резервуарах // Noise Theory and Practice. 2023. Т. 9, № 4. С. 7–24.
8. Писарев П. В., Ахунзянова К. А. Численное исследование акустических процессов в модельных каналах для разработки широкополосных авиационных звукопоглощающих конструкций на основе конического заполнителя нового типа // Noise Theory and Practice. 2023. Т. 9, № 4. С. 67–78.
9. Попов Ю. Н. Применение численных методов при моделировании распространения акустических волн в волноводах с резонансными поглотителями // Тр. Крыловского гос. науч. центра. 2024. Т. 4, № 410. С. 193–200.
10. Метод симуляции импульсной характеристики горизонтально-слоистого гидроакустического волновода с жидким дном / В. А. Лисютин, О. Р. Ластовенко, В. В. Довгаленко, В. Л. Лучин, Н. В. Петренко // Инженерный вестн. Дона. 2020. № 1(61). С. 1–11.
11. Вагин А. В., Воротынцева А. С. Гидроакустическое устройство профилирования донного грунта с синтезированной апертурой // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 1. С. 78–86.
12. Волощенко Е. В. Перспективы применения для измерения характеристик морского волнения гидроакустических систем с использованием режима параметрического излучения // Науч. приборостроение. 2024. Т. 34, № 3. С. 37–53.
13. Заславский Ю. М., Заславский В. Ю. К анализу акустического поля при рассеянии на периодически неровной границе раздела // Noise Theory and Practice. 2024. Т. 10, № 4. С. 36–48.
14. Bourennane S., Fossati C. Localization of buried objects using reflected wide-band underwater acoustic signals / Ed. by Andrzej Zak // Advances in Underwater Acoustics. 2017. P. 5–21. doi: 10.5772/intechopen.71272.
15. Pensieri S., Bozzano R. Active and passive acoustic methods for In-situ monitoring of the Ocean Status / Ed. by Andrzej Zak // Advances in Underwater Acoustics. 2017. P. 85–102. doi: 10.5772/intechopen.68998.
16. Wang H., Duan R., Yang K. Investigation of Geoaoustic parameters of fine-grained sediment in the South China Sea using sequential inversion // J. of Theor. and Computational Acoust. 2024. Vol. 32, no. 2. Art. 2350022. doi: 10.1142/s2591728523500226.
17. John F., Schmidt S. O., Hellbrück H. Spectral Ultrasonic underwater buried object detection and localization // OCEANS 2022 – Chennai. Chennai, India: IEEE, 2022. P. 1–7. doi: 10.1109/OCEANSChennai45887.2022.9775292.
18. Acoustic propagation in Ocean sediments using Biot Model / S. Shaikh, H. Yiwang, R. Khan, A. A. Siddiqui // 2022 19th Intern. Bhurban Conf. on Appl. Sci. and Technol. (IBCAST). Islamabad, Pakistan: IEEE, 2022. P. 893–898. doi: 10.1109/IBCAST54850.2022.9990095.
19. Underwater acoustic channel modeling under different shallow seabed topography and sediment environment / M. Zhou, H. Zhang, T. Lv, H. Li, D. Xiang, S. Huang // OCEANS 2022 – Chennai. Chennai, India: IEEE, 2022. P. 1–7. doi: 10.1109/OCEANSChennai45887.2022.9775382.
20. Skolnik M. I. Introduction to Radar Systems. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2001. 772 p.

Информация об авторах

Калюта Владимир Игоревич – аспирант кафедры электрогидроакустической и медицинской техники, научный сотрудник. Институт нанотехнологий электроники и приборостроения инженерно-технологическая академия, Южный федеральный университет, ул. Шевченко, д. 2, корп. Е, Таганрог, 347922, Россия.
E-mail: kalyuta@sfedu.ru

Пивнев Петр Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры электрогидроакустической и медицинской техники. Институт нанотехнологий электроники и приборостроения инженерно-технологическая академия, Южный федеральный университет, ул. Шевченко, д. 2, корп. Е, Таганрог, 347922, Россия.
E-mail: pivnevpp@sfedu.ru

Тарасов Сергей Павлович – д-р техн. наук, профессор кафедры электрогидроакустической и медицинской техники. Институт нанотехнологий электроники и приборостроения инженерно-технологическая академия, Южный федеральный университет, ул. Шевченко, д. 2, корп. Е, Таганрог, 347922, Россия.
E-mail: sptarasov@sfedu.ru

References

1. Akustika dna okeana (materialy konf., Specija, Italija, 1980) / pod red. U. Kupermana, F. Ensena. M.: Mir, 1984. 454 c. (In Russ.).
2. Brehovskih L. M., Godin O. A. Akustika neodnorodnyh sred. T. 2: Zvukovye polja v sloistyh i trehmerno-neodnorodnyh sredah. M.: Nauka, 2009. 425 c. (In Russ.).
3. Lun'kov A. A., Shermeneva M. A. Vzaimodejstvie mod na sosredotochennoj neodnorodnosti v melkovodnom akusticheskom volnovode v shirokoj polose chastot // Akust. zhurn. 2022. T. 68, № 5. S. 510–519. (In Russ.).
4. Grigor'ev V. A., Lun'kov A. A. Vzaimodejstvie mod na kile torosa v shirokoj polose chastot // Akust. zhurn. 2023. T. 69, № 4. S. 453–464. (In Russ.).
5. Shumejko A. Je., Jaskevich M. L. Akusticheskoe locirovanie donnyh otlozhenij // Evrazijskij Sojuz uchenyh. 2016. T. 27, № 6–2. S. 81–85. (In Russ.).
6. Legusha F. F., Popov Ju. N. Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya akusticheskogo signala v podvodnom zvukovom kanale // Tr. Krylovskogo gos. nauch. centra. 2021. T. 2, № 396. S. 122–133. (In Russ.).
7. Kolyhalin V. M. Modelirovanie distancionnogo monitoringa tverdyh ostatkov nefteproduktov v rezervuarah // Noise Theory and Practice. 2023. T. 9, № 4. S. 7–24. (In Russ.).
8. Pisarev P. V., Ahunzjanova K. A. Chislennoe issledovanie akusticheskikh processov v model'nyh kanalah dlja razrabotki shirokopolosnyh aviacionnyh zvukopogloshhajushchih konstrukcij na osnove konicheskogo zapolnitelja novogo tipa // Noise Theory and Practice. 2023. T. 9, № 4. S. 67–78. (In Russ.).
9. Popov Ju. N. Primenenie chislennyh metodov pri modelirovanii rasprostraneniya akusticheskikh voln v volnovodah s rezonansnymi poglotiteljami // Tr. Krylovskogo gos. nauch. centra. 2024. T. 4, № 410. S. 193–200. (In Russ.).
10. Metod simuljatsii impul'snoj karakteristiki gorizontal'no-sloistogo gidroakusticheskogo volnovoda s zhidkim dnom / V. A. Lisjutin, O. R. Lastovenko, V. V. Dovgalenko, V. L. Luchin, N. V. Petrenko // Inzhenernyj vestn. Dona. 2020. № 1(61). S. 1–11.
11. Vagin A. V., Vorotynceva A. S. Gidroakusticheskoe ustrojstvo profilirovanija donnogo grunta s sintezirovannoj aperturoj // Izv. vuzov Rossii. Radioelektronika. 2023. T. 26, № 1. S. 78–86. (In Russ.).
12. Voloshhenko E. V. Perspektivy primenenija dlja izmerenija harakteristik morskogo volnenija gidroakusticheskikh sistem s ispol'zovaniem rezhima parametricheskogo izluchenija // Nauch. priborostroenie. 2024. T. 34, № 3. S. 37–53. (In Russ.).
13. Zaslavskij Ju. M., Zaslavskij V. Ju. K analizu akusticheskogo polja pri rassejanii na periodicheski nerovnoj granice razdela // Noise Theory and Practice. 2024. T. 10, № 4. S. 36–48. (In Russ.).
14. Bourennane S., Fossati C. Localization of buried objects using reflected wide-band underwater acoustic signals / Ed. by Andrzej Zak // Advances in Underwater Acoustics. 2017. P. 5–21. doi: 10.5772/intechopen.71272.
15. Pensieri S., Bozzano R. Active and passive acoustic methods for In-situ Monitoring of the ocean status / Ed. by Andrzej Zak // Advances in Underwater Acoustics. 2017. P. 85–102. doi: 10.5772/intechopen.68998.
16. Wang H., Duan R., Yang K. Investigation of geoacoustic parameters of fine-grained sediment in the South China Sea using sequential inversion // J. of Theor. and Computational Acoust. 2024. Vol. 32, no. 2. Art. 2350022. doi: 10.1142/s2591728523500226.
17. John F., Schmidt S. O., Hellbrück H. Spectral ultrasonic underwater buried object detection and localization // OCEANS 2022 – Chennai. Chennai, India: IEEE, 2022. P. 1–7. doi: 10.1109/OCEANSCennai45887.2022.9775292.
18. Acoustic propagation in Ocean sediments using Biot Model / S. Shaikh, H. Yiwang, R. Khan, A. A. Siddiqui // 2022 19th Intern. Bhurban Conf. on Appl. Sci. and Technol. (IBCAST). Islamabad, Pakistan: IEEE, 2022. P. 893–898. doi: 10.1109/IBCAST54850.2022.9990095.
19. Underwater acoustic channel modeling under different shallow seabed topography and sediment environment / M. Zhou, H. Zhang, T. Lv, H. Li, D. Xiang,

S. Huang // OCEANS 2022 – Chennai. Chennai, India: IEEE, 2022. P. 1–7. doi: 10.1109/OCEANSSChennai45887.2022.9775382.

20. Skolnik M. I. Introduction to Radar Systems. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2001. 772 p.

Information about the authors

Vladimir I. Kalyuta – postgraduate student of the Department of Electrohydroacoustic and Medical Equipment, researcher. Institute of Nanotechnology Electronics and Instrumentation Engineering and Technology Academy Southern Federal University. Shevchenko St., 2, bldg. E, Taganrog, 347922, Russia.
E-mail: kalyuta@sfedu.ru

Petr P. Pivnev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrohydroacoustic and Medical Equipment. Institute of Nanotechnology Electronics and Instrumentation Engineering and Technology Academy Southern Federal University. Shevchenko St., 2, bldg. E, Taganrog, 347922, Russia.
E-mail: pivnevpp@sfedu.ru

Sergey P. Tarasov – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electrohydroacoustic and Medical Equipment. Institute of Nanotechnology Electronics and Instrumentation Engineering and Technology Academy Southern Federal University. Shevchenko St., 2, bldg. E, Taganrog, 347922, Russia.
E-mail: sptarasov@sfedu.ru

Статья поступила в редакцию 17.04.2025; принята к публикации после рецензирования 02.06.2025; опубликована онлайн 29.09.2024.

Submitted 17.04.2025; accepted 02.06.2025; published online 29.09.2024.
