

Исследование однонаправленности приема, оценки дальности и глубины источника с использованием скалярных и векторно-скалярных антенн

Г. М. Глебова^{1,*}, Г. Н. Кузнецов^{2,†}

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

²Научный центр волновых исследований Института общей физики имени А. М. Прохорова РАН
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38

(Статья поступила 26.07.2017; Подписана в печать 19.09.2017)

Анализируются пространственные спектры на выходе линейной скалярной или векторно-скалярной антенны (СА или ВСА) при обработке сигналов методами, имеющими различную разрешающую способность, согласованными или несогласованными с передаточной функцией волновода. Эксперименты проводились в мелководном бассейне при стационарном расположении антенны и излучателя и в режиме буксировки антенны с движущимся источником шума. ВСА, в отличие от СА, подавляет сигналы, приходящие по «зеркальному» лепестку и обладает однонаправленностью пеленгования, а при использовании согласованной обработки в пассивном режиме однозначно определяет расстояние и глубину источника.

PACS: 43.30.+m

УДК: 534.2

Ключевые слова: волновод, пассивный режим, векторно-скалярная антенна, пеленг, расстояние и глубина источников, высокое разрешение, согласованная фильтрация.

ВВЕДЕНИЕ. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Линейные СА удобны тем, что позволяют определять направление на шумящий источник с высокой точностью. Но они имеют зеркальные лепестки, из-за которых невозможно разделять источники, расположенные с двух сторон от апертуры антенны. ВСА из-за подавления зеркального лепестка обеспечивают однонаправленный прием [1, 2]. Донные стационарные антенны в этом случае разделяют источники, расположенные «спереди» или «сзади». Буксируемые антенны различают источники шума по левому и правому борту от антенны. Причем оба полупространства контролируются одновременно с одинаковой разрешающей способностью и эффективностью обнаружения.

Сравним разрешающую способность и помехоустойчивость СА и ВСА при обработке сигналов алгоритмами, имеющими стандартное, высокое и сверхвысокое разрешение.

Экспериментальные работы выполнялись с линейной эквидистантной ВСА с апертурой 10 м, с идентичными векторно-скалярными модулями, разнесенными на 0.5 м (количество векторно-скалярных модулей $M = 21$). Каждый модуль включает скалярный приемник (СП) и два ортогональных векторных приемника (ВП) V_1 и V_2 . Характеристики приемной ВСА и условия проведения экспериментов подробно изложены в [1, 2]. Под СА понимается антенна, которая состоит только из 21 СП, входящего в состав каждого модуля ВСА.

В стационарных условиях антенна подвешивалась в горизонтальном положении к ферме, закрепленной на поворотном устройстве, позволяющем вращать антенну в горизонтальной плоскости непрерывно или фиксировать ее положение при определенных углах поворота. В качестве источника сигналов использовался широкополосный пьезокерамический излучатель, установленный на глубине 10 м и расстоянии ~ 185 м от приемной антенны. Глубина места в районе испытаний составляла 20 м, дно илистое. Скорость распространения звука в воде равна 1436 м/с.

При испытаниях в режиме буксировки ВСА была опущена с кормы движущегося прямолинейно научного судна, вокруг которого быстроходный катер совершал галсы, двигаясь параллельно (с двух бортов) и пересекая курс в носовых и кормовых аспектах.

Эксперименты выполнялись на Химкинском водохранилище и на Ладожском полигоне АО «Концерн «Океанприбор».

1. АНАЛИЗ ОТКЛИКОВ СА И ВСА ПРИ ПЕЛЕНГОВАНИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИСТОЧНИКА

При обработке сигналов использовались методы Бартлетта, Кейпона и MUSIC, имеющие стандартное, высокое и сверхвысокое разрешение [3]. Сканирующий вектор задавался в виде когерентной суммы сигналов, приходящих по трем или четырем лучам $W(x, y, z) = \sum_{l=1}^3 [1, \cos \alpha \sin \beta_l, \sin \alpha \sin \beta_l] p_l(x, y, z)$, где $p_l(x, y)$ — сигналы, приходящие по разным лучам, α — пеленг, β_l — углы места для лучей, l — номер луча.

В данной работе используется двухэтапный алгоритм обработки. На первом этапе определяется направление на источник.

*E-mail: glbgalina@yandex.ru

†E-mail: skbmortex@mail.ru

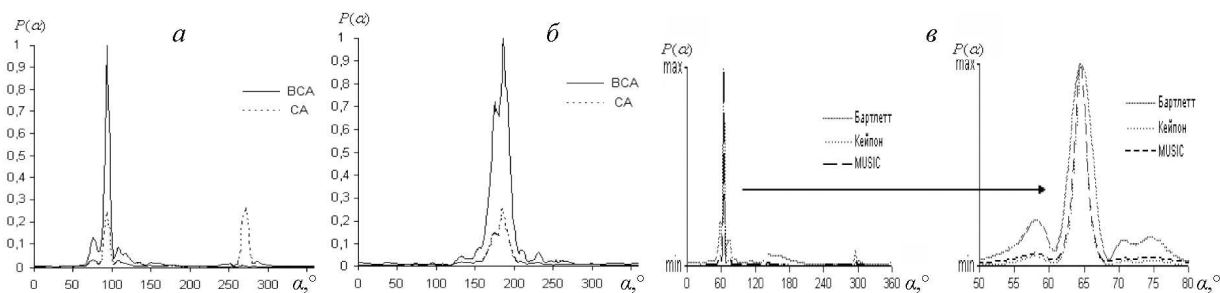


Рис. 1: Пространственные спектры на выходе приемной системы при оценке пеленга на источник. Вектор задержек зафиксирован по пеленгу в направлении: *а* — $\alpha = 90^\circ$, *б* — $\alpha = 180^\circ$, *в* — сравнение ХН при трех алгоритмах разрешения

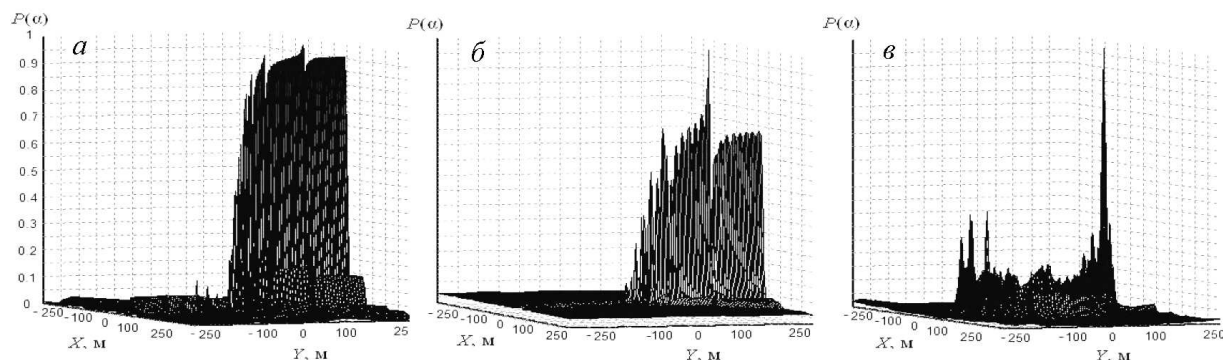


Рис. 2: Пространственные спектры на выходе приемной системы. Обработка выполняется методами: *а* — Бартлетт, *б* — Кейпон, *в* — MUSIC

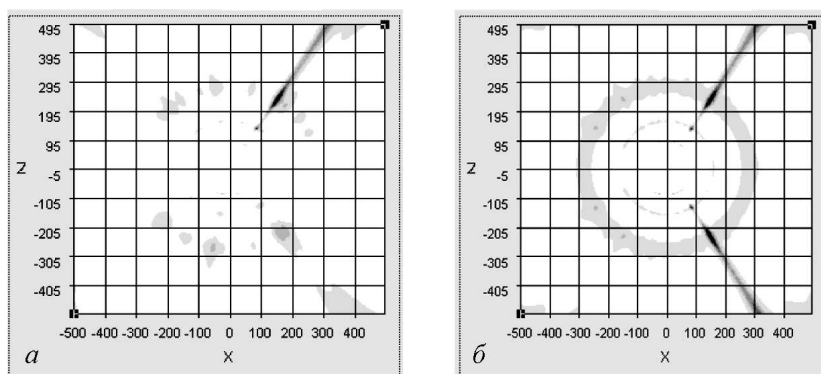
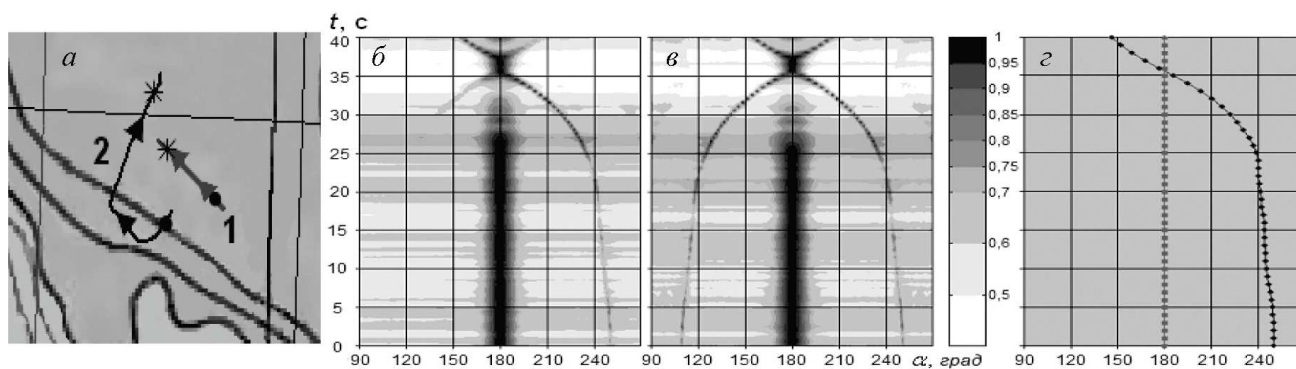
Характеристики направленности (ХН) СА и ВСА (рис. 1) измерялись при излучении широкополосного сигнала и вращении антенны в горизонтальной плоскости на 360° с постоянной угловой скоростью. При обработке по методу Бартлетта использована модификация $P(\alpha) = W^*(\alpha)K(t)W(\alpha)$, где матрица ковариаций сигналов K изменяется во времени из-за вращения антенны, а сканирующий вектор $W(\alpha)$ «зафиксирован» в определенном направлении. В связи с соизмеримостью глубин излучения и приема сигналы принимались преимущественно в горизонтальной плоскости ($\beta = 90^\circ$). Для сглаживания интерференции сигналов, приходящих по различным лучам, ХН рассчитывалась в полосе частот от 1200 до 1500 Гц. На рис. 1, *а*, *б* видно, что отклик линейной ВСА, в отличие от СА, дает однозначное определение направления на источник, т.е. сигнал, принятый антенной по зеркальному лепестку, эффективно подавляется. На рис. 1, *в* представлены пространственные спектры, полученные с использованием алгоритмов, имеющих различную разрешающую способность. Видно, что алгоритмы, имеющие высокое и сверхвысокое разрешение, формируют более узкую ХН, а измеренное боковое поле меньше, чем при сканировании стандартным методом Бартлетта. При расположении источника вдоль оси антенны (кормовой или носовой аспект) направление на источник (рис. 1, *б*) определяется однозначно как скалярной, так и векторно-скалярной антенной. Ширина

главного лепестка (и теоретическая, и экспериментальная) у ВСА и СА практически одинаковая, так как определяется, в основном, апертурой антенны, которые в данном случае у антенн равны. Направленность ВП практически не влияет на ширину главного лепестка ВСА в целом, а лишь подавляет зеркальный лепесток и уменьшает уровень боковых лепестков. По этой причине у ВСА уровень бокового поля ниже, чем у СА.

На рис. 1, *а*, *б* видно, что максимальное значение отклика ВСА в 4–5 раз больше, чем для СА. Действительно, при обработке методом Бартлетта для значений сканирующих векторов, совпадающих с направлением на источник, отклик антенны можно записать в виде $P(\theta = \theta_0) = W^*UU^*W = STr^2(K(s)) = SG^2$, где $G = Tr(K(s))$. Следовательно, для СА $G = M$ (равно числу модулей), а для ВСА — $G = 2M$. Таким образом, для СА имеем $P(s) = SM^2$, а для ВСА — $P(s) = 4SM^2$. Такое увеличение коэффициента усиления при использовании ВСА объясняется тем, что сигнал от локального источника суммируется когерентно не только по всем модулям антенны, но и в каждом модуле — по приемнику давления и по сумме двух ВП.

2. АНАЛИЗ ТРЕХМЕРНОГО ОТКЛИКА ВСА ПРИ ОЦЕНКЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА

После оценки пеленга выполним сканирование по двум координатам: расстоянию до излучателя в гори-

Рис. 3: Согласованная обработка (Кейпон): *a* — ВСА и *б* — САРис. 4: (*a*) Траектории движения центра антенны 1 и источника 2, стрелками указано направление движения судов, символы $\bullet$ и $*$ соответствуют положению антенны и источника в моменты времени (t_1 и t_2). *б*, *в* — Зависимости оценки пеленга двух источников (буксировщика и лодки) от времени, рассчитанные методом MUSIC с использованием: *б* — ВСА, *в* — СА; *г* — оценки пеленга вдоль траектории движения по данным приемников GPS

горизонтальной плоскости $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ и глубине z с использованием стандартного, высокого и сверхвысокого методов разрешения (рис. 2).

При использовании метода сверхвысокого разрешения MUSIC расстояние до источника и его глубина ($R = 171$ м, $z = 10$ м) определяются с высокой точностью и однозначно. Метод Кейпона также позволяет достаточно точно определить расстояние и глубину источника, однако уровень бокового фона выше. Стандартный метод имеет еще более высокий боковой фон и несколько ложных лепестков единичного уровня. Для получения устойчивой и однозначной оценки R и z в последнем случае необходимо выполнить усреднение по времени, полосе рабочих частот и по пространству.

На рис. 3 представлены обработанные по методу Кейпона сигналы, образующие проекцию трехмерного отклика на горизонтальную плоскость — для ВСА (рис. 3,а), для СА (рис. 3,б). Антенны имеют одинаковую апертуру, число приемников и диапазоны рабочих частот. Видно, что отклик ВСА не имеет зеркального лепестка, а боковое поле существенно меньше, чем у СА. Но расстояние обе антенны определяют с одинаковой точностью. Отметим, что данные эксперименталь-

ные результаты хорошо согласуются с рассчитанными зависимостями откликов СА и ВСА.

3. ОЦЕНКА ПЕЛЕНГА НА ДВИЖУЩИЙСЯ ИСТОЧНИК В РЕЖИМЕ БУКСИРОВКИ

Многоканальная ВСА буксировалась катером на глубине около 5 м со скоростью 6 узлов. В качестве источника сигналов использовалась быстроходная моторная лодка. Рабочая полоса частот 1–3 кГц. Для контроля взаимного положения приемной антенны и движущегося источника их географические координаты измерялись приемниками GPS, установленными на буксировщике и моторной лодке. С их помощью рассчитаны направления на движущийся источник, которые сопоставлены с результатами оценки пеленга по акустическим сигналам. На рис. 4,а представлены траектории движения антенны и источника, измеренные с помощью приемников GPS. На рисунке отмечены моменты t_1 и t_2 , для которых представлены результаты обработки сигналов.

В выбранные моменты времени движущийся источник находится по направлению $\varphi = 250^\circ$ и $\varphi = 147^\circ$,

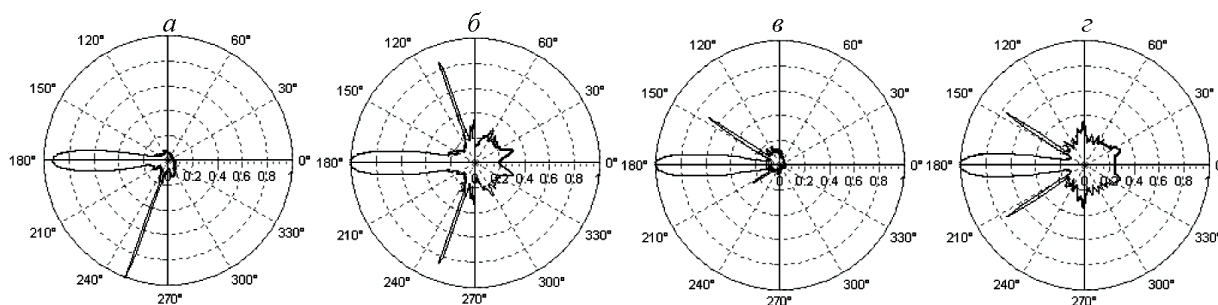


Рис. 5: Пространственные спектры, полученные при обработке сигналов методом Барлетта; а, в — для ВСА; б, г — для СА; а, б — момент времени t_1 ; в, г — момент времени t_2

что хорошо согласуется с измерениями GPS. Как и следовало ожидать, линейная СА, в отличие от ВСА, не дает однозначного определения координат движущегося источника (рис. 5,б и 5,г). Обработка сигналов методом MUSIC по всей траектории движения источника показала зависимость оценки пеленга источника от времени как для СА, так и для ВСА. Видно (рис. 5), что уровень бокового фона для СА больше, чем при работе с ВСА. Уровень бокового фона для ВСА даже в режиме буксировки примерно в 3 раза ниже, чем у СА, что согласуется с результатами расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтверждена возможность однонаправленного приема и пеленгования сигналов с использованием ВСА с подавлением ложного «зеркального» лепестка на 12–20 дБ и более. В стационарных условиях и в режиме буксировки характеристики направленности по данным ВСА и СА с одинаковой апертурой имеют прак-

тически равную угловую ширину. Погрешность оценки пеленга на источник, контролируемая приемниками GPS, также примерно одинаковая и равна $\sigma = 0.26^\circ$.

С использованием ВСА экспериментально установлена возможность однозначной оценки в пассивном режиме расстояния и глубины источника. Предложенный двухэтапный алгоритм обработки — оценка направления на источник, а затем определение дальности и глубины источника — сокращает объем вычислений по сравнению с поиском глобального максимума в трехмерном пространстве.

При формировании из сигналов от СП и ВП кардиоид отношение сигнал/помеха (ОСП) на выходе ВСА примерно в четыре раза больше, чем у СА, а уровень бокового фона для ВСА в три раза меньше. При обработке этих сигналов по потоку мощности можно получить более высокие значения выигрыша ОСП, но в реальных условиях значение ОСП на выходе СА или ВСА будет существенно зависеть от помеховой обстановки — наличия или отсутствия движущихся локальных источников помех.

- [1] Глебова Г. М., Аверьянов А. В., Кузнецов Г. Н. Акуст. журн. 2011. **57**, № 5. С. 681.
[2] Аверьянов А. В., Глебова Г. М., Кузнецов Г. Н. Гидроакустика. 2013. Вып. 17(1).

- [3] Сазонтов А. Г., Мелеханов А. И. Акуст. журн. 2015. **61**, № 2. С. 233.

Research unidirectional reception, evaluation range and source depth using scalar and vector-scalar antennas

G. M. Glebova^{1,a}, G. N. Kuznetsov^{2,b}

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

²Wave Research Center at General Physics Institute. Moscow 119991, Russia

E-mail: ^aglbgalina@yandex.ru, ^bskbmortex@mail.ru

We analyze the spatial spectra at the output of the linear scalar or vector-scalar antenna (SA or VSA) at signal processing methods having a different resolution, consistent or inconsistent with the transfer function of the waveguide. The experiments were conducted in a shallow pool at the stationary location of the antenna and the emitter and in regime of the towing with the moving noise source. VSA, unlike SA, suppresses signals coming on «mirror» petals and has unidirectional direction finding, and at using consistent processing in passive mode uniquely determines the distance and the depth of the source.

PACS: 43.30.+m

Keywords: waveguide, passive mode, vector-scalar antenna, finding, length and depth of the sources, high resolution, matched filtering.

Received 26 July 2017.

Сведения об авторах

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