

Оценка координат шумового источника в мелком море векторно–скалярной горизонтальной линейной антенной

Г.Н. Кузнецов* А.А. Луньков†

Научный центр волновых исследований Института общей физики
имени А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38

(Статья поступила 13.11.2014; Подписана в печать)

Выполняется моделирование алгоритма обнаружения и оценки глубины и дальности в пассивном режиме широкополосного источника шума с использованием согласованной фильтрации по методу Бартлетта. Сравниваются характеристики откликов векторно–скалярной и скалярной протяженных линейных антенн. Показано, что полученные оценки координат устойчивы к умеренным неточностям задания параметров волновода и небольшим динамическим возмущениям в водной среде. Установлено, что векторно–скалярная антенна обладает помехоустойчивостью на 5–10 дБ большей, чем скалярная антенна с той же апертурой.

PACS: 43.30.Wi

УДК: 534.231

Ключевые слова: акустика мелкого моря, обнаружение и оценка координат широкополосного источника, пассивный режим.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка координат шумового источника и его приведенной шумности необходима для классификации подводных и надводных целей и является одной из основных нерешенных проблем в гидроакустике [1]. В качестве базового алгоритма для её решения рекомендуется использовать согласованную с передаточной функцией волновода обработку (Matched Field Processing — MFP) сигналов, регистрируемых приёмной системой [2]. Согласование может проводиться как для всего модового спектра, так и для отдельных энергонесущих волноводных мод, формирующих звуковое поле. Среди наиболее распространённых методов MFP можно выделить метод Бартлетта [3], метод Кейпона [4] и метод MUSIC [5]. Как было показано ранее для тональных сигналов и вертикальных скалярных антенн [6], несмотря на небольшую разрешающую способность, первый метод обладает наибольшей устойчивостью к неточностям в выборе параметров волновода по сравнению с остальными методами.

Целью настоящей работы является сопоставление эффективности оценки пеленга, дальности и глубины по методу Бартлетта с помощью скалярных (СА) и векторно–скалярных (ВСА) линейных горизонтальных антенн, работающих в широком диапазоне частот (40–300 Гц), при различных отношениях сигнал/помеха. Исследуется также устойчивость указанного алгоритма локализации источника при неточности задания параметров морского дна, глубины волновода и при влиянии динамических эффектов — внутренних волн и поверхностного волнения.

Изучение поставленных вопросов проводится в рамках численных экспериментов. Расчёты звуковых по-

лей и передаточной функции волновода выполняются с использованием теории нормальных волн (мод).

1. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Схема модельной задачи показана на рис. 1. Расчёт звуковых полей осуществляется в цилиндрической системе координат (r, ϕ, z) , в качестве вспомогательной используется декартова система (x, y, z) . Шумовой источник расположен в точке $\mathbf{r}_s = (r_s, \phi_s, z_s)$. Приёмная горизонтальная линейная антенна буксируется или установлена стационарно вдоль оси Y на глубине Z_a . В случае векторно–скалярной антенны каждый её элемент помимо звукового давления P регистрирует две или три компоненты вектора колебательной скорости V_x, V_y, V_z .

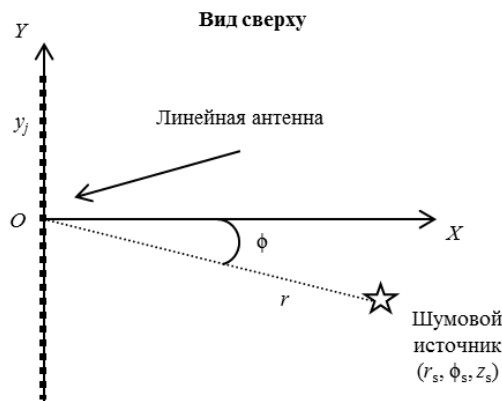


Рис. 1: Схема размещения приемной антенны и источника (вид сверху)

Представим в отсутствие фоновых помех вектор принимаемых от шумового источника сигналов на частоте ω_k в виде

*E-mail: skbmortex@mail.ru

†E-mail: landr2004@mail.ru

$$\mathbf{U}(\omega_k; \mathbf{r}_s) = [p_1, \dots, p_J, \rho c V_{x1}, \dots, \rho c V_{xJ}, \rho c V_{y1}, \dots, \rho c V_{yJ}, \rho c V_{z1}, \dots, \rho c V_{zJ}],$$

где ρ — плотность воды, c — скорость звука в воде, J — общее число приёмных модулей. Использование множителя ρc необходимо для соблюдения одинаковой размерности (Па) для всех элементов вектора.

Регистрируемый антенной сигнал удобно представить в виде матрицы ковариаций $\mathbf{K}_s = \mathbf{U}_j(\omega_k; \mathbf{r}_s) \mathbf{U}_j^*(\omega_k; \mathbf{r}_s)$, где звёздочка «*» означает комплексное сопряжение. При наличии фоновых помех матрица ковариаций может быть записана как [7]

$$\mathbf{K}_{SN} = S\mathbf{K}_S + N\mathbf{K}_N,$$

где S/N — отношение сигнал/помеха на одиночном приёмнике давления, \mathbf{K}_N — матрица ковариаций аддитивного шума. Если не учитывать пространственную корреляцию поля помех на векторных элементах антенны, то матрица \mathbf{K}_N является диагональной

$$\mathbf{K}_N = \begin{cases} 1, j = 1..J \\ \gamma, j = (J+1)..4J \end{cases}$$

В зависимости от характера помех параметр γ может принимать приближенное значения 0,25 (поверхностные шумы) или 0,33 (сферически изотропные) и др. В настоящей работе рассматривается только первый тип помех, сформированных взволнованной поверхностью.

В общем случае задача оценки координат шумящего объекта является трёхмерной и при полном переборе координат может потребовать больших вычислительных затрат. Для упрощения решения этой задачи на первом этапе обработки определим направление на источник ϕ_s за счёт сканирования диаграммой направленности в горизонтальной плоскости. На втором этапе вдоль этого направления решается двумерная задача и оценивается дальность и глубина [8]. При использовании линейной антенны положение приемников задаётся координатами $(0, y_j, z_a)$ (см. рис. 1), и пеленг оценивается как положение максимума следующей величины

$$B(\phi) = \sum_k \left| \tilde{\mathbf{W}}(\omega_k, \phi) \mathbf{K}_{SN} \tilde{\mathbf{W}}^*(\omega_k, \phi) \right|.$$

Суммирование по частотам некогерентное, так как акустический источник является шумовым. Сканирующий вектор $\tilde{\mathbf{W}}(\omega_k, \phi)$ имеет вид

$$\tilde{\mathbf{W}}(\omega_k, \phi) = [\exp(i\omega_k y_1 \sin(\phi)/c), \dots, \exp(i\omega_k y_J \sin(\phi)/c); \cos(\phi) \exp(i\omega_k y_1 \sin(\phi)/c), \dots, \cos(\phi) \exp(i\omega_k y_J \sin(\phi)/c); \sin(\phi) \exp(i\omega_k y_1 \sin(\phi)/c), \dots, \sin(\phi) \exp(i\omega_k y_J \sin(\phi)/c); \exp(i\omega_k y_1 \sin(\phi)/c), \dots, \exp(i\omega_k y_J \sin(\phi)/c)].$$

Для оценки дальности r_s и глубины z_s источника шума после оценки пеленга ϕ_s используется метод Бартлетта, обобщённый на широкополосный случай. Согласно этому методу координаты источника соответствуют максимуму распределения

$$P(r, z) = \sum_k |\mathbf{W}(r, \phi_s, z, \omega_k) \mathbf{K}_{SN} \mathbf{W}^*(r, \phi_s, z, \omega_k)|,$$

где $\mathbf{W}(r, \phi_s, z, \omega_k)$ — сканирующий вектор в плоскости (r, z) по пеленгу ϕ_s :

$$\mathbf{W}(r, \phi_s, z, \omega_k) = [p_1(r, \phi_s, z, \omega_k), \dots, p_J(r, \phi_s, z, \omega_k); \rho c V_{x1}(r, \phi_s, z, \omega_k), \dots, \rho c V_{xJ}(r, \phi_s, z, \omega_k); \rho c V_{y1}(r, \phi_s, z, \omega_k), \dots, \rho c V_{yJ}(r, \phi_s, z, \omega_k); \rho c V_{z1}(r, \phi_s, z, \omega_k), \dots, \rho c V_{zJ}(r, \phi_s, z, \omega_k)].$$

Расчет компонент сканирующего вектора выполним с использованием модового представления звукового давления и проекций колебательной скорости:

$$p_j = \sqrt{\rho c W} \sum_m C_m(r_j) \psi_m(z) \exp(i\xi_m r_j) / \sqrt{\xi_m r_j},$$

$$\rho c V_{xj} = \sqrt{\rho c W} \frac{\cos(\phi_s)}{k} \sum_m C_m(r_j) \psi_m(z) \xi_m \times \exp(i\xi_m r_j) / \sqrt{\xi_m r_j},$$

$$\rho c V_{yj} = \sqrt{\rho c W} \frac{\sin(\phi_s)}{k} \sum_m C_m(r_j) \psi_m(z) \xi_m \times \exp(i\xi_m r_j) / \sqrt{\xi_m r_j},$$

$$\rho c V_{zj} = \sqrt{\rho c W} \frac{\exp(-i\pi/2)}{k} \sum_m C_m(r_j) \frac{d\psi_m(z)}{dz} \times \exp(i\xi_m r_j) / \sqrt{\xi_m r_j}.$$

Здесь W — акустическая мощность источника звука, ψ_m и ξ_m — собственные функции и собственные значения задачи Штурма–Лиувилля [9], C_m — модальные коэффициенты возбуждения, которые в общем случае определяются из системы дифференциальных уравнений для взаимодействующих мод, $k = \omega_k/c$ — волновое число, $r_j = \sqrt{y_j^2 + r^2} - 2y_j r \sin(\phi_s)$ — расстояние от точки с горизонтальными координатами (r, ϕ_s) до j -го приёмника на антенне. Вычисление модельного звукового поля, генерируемого источником шума, осуществляется по аналогичным формулам.

Анализ устойчивости алгоритма поиска координат выполняется для матриц ковариаций \mathbf{K}_{SN} , отвечающих разным наборам параметров среды, но при фиксированных сканирующих векторах $\tilde{\mathbf{W}}(\omega_k, \phi)$

и $\mathbf{W}(r, \phi_s, z, \omega_k)$, рассчитанных для невозмущённого волновода.

Для количественной оценки точности определения координат источника с помощью метода Бартлетта вычисляется следующая величина — аналог показателя обнаружения [10]:

$$T = \frac{P(r_s, z_s)}{\bar{P} + 3\sigma_P}.$$

Здесь \bar{P} и σ_P — соответственно, среднее и среднеквадратичное значение P в анализируемом диапазоне расстояний и глубин. Если T превышает 1, то, пользуясь правилом трёх сигм для произвольной функции распределения, получим, что с не менее чем 90%-й вероятностью координаты объекта определены корректно.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование проводится для мелководного волновода, типичного для Баренцева моря и имеющего постоянную глубину. Средняя невозмущённая глубина волновода принимается равной $H = 200$ м. Характерные для зимних и летних условий профили скорости звука в водном слое $c(z)$ изображены на рис. 2. Дно рассматривается как однородное жидкое поглощающее полупространство со следующими параметрами: скорость звука $c_1 = 1800$ м/с, плотность $\rho_1 = 1800$ кг/м³, коэффициент поглощения звука в дне, отнесённый к длине волны, $\beta_\lambda = 0,33$ дБ/λ.

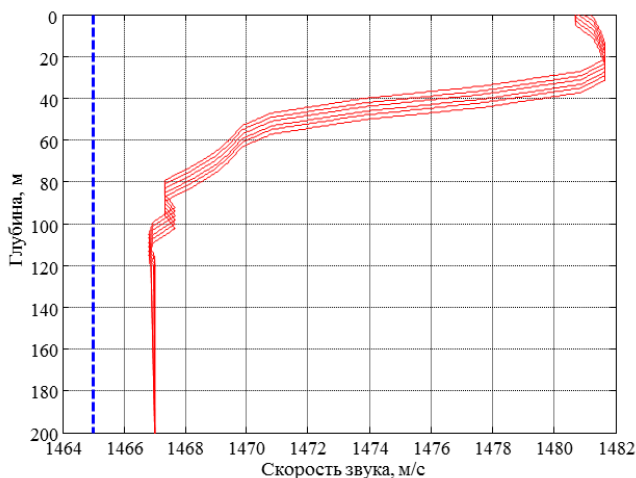


Рис. 2: Профили вертикального распределения скорости звука в водном слое для зимних (синяя пунктирная линия) и летних условий (красные сплошные линии)

Задача оценки координат решается для шумового источника с размерами продольного сечения 12×1 м², находящегося на расстоянии $r_s = 5$ км от приёмной

системы и глубине $z_s = 80$ м. Расчеты выполнены при условии, что объект ориентирован вдоль направления на приёмную антенну. Эта ситуация соответствует наименьшей помехоустойчивости обнаружения, но представляет наибольший практический интерес в связи с вероятной угрозой носителю приемной антенны от быстро движущейся цели. Модель шумового поля объекта формируется как суперпозиция некоррелированных случайных источников, распределенных по длине объекта и образующих двумерную матрицу 12×2 . Каждый из источников излучает белый шум в полосе $f = 40\text{--}300$ Гц (в случае, когда спектральная плотность неравномерно распределена по частотам, можно осуществить «отбеливание» спектра [1]). Шум регистрируется в течение 1 с (т. е. шаг по частоте равняется 1 Гц) линейной антенной, расположенной на глубине $z_a = 100$ м. Антенна состоит из $J = 48$ векторно-скалярных модулей и имеет общую длину 120 м. Отношение сигнал/помеха (S/N) в полосе 1 Гц на каждом элементе варьируется в пределах от 20 до -30 дБ.

При изучении влияния внутренних волн на точность оценки координат, предполагается, что эти волны являются низкочастотными и приводят к синхронным вертикальным колебаниям термоклина вдоль всей акустической трассы, соединяющей шумовой источник и приёмную антенну, на величину до ± 4 м. Ниже эта задача решается для летних условий, поскольку в этом случае наблюдается заметная зависимость величины скорости звука от глубины. Вариация профиля для летних условий представлена на рис. 2 (справа). Очевидно, что для зимних или межсезонных условий, для которых характерна слабая зависимость скорости звука от глубины, колебания термоклина влияют на изменчивость звукового поля в значительно меньшей степени.

Случайные реализации вертикальных смещений верхней границы, обусловленные поверхностным волнением при различных скоростях ветра, моделировались с использованием эмпирического спектра Пирсона–Неймана [11].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Оценим возможность локализации шумового объекта с использованием линейной антенны с различными типами приёмников: только скалярные (P), скалярные (P) и 2-х компонентные векторные (V_x, V_y) и скалярные (P) и 3-х компонентные векторные (V_x, V_y, V_z).

Результаты пеленгования источника шума, расположенного на расстоянии $r_s = 5$ км в направлении $\phi_s = 60^\circ$, с использованием трёх типов антенн показаны на рис. 3. Нормировка приведённых зависимостей проведена на максимальное значение, полученное для скалярной антенны. Из рис. 3 следует, что при использовании векторно-скалярных антенн уровень зеркального лепестка значительно снижается по сравнению со скалярными антеннами даже для скользящих углов па-

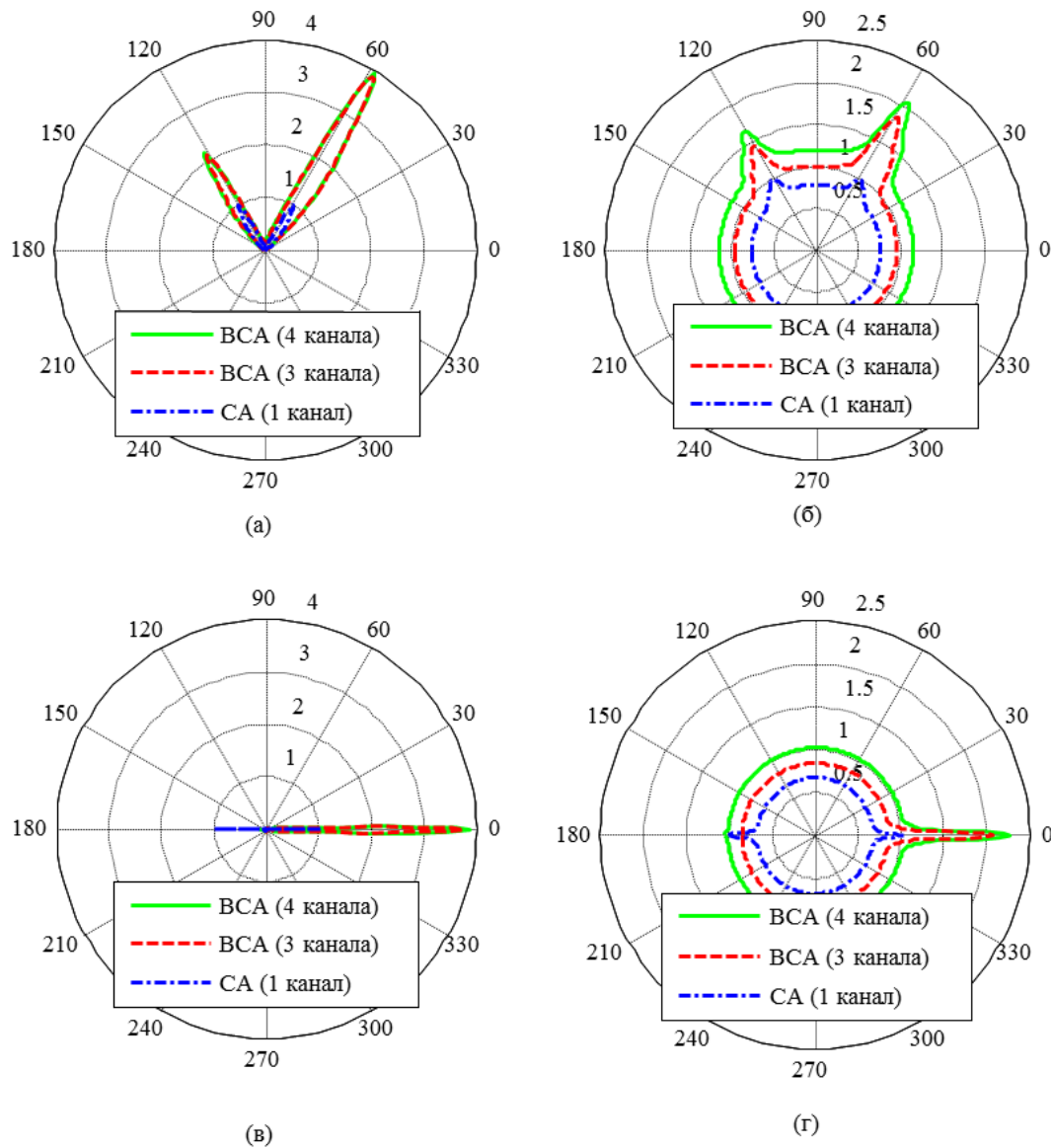


Рис. 3: Пеленгование шумового источника с помощью векторно-скалярных и скалярной антенн при отношении сигнал/шум 20 дБ (а,в) и -20 дБ (б,г)

дения волны к апертуре антенны. При нормальном падении сигнал, пришедший по зеркальному лепестку, подавляется на 20 дБ и более (см. рис.3в). Также отметим, что векторно-скалярные антенны, имеющие 3-х и 4-х компонентные приёмники, позволяют получать амплитуду отклика в 2–4 раза большую по сравнению с более традиционными скалярными антеннами. Иными словами, антенны и методы обработки сигналов, использующие не только значения звукового давления, но и компоненты вектора колебательной скорости, обладают повышенной помехоустойчивостью.

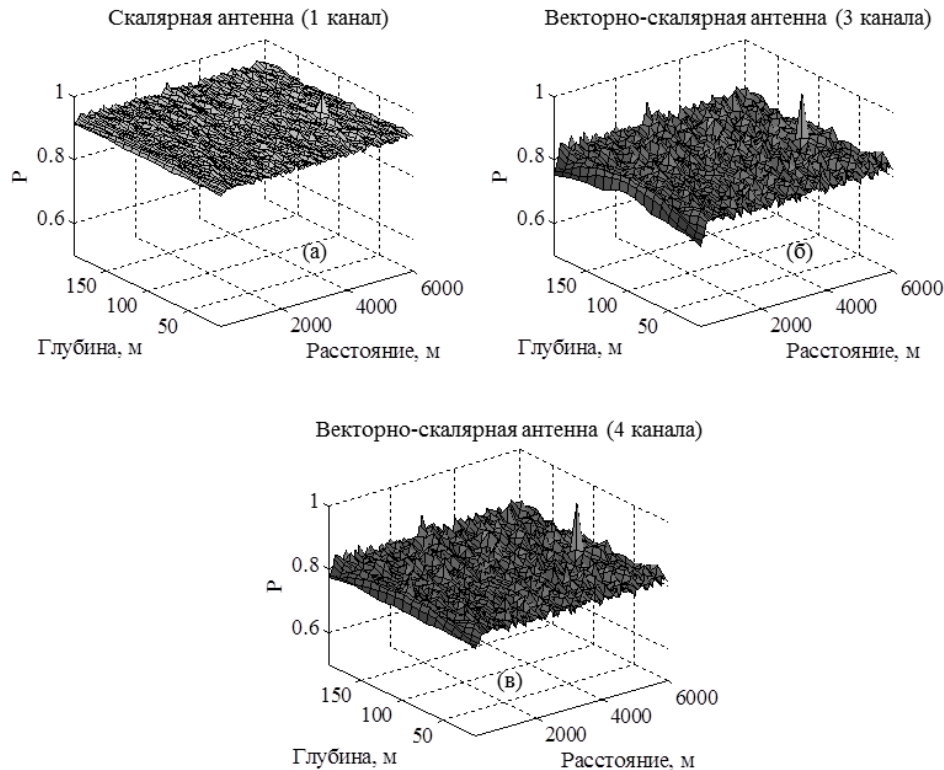
В табл. 1 приведены результаты оценки показателя обнаружения T малого объекта по методу Бартлетта при трёх различных типах приёмников в за-

висимости от отношения сигнал/помеха. Видно, что при всех отношениях сигнал/помеха использование векторно-скалярных антенн обеспечивает большую помехоустойчивость, чем применение скалярных антенн. В случае использования 4-х компонентных приёмных модулей наблюдается некоторое увеличение помехоустойчивости по сравнению с применением 3-х компонентных приёмников. Отметим, что при отношении сигнал/помеха ниже -20 дБ обнаружение малого объекта с помощью векторно-скалярной антенны всё ещё возможно ($T > 1$), тогда как скалярная антенна не может обеспечить правильную оценку (рис. 4).

Представляет интерес тот факт, что при выбранной нами модели фоновых помех и выбранном методе об-

Таблица I: Показатель обнаружения T для трёх типов антенн при различных отношениях сигнал/помеха (S/N)

	-30 дБ	-25 дБ	-20 дБ	-10 дБ	0 дБ	10 дБ	20 дБ
Скалярная (1 канал)	1,0	1,0	1,1	1,6	1,8	1,8	1,8
Векторно-скалярная (3 канала)	1,0	1,1	1,3	1,7	1,8	1,8	1,8
Векторно-скалярная (4 канала)	1,1	1,2	1,3	1,8	1,9	1,9	1,9

Рис. 4: Результаты применения метода Бартлетта для локализации малого объекта в направлении 60° при отношении сигнал/помеха -25 дБ

наружения положение максимума двумерного распределения $P(r, z)$ не претерпевает смещений даже при малых отношениях сигнал/помеха, снижается только контрастность картины.

Выполним анализ устойчивости оценок координат цели по методу Бартлетта при неточном задании параметров волновода. Соответствующие результаты приводятся в табл. 2 для векторно-скалярной антенны с 4-х компонентными приемниками и при отношении сигнал/помеха 0 дБ.

Метод Бартлетта оказывается достаточно устойчивым к умеренным вариациям или неточности задания в расчетной модели скорости звука в дне Δc_1 (± 100 м/с) и изменению глубины волновода ΔH (± 5 м). Неточная информация о глубине волновода приводит к смещению максимума в распределении $P(r, z)$ на несколько сотен метров по расстоянию и на ~ 10 м по глубине, но его можно обнаруживать и координаты идентифицировать. Результаты расчётов для

смещённых максимумов приведены в табл. 2 в круглых скобках. Очевидно, что для решения задачи классификации нет необходимости иметь точные значения глубины и дальности. Достаточно, чтобы глубина превышала критическую величину, например, 30 м.

Из табл. 2 также следует, что погрешность априорной информации о плотности грунта в пределах ± 200 кг/м³ слабо влияет на точность оценки координат шумового источника.

В условиях ветрового волнения при скоростях ветра V_w более 10 м/с и зимней гидрологии максимум в распределении $P(r, z)$ выделяется хуже, поскольку интерференция на апертуре антенны «замывается». Для повышения эффективности алгоритма необходимо накапливать мощность по нескольким реализациям и выполнять оценку дальности и глубины в пассивном режиме в низкочастотном диапазоне.

При летней гидрологии и достаточно плоском дне оценка дальности и глубины источника оказывает

Таблица II: Устойчивость оценки координат (величины T) для 4-х компонентной векторно-скалярной линейной антенны при отклонении параметров волновода от средних (истинных) значений

Δc_1 , м/с	-200	-100	0	100	200
T	1,0	1,3	1,9	1,6	1,2
$\Delta \rho_1$, кг/м ³	-200	-100	0	100	200
T	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
ΔH , м	-10	-5	0	5	10
T	0,7 (1,2)	0,6 (1,2)	1,9	0,6 (1,5)	0,6 (1,0)
ζ , м	-4	-2	0	2	4
T	1,8	1,9	2,1	1,9	2,0
V_w , м/с	0	9	12		
T	1,9	1,6	1,3		

ся устойчивой, в том числе при умеренном ветровом волнении, типичной активности внутренних волн и неточности прогноза параметров поверхностных слоев грунта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численных экспериментов показали, что векторно-скалярные антенны, состоящие из 3-х или 4-х компонентных модулей, обладают помехоустойчивостью на 5–10 дБ большей, чем скалярная антенна с равной апертурой. Применение 4-х компонентных модулей дает небольшое преимущество для обнаружения шумовых источников только при малом

отношении сигнал/помеха.

Установлено, что горизонтальная линейная скалярная или векторно-скалярная антенна, использующая разработанный алгоритм даёт устойчивые оценки пеленга, дальности и глубины шумового источника в пассивном режиме, в том числе, при свойственной мелкому морю изменчивости гидрофизических характеристик. Отсюда следует вывод о возможности применения алгоритма согласованной фильтрации, в том числе, при неточном априорном знании параметров волновода и при воздействии динамических эффектов, связанных с нестационарностью характеристик водной среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 14-02-31234.

- [1] Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника: Состояние и актуальные проблемы. (СПб: Наука, 2004).
- [2] Baggeer A.B., Kuperman W.A., Mikhalevsky P.N. IEEE J. Ocean Eng. **18**, N 4. P. 401. (1993).
- [3] Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. Fundamentals of shallow water acoustics. (Springer. New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 2013).
- [4] Capon J. Proc. IEEE. 1969. **57**, N 8. P. 1408. (1969).
- [5] Friedlander B. IEEE Trans. Acoust. Speech and Sign. Proc. 1990. **38**, N 10. P. 1740. (1990).
- [6] Daugherty J.R., Lynch J.F. J. Acoust. Soc. Am. 1990. **87**, N 3. P. 2503. (1990).
- [7] Глебова Г.М., Аверьянов А.В., Кузнецов Г.Н. Акуст. журн. 2011. **57**, № 5. С. 681. (2011).
- [8] Аверьянов А.В., Глебова Г.М., Кузнецов Г.Н., Смирнов Н.М. Экспериментальная оценка пространственных координат источника шумового сигнала. Научно-техн. сб. «Гидроакустика». **17**, № 1. С. 54. (2013).
- [9] Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. (М.: Наука, 1997).
- [10] Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. (Л.: Судостроение, 1978).
- [11] Пирсон В.Дж. Ветровые волны. Пер. с англ. С. 42. (М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962).

Noise source coordinate estimation in shallow water with a vector-scalar horizontal linear array

G.N. Kuznetsov^a, A.A. Lunkov^b

Wave research center, A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow 119991, Russia
E-mail: ^askbmortex@mail.ru, ^blandr2004@mail.ru

The simulation of the algorithm for the wideband noise source detection and depth and range estimation in passive mode with the Bartlett matched field processor is performed. Response characteristics of vector-scalar and scalar long-aperture linear arrays

are compared. It is shown that robust coordinate estimates are obtained even when accurate waveguide parameters are not known and when there are moderate dynamic perturbations in a water column. It is found that the vector-scalar array has 5 to 10 dB higher signal-to-noise ratio than the scalar one with the same aperture.

PACS: 43.30.Wi

Keywords: allow water acoustics, wide-band source localization, passive mode.

Received 13.11.2014.

Сведения об авторах

1. Кузнецов Геннадий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, заведующий отделом; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: skbmortex@mail.ru.
2. Луньков Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (499) 503-83-84, e-mail: landr2004@mail.ru.