

Потенциальная точность оценки направленности излучения протяженного источника с использованием векторно-скалярной антенны

Г. М. Глебова¹, Г. Н. Кузнецов^{2*}

¹Южный федеральный университет, Россия, 344006,
Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38
(Статья поступила 07.11.2019; Подписана в печать 08.11.2019)

Исследуется потенциальная точность оценки направленности излучения протяженным источником, акустическая модель которого представляется совокупностью распределенных вдоль апертуры и одновременно излучающих элементарных источников монопольного типа. Задаются исходное распределение звуковой энергии вдоль апертуры и корреляционные характеристики источников. Предполагается, что протяженный источник движется параллельно векторно-скалярной антенне (ВСА), которая регистрирует интерференционное поле на фоне шумов моря. Расчет погрешности оценки параметров выполняется с использованием скалярных, векторно-скалярных и потоковых компонент. Показано, что в мелком или глубоком море суперпозиция малошумных источников, параметры которых были вычислены при решении обратной задачи в волноводе, достаточно точно формирует поле, эквивалентное полю от протяженного многоэлементного источника с заданными параметрами, но наименьшие погрешности получены при использовании векторно-скалярной или потоковой обработки.

PACS: 43.30.+m

УДК: 534.34; 534.231.1

Ключевые слова: векторно-скалярная многоэлементная антенна, многокомпонентный протяженный источник, решение обратной задачи, минимизация функционала.

ВВЕДЕНИЕ

Исследуется потенциальная точность оценки направленности излучения протяженного источника, линейный размер которого намного превышает длину волны. Измерения выполняются с использованием приемных линейных ВСА и скалярной антенны (СА). Для решения поставленной задачи модель излучающего протяженного источника представляется в виде источников монопольного типа, эквидистантно распределенных вдоль виртуальной апертуры. Возможность использования группы разнесенных в пространстве эквивалентных точечных источников для замены протяженного объемного источника обоснована в [1–6]. Эта модель, по нашему мнению, должна «хорошо работать» при условии, что источник имеет осесимметричную характеристику направленности. Адекватность модели с использованием эквивалентных монопольных источников подтверждена в [1–4], где исследования выполнены при использовании скалярных приемников (СП). В [5, 6] решение данной задачи анализируется в основном с приемом сигналов одиночными векторно-скалярными приемниками и только в мелком море. Показано, что измерение не только скалярных, но и векторных компонент акустического поля повышает точность оценки элементарных источников и позволяет восстановить направленность излучения протяженного источника с большей точностью. В данной ра-

боте в развитие [5, 6] решается задача при существенно более сложной модели протяженного источника, что потребовало для статистического переопределения применения многоэлементной векторно-скалярной антенны. Кроме того, в статье и для мелкого, и для глубокого моря выполняется сравнение точностей оценки параметров модели излучающего объекта для трех вариантов: измеряются только скалярные компоненты поля, измеряются векторно-скалярные компоненты и в третьем варианте для решения обратной задачи используются ортогональные потоковые компоненты, соответствующие трехмерному потоку акустической мощности векторно-скалярного поля. Показано, что использование векторно-скалярных полей как в мелком, так и в глубоком море заметно повышает точность оценки искомых параметров эквивалентной модели, но в третьем варианте точность оценки искомых параметров наивысшая.

1. МОДЕЛЬ СИГНАЛОВ, ИЗЛУЧЕННЫХ ПРОТЯЖЕННЫМ МНОГОКОМПОНЕНТНЫМ ИСТОЧНИКОМ И ПРИНЯТЫХ СКАЛЯРНОЙ И ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОЙ АНТЕННАМИ

Будем считать, что адекватной моделью протяженного шумящего объекта является линейная излучающая антенна с источниками монопольного типа, которые расположены вдоль оси с шагом не менее, чем $\lambda/2$, где λ — длина волны, соответствующая частоте, на которой выполняется измерение направленности излучения шумящего источника. Число источников в антенне задается не менее, чем $Q = 2L/\lambda$, где L — горизонтальная протяженность излучающего объекта. Пред-

*E-mail: skbmortex@mail.ru

положим, что реальные и мнимые части комплексных амплитуд каждого из элементарных источников a_n , а также помехи имеют нормальное распределение плотности вероятности, среднее значение которых равно нулю, а дисперсии соответствуют мощностям элементарных источников. В рамках такой эквивалентной модели матрица ковариаций элементарных источников с комплексными амплитудами a_q полностью характеризует излучающий объект.

$$A_{nq} = \langle a_n \cdot a_q^* \rangle, \quad n, q = 1, \dots, Q. \quad (1)$$

Здесь $\langle \cdot \rangle$ означает математическое ожидание, диагональные элементы матрицы A_{qq} соответствуют мощностям элементарных источников, а недиагональные элементы матрицы A_{nq} ($n \neq q$) характеризуют комплексные взаимно-корреляционные связи между элементарными источниками. Взаимные мощности обозначены $|A_{nq}|$ и относительные сдвиги фаз ξ_{nq} , где:

$$\xi_{nq} = \arctan[\text{Im}(A_{nq})/\text{Re}(A_{nq})].$$

Число действительных параметров A_{nq} , однозначно определяющих модель излучателя, равно Q^2 .

Теоретические значения элементов матрицы ковариаций, измеренные ВСА и соответствующие сигналам от протяженного источника, имеют вид:

$$K_{lm}(s) = \sum_{nq} A_{nq} \varphi_{ln} \varphi_{mq}, \quad l, m = 1, \dots, 4M, \quad (2)$$

$$n, q = 1, \dots, Q.$$

Здесь обозначено $\varphi_{ln} = -j\omega\rho\varphi_{ln}$ — для скалярных приемников, $\varphi_{ln} = \partial\varphi_{ln}/\partial r$ — для векторных приемников, φ_{ln} — потенциал скоростей для источников единичной мощности; пара индексов l и m соответствует приемным элементам антенны, а пара индексов n и q соответствует элементарным источникам излучающего объекта. Экспериментально измеренная матрица ковариаций представляет собой сумму сигнальной матрицы $\mathbf{K}(s)$ и матрицы помех $\mathbf{K}(n)$. Это справедливо при любом из трех способов формирования матрицы ковариаций сигналов, принимаемых векторно-скалярной антенной:

$$\hat{\mathbf{K}} = \mathbf{K}(s) + \mathbf{K}(n). \quad (3)$$

Сравнение погрешности оценки параметров излучающего объекта при работе с векторно-скалярным полем выполняется с использованием информационной матрицы Фишера J , определяющей потенциальные возможности приемной системы:

$$J_{ij} = \text{Tr} \left(K^{-1} \frac{\partial K}{\partial \theta_i} K^{-1} \frac{\partial K}{\partial \theta_j} \right). \quad (4)$$

Поскольку число неизвестных параметров, равное Q^2 , может быть велико, то при выполнении сравнительного анализа различных вариантов удобно характеризовать качество оценки неизвестных параметров протяженного источника средней дисперсией:

$$\sigma^2(\theta) = \frac{1}{Q^2} \sum_{i,j=1}^Q \sigma^2(\theta_{ij}). \quad (5)$$

При движении источника общее время наблюдения разбивается на τ реализаций — временных интервалов, внутри каждого из которых процесс можно считать квазистационарным, а измеренные матрицы ковариаций независимыми. При некогерентном накоплении информации по времени информация накапливается, т.е. $J = \sum J_t$, где J_t — информационная матрица вида (4), рассчитанная при нахождении источника на траектории движения в t -момент времени.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование сигналов производится при излучении на частоте $f = 50$ Гц. Число четырехкомпонентных векторно-скалярных модулей в линейной антенне $M = 5$, расстояние между модулями $d = 25$ м. Сравнение выполняется с результатами расчетов сигналов, принятых СА, с числом СП 20 и межэлементными расстояниями 5.26 м. Апертуры обеих антенн равны 100 м. Передаточная функция волновода (ПФВ) рассчитывалась по модели нормальных волн [7]. Глубина мелководного волновода полагалась равной 200 м, глубоководного — 160 м. Скорость звука в воде равна 1468 м/с, в жидком полупространстве — 1690 м/с, плотность среды в полупространстве — 1.5.

Протяженный источник аппроксимируется 7 монополями, отстоящими друг от друга на расстоянии 15 м. Мощности элементарных источников заданы различными: 1, 1, 2, 4, 5, 3, 2. Предполагается, что коррелированы только соседние элементарные источники — попарно. Коэффициенты корреляции равны 0.5. Суммарные сигналы от протяженного источника когерентны вдоль апертуры приемной антенны и не когерентны по реализациям — при перемещении источника вдоль заданной траектории. Отношение сигнал/помеха на входе СП, находящегося в центре СА, при расположении источника на траверсе относительно этого приемника изменяется в пределах от 0.01 до 1.0. Мощность шума в каждой точке приема (на скалярных и векторных приемниках) рассчитывалась при суммировании сигналов от всех элементарных источников, образующих протяженную излучающую антенну. Источник движется на глубине 50 м по прямолинейной траектории на горизонтальном расстоянии 100 м от антенны. Длина трассы движения симметрична относительно центра антенны и равна 1500 м.

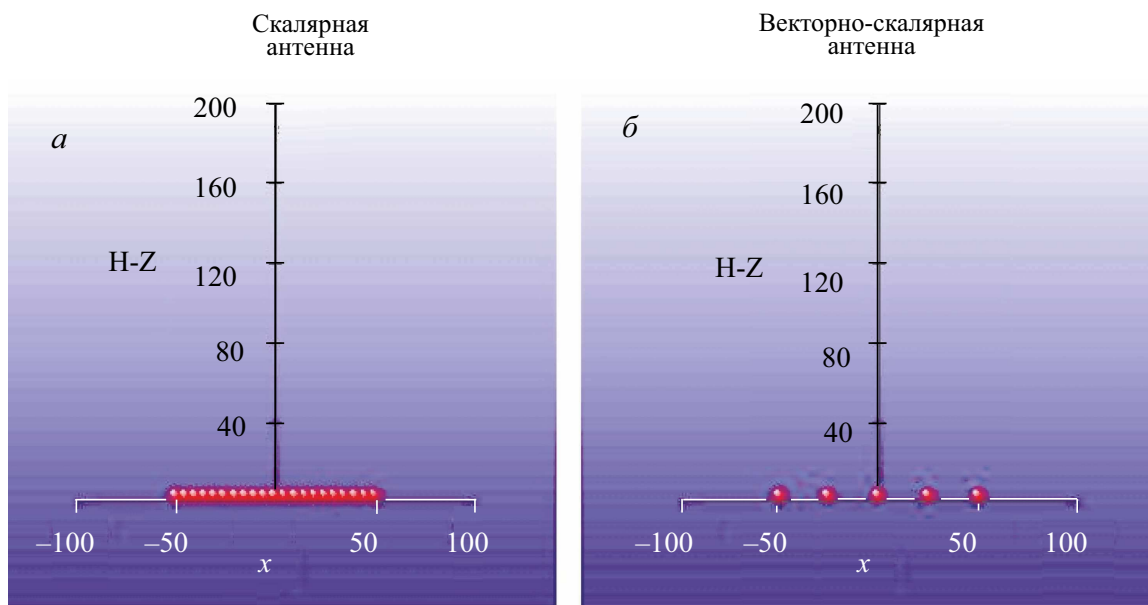


Рис. 1: Положение скалярной (а) и векторно-скалярной (б) антенны при горизонтальной постановке в мелком море ($Z_i = 197$ м)

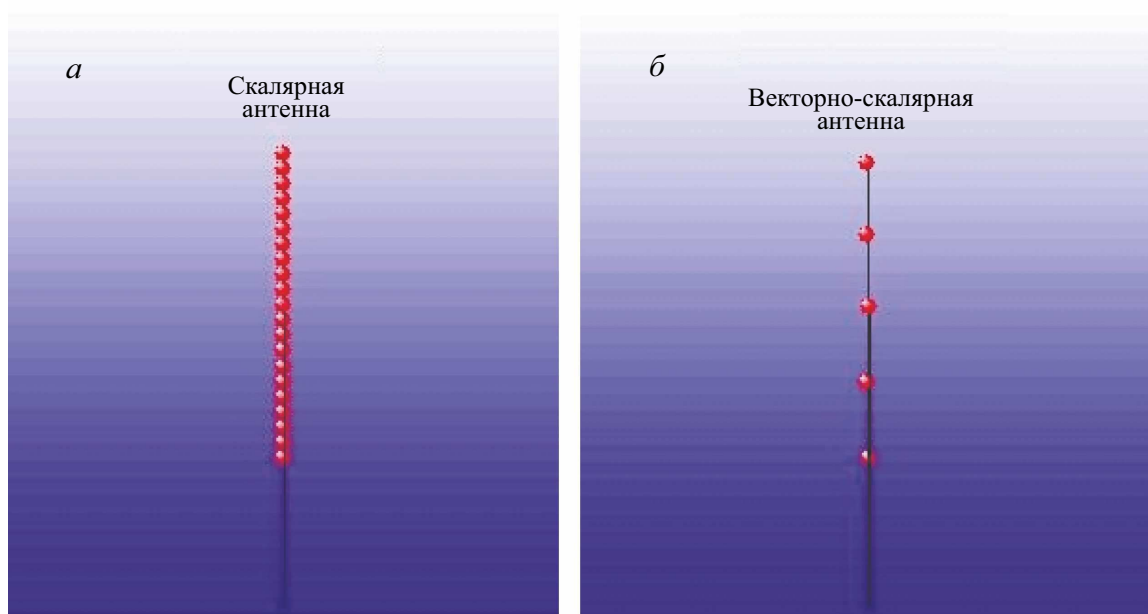


Рис. 2: Положение скалярной (а) и векторно-скалярной (б) антенны при вертикальной постановке ($X_i, Y_i = 0$)

Рассматривается три варианта постановки антенн. В мелком море (глубина 200 м) антенна устанавливается горизонтально (вблизи дна на глубине 197 м) или вертикально в середине волновода (рис. 1). При вертикальной постановке центр антенны находится на глубине 100 м — как в мелком, так и в глубоком море (рис. 2).

Анализ результатов показывает, что при любой постановке приемной антенны обработка сигналов с использованием потоковой компоненты поля обеспечи-

вает наилучшую точность оценки параметров протяженного источника. Из рассмотренных вариантов наименьшая ошибка получена при работе с горизонтальной антенной, установленной в мелком море. Но для реализации такой обработки необходима информация о передаточной функции и, соответственно — о параметрах модели грунта в районе измерений. Ошибки при работе вертикальной векторно-скалярной антенны в глубоком море также не велики. Но при таком решении рассматриваемой задачи не требуется выпол-

Таблица I: Средние значения среднеквадратической ошибки оценки параметров источников при различных способах обработки

Сигнал/помеха	$H = 200$ м						$H = 1600$ м		
	$Z_i = 197$ м			$X_i, Y_i = 0$			$X_i, Y_i = 0$		
	P	PV	W	P	PV	W	P	PV	W
1	56.9	0.72	0.34	22.1	1.22	0.38	552	2.22	0.65
0.1	396	2.77	0.65	127	7.26	1.08	-	12.5	2.08
0.05	740	4.68	0.98	226	13.3	1.94	-	22.6	3.53
0.01	3365	18.9	3.21	985	59.5	6.22	-	97.9	11.5

нения большого объема работ, связанных с акустической калибровкой волновода [7]. Причина в том, что в глубоком море при небольших расстояниях между источником и приемной антенной основная информация о структуре сигнала от протяженного источника содержится в прямом и отраженном от поверхности сигналах. Отраженные от дна сигналы, во-первых, проходят расстояние в несколько раз большее, чем прямой луч, а во-вторых, угол падения лучей на поверхность дна велик, что существенно уменьшает их коэффициент отражения [7].

В табл. I приводятся оценки параметров излучающего объекта, полученные при различном расположении антенны в волноводе глубиной H , для усредненных значений среднеквадратической ошибки (5) при работе со скалярной и векторно-скалярной антенной (в таблице обозначено как P и PV) и по результатам измерений и расчетов проекций потока мощности (обозначено как W).

Анализ табл. I и других аналогичных результатов показывает, что при любом варианте постановки приемной антенны как в мелком, так и в глубоком море обработка сигналов с использованием векторно-скалярного поля или проекций вектора потока мощности дает наименьшие погрешности оценок параметров модели. Установлено также, что из рассмотренных трех вариантов наименьшие ошибки получены при использовании горизонтальной антенны, установленной в мелком море. Данный результат объясняется возможностью одновременного приема мод высоких и низких номеров, дающих в мелком море более полную картину о распределении поля по азимуту и в горизонтальной плоскости. При использовании лучевой модели данный результат можно объяснить тем, что горизонтальная антенна при движении источника способна одновременно наблюдать сигналы, пришедшие с различных горизонтальных и вертикальных направлений. Следует однако отметить, что результаты полученные в мелком море используют адекватную модель передаточной функции волновода, построенную с учетом акустической модели грунта. Это возможно при работе в волноводе, в котором выполнена акустическая калибровка, т.е. построена модель дна.

Ошибки при работе ВСА, установленной вертикально в глубоком море, также не велики. Но такая схема

постановки и измерений имеет некоторые преимущества, так как не требуется выполнять сложные и трудоемкие работы, связанные с акустической калибровкой волновода. В глубоком море при работе в ближней зоне основная информация об угловой структуре сигнала от протяженного источника содержится в прямом и отраженном от поверхности сигналах. Сигналы, отраженные от дна можно не учитывать, так как, во-первых, они проходят расстояние в несколько раз большее, чем прямой луч, а во-вторых, при работе на малых расстояниях (до 1 км) углы падения лучей на донную поверхность велики, что существенно уменьшает их коэффициент отражения сигналов [7].

На рис. 3–5 в качестве примера приведены результаты оценки ХН протяженного источника, имеющего вышеуказанные параметры, при его расположении в мелком и глубоком море, при использовании горизонтальных и вертикальных антенн и различных отношениях сигнал/помеха (см. табл. I). Представлены результаты обработки сигналов, принятых ВСА с использованием скалярных и векторных составляющих (PV — прием). При расчетах задано, что в каждой паре разность фаз между соседними приемниками $\xi_{nq} = 185^\circ$. Расчеты показали, что при задании такого сдвига фаз между парами соседних источников в диаграмме направленности естественно формируются два практических равных по мощности дипольных лепестка, которые направлены в «нос и корму» источника.

На рис. 3 и 4 приведены характеристики направленности декартовой и полярной системы координат, а также распределение акустической мощности вдоль апертуры горизонтальной антенны. Синим цветом обозначены истинные характеристики, красным — рассчитанные. Видно, что даже при отношении сигнал/помеха 0.05 оценки параметров источника производятся достаточно точно, но уже при сигнал/помеха 0.01 дисперсия превышает величину 10 и оценки производятся с большой погрешностью.

На рис. 5 аналогичные данные при обработке по потоку мощности для вертикальной антенны, установленной в глубоком море. При расчетах учитывается модель с двухлучевым распространением, при котором информативность сигнального поля — минимальна; сигнал/помеха = 0.01. Видно, что и в этом случае оценки производятся достаточно точно.

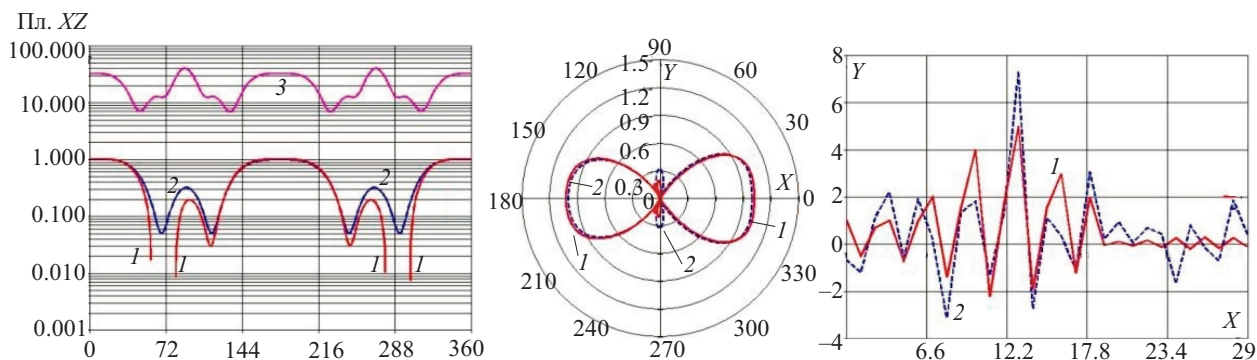


Рис. 3: Характеристики направленности и распределения рассчитанных параметров при отношении сигнал/помеха 0.05 и дисперсии $\sigma = 4.68$ (PV — прием)

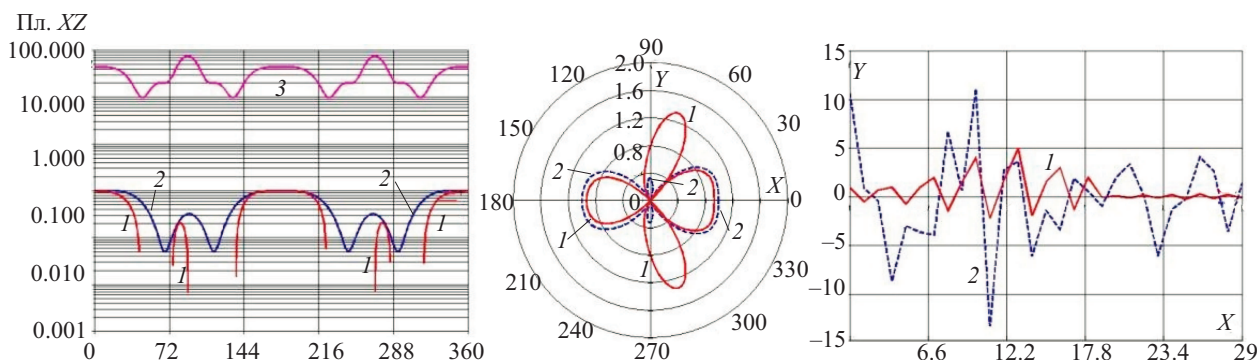


Рис. 4: Характеристики направленности и распределения рассчитанных параметров при отношении сигнал/помеха 0.01 и дисперсии $\sigma = 18.9$ (PV — прием)

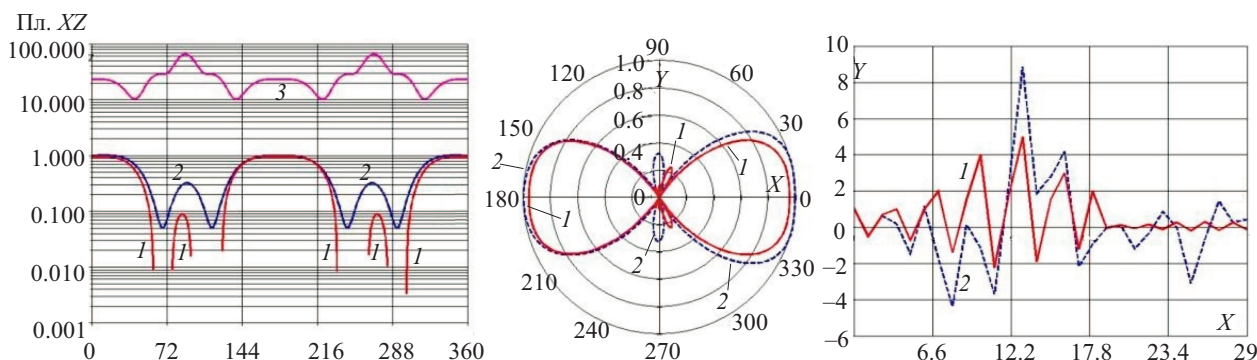


Рис. 5: Характеристики направленности и распределения рассчитанных параметров при отношении сигнал/помеха 0.01 и дисперсии $\sigma = 11.5$ (W — прием)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты показывают преимущество использования векторно-скалярной антенны и, в частности, потоковой компоненты акустического поля при оценке направленности излучения протяженным источником, а также возможность решения данной задачи как в мелком, так и в глубоком море, что существенно расширяет возможности экспериментов и упрощает измерительные схемы. Оценки направленности излучения и заданных параметров

протяженного источника (мощности локальных источников и их взаимно ковариационные связи) выполняется достаточно точно при значении усредненной ошибки вплоть до дисперсии $\sigma \approx 10$. Установлено, что даже в глубоком море и при использовании двухлучевой модели вертикальная ВСА обеспечивает достаточно точное восстановление направленности излучения протяженного источника.

Следует, однако, отметить, что при использовании модели с линейным расположением излучателей монопольного типа характеристика направленности (XН)

эквивалентного протяженного источника будет обладать цилиндрической симметрией, что не в полной мере соответствует ХН реальных объектов. Очевидно, что для учета асимметрии в горизонтальной и вертикальной плоскостях необходимо учитывать в каче-

стве источников диполи и квадруполь [8, 9]. Второй вариант — монополюсные источники должны быть распределены по заданному объему, но в первом приближении такую модель использовать можно и она многократно применялась.

-
- [1] Вдовичева Н. К., Турчин В. И., Фикс И. Ш. // Акуст. журн. 1998. **44**, № 6. С. 757.
[2] Вдовичева Н. К., Турчин В. И., Фикс И. Ш. // Акуст. журн. 1999. **45**, № 6. С. 767.
[3] Белогорцев А. С., Шаркина Е. В. // Акуст. журн. 1994. **404**, № 3. С. 435.
[4] Кравцов Ю. А., Кузькин В. М. // Акуст. журн. 1985. **31**, № 2. С. 207.
[5] Glebova G. M., Kuznetsov G. N. In: The Formation of Acoustical Fields in Oceanic Waveguides. Reconstruction of Inhomogeneities in Shallow Water. Nizhny Novgorod: Inst. Appl. Phys., 1998. **1**. P. 109.
[6] Glebova G. M., Kuznetsov G. N. // Phys. Vibr. 2001. **9**, N 2. P. 115.
[7] Бреховских Л. М., Лысанов Ю. Р. Теоретические основы акустики океана. Берлин: Шпрингер, 1982.
[8] Быковцев Г. И., Кузнецов Г. Н., Степанов А. Н. // ДАН СССР. 1985. **280**, № 1. С. 57.
[9] Кузнецов Г. Н., Степанов А. Н. // Акуст. журн. 2007. **53**, № 3. С. 377.

The potential accuracy of the estimation of an orientation of radiation of extended source using the vector-scalar antenna

G.M. Glebova¹, G.N. Kuznetsov^{2,a}

¹*Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russia*

²*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
Moscow, 119991, Russia*

E-mail: ^askbmortex@mail.ru

Investigates the potential accuracy of estimation of orientation of radiation from an extended source, the acoustic model of which is represented by a set of distributed along the aperture and simultaneously radiating elementary sources mono-dipole type. The initial distribution of sound energy along the aperture and the correlation characteristics of the sources are given. It is assumed that the extended source moves parallel to the vector-scalar antenna (VSA), which registers the interference field against the background of sea noise. The calculation of the estimation error of parameters is performed using scalar, vector-scalar and stream components. It is shown that in shallow or deep sea the superposition of low-noise sources, whose parameters were calculated when solving the inverse problem in the wave-water, accurately forms a field equivalent to the field from an extended multi-element source with specified parameters, but the smallest errors are obtained when using vector-scalar or stream processing.

PACS: 43.60.-c

Keywords: vector-scalar multi-element antenna, multi-component extended source, solution of the inverse problem, functional of minimization.

Received 7 November 2019.

Сведения об авторах

1. Глебова Галина Михайловна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник.
 2. Кузнецов Геннадий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, профессор, начальник СКБ «Морские технологии»; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: skbmortex@mail.ru.
-