

Методы повышения помехоустойчивости обнаружения и пеленгования с использованием векторно-скалярного модуля

Г. Н. Кузнецов^{1,*}, А. Ф. Курчанов^{2†}

¹Научный центр волновых исследований Института общей физики имени А. М. Прохорова РАН
Россия, 119991, Москва, ул. Бавилова, д. 38

²ВНИИФТРИ. Россия, 141570, Менделеево, МО, ул. Институтская, д. 21

(Статья поступила 26.07.2017; Подписана в печать 19.09.2017)

Выполняется пеленгование широкополосных источников скалярной антенной (СА) и векторно-скалярными модулями (ВСМ) с использованием обработки по потоку мощности и по новому методу, основанному на применении псевдовекторов, построенных по проекциям векторов колебательной скорости (ВКС). Исследуется метод подавления помех от локального источника с использованием векторных полей.

PACS: 43.60.+d УДК: 534.21

Ключевые слова: векторно-скалярные модули, пеленгование, подавление помех от локальных источников.

ВВЕДЕНИЕ. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сравним погрешности пеленгования широкополосных сигналов протяженной СА и одиночным малогабаритным ВСМ при различных методах обработки. Решим также задачу повышения помехоустойчивости выделения сигналов путем подавления помех от локального источника.

Эксперименты выполнены в удаленном от берегов районе с известными гидрологией, рельефом и структурой многослойного дна. Использовались пространственно-развитая антенна, буксируемый пневмоисточник (ПИ), эхолот, датчики глубины и температуры воды, два обеспечивающих позиционирование и единое время приемника GPS, установленные на борту приемного и излучающего судна. Прием сигналов производился на четыре ВСМ, разнесенные на апертуру 110 м. Каждый модуль включал четырехкомпонентные ВСМ, образованные из ненаправленного скалярного приемника (СП) и трех ортогональных векторных приемников (ВП) инерциального типа. Первый модуль (водный) был отнесен от второго по горизонтали на 10 м и приподнят над дном на 22 м. Второй, третий и четвертый модули (придонные) разделялись линейными отрезками кабеля по 50 м и располагались на расстоянии около 1.2 м от дна. Геометрия антенны, схема буксировки излучателя и условия проведения экспериментов подробно изложены в [1]. Сигналы от всех ВСМ в цифровом виде передавались по одножильному кабелю на приемное судно, которое стояло на якорях на расстоянии около 400 м от ближайшего приемного модуля. Широкополосный излучатель ПИ буксировался на глубине 15 м по дуге с радиусом относительно антенны 11–12 км. Начало трассы буксировки ПИ располагалось примерно по нормали,

окончание — под острым углом к апертуре антенны. Рельеф дна моря предварительно исследовался с использованием эхолота и отличался значительной неоднородностью. Малые глубины волновода в зоне излучения на начальном и конечном участках дуги привели к существенному ослаблению распространяющихся сигналов, особенно на низких частотах. Это видно на рис. 1, где приведены зависимости отношения сигнал/помеха (ОСП) в полосе частот от 40 до 400 Гц, принятые на четыре разнесенные в пространстве СП, входящих в состав четырех ВСМ. Отметим, что сигналы от ПИ на начальном и конечном участках дуги (импульсы 1–12 и 97–103) из-за мелководья значительно (на 15–20 дБ) меньше, чем на центральном участке. Аналогичные зависимости, в том числе для отдельных выделенных мод, получены и для ВП.

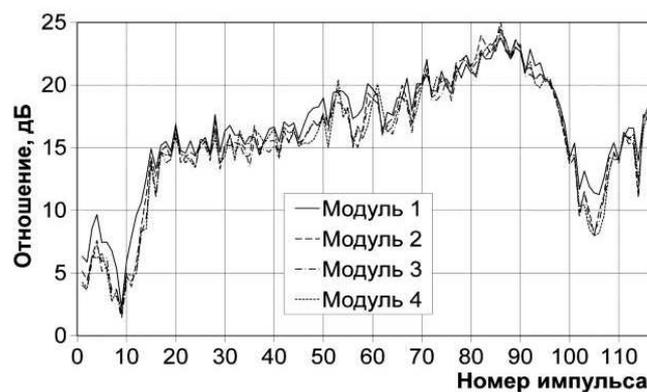


Рис. 1: Отношение сигнал/помеха на скалярных приемниках четырех ВСМ

1. ПЕЛЕНГОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Скалярная антенна. Пеленгование источников при использовании пространственно-развитых СА выпол-

*E-mail: skbmortex@mail.ru

†E-mail: a.f.kurchanov@gmail.com

няется на высоких и средних частотах по стандартным и хорошо отработанным алгоритмам. Но на низких частотах необходимо учитывать дисперсионные свойства волновода. Причем, чем ниже рабочая частота, тем большее влияние оказывает волновод на погрешности пеленгования. В пределе на частотах ниже критической звук не распространяется, и пеленгование невозможно. На частотах, на которых в волноводе звук уже распространяется, рекомендуется при расположении антенны в зонах интерференционных максимумов для получения несмещенных оценок пеленга использовать для расчета фазовых задержек не величину скорости звука в воде, а средневзвешенную — эффективную фазовую скорость (ЭФС) [2].

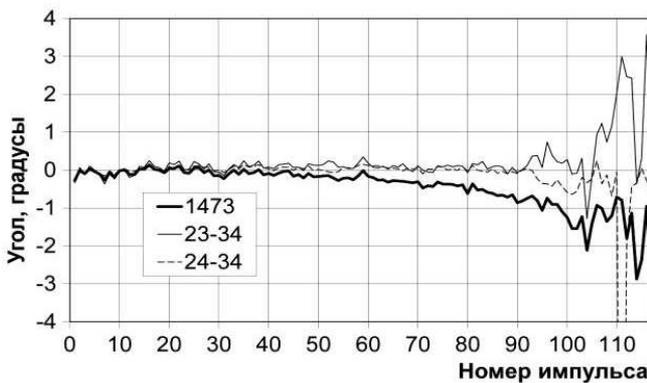


Рис. 2: Разности пеленгов для СП пар 23 и 24 и парой 34. Жирная кривая для пар 23–34 и 24–34 при скорости звука $c_0 = 1473$ м/с. Остальные кривые учитывают ЭФС

На рис. 2 показаны зависимости разностей пеленга на буксируемый источник. Жирная линия рассчитана с использованием скорости звука в воде $c = 1473$ м/с, измеренной перед экспериментами. Пунктирной и тонкой сплошной линиями обозначены кривые, вычисленные с использованием частотной зависимости ЭФС. Видно, что при углах падения фронта волны на апертуру антенны, близких к нормальному, различие измеренных пеленгов практически равно нулю. При косых (скользящих) углах, как это следует из [2], поправка, учитывающая дисперсионные свойства волновода, устраняет смещения и повышает точность пеленгования, т.е. при учете дисперсионных свойств волновода использование СА обеспечивает непрерывное и высокоточное пеленгование, в том числе при скользящих углах. Но при «косых» углах увеличивается разброс оценок.

Пеленгование одиночным векторно-скалярным приемником. Методы пеленгования с использованием проекций вектора потока мощности хорошо известны. Как правило, применяются два метода оценки пеленга многокомпонентными векторно-скалярными приемниками, основанные на использовании отношения амплитуд двух ортогональных горизонтальных проекций ВКС или проекций вектора плотности потока мощности [3].

Поток мощности $\mathbf{W} = P\mathbf{V}$ обладает тем полезным свойством, что при наличии источника сигнала и достаточном усреднении во времени дает не стремящиеся к нулю величины потока с уменьшающимися флуктуациями помех (при стационарных сигналах и изотропных помехах). Это позволяет выработать порог обнаружения и его уменьшать при увеличении времени обработки сигнала. Вектор \mathbf{V} не обладает такими полезными свойствами. Если рассчитать проекции V_X и V_Y по формулам $\hat{V}_X = \sqrt{\langle V_X^2 \rangle}$ и $\hat{V}_Y = \sqrt{\langle V_Y^2 \rangle}$, где угловыми скобками обозначено усреднение по времени, то получим пеленг θ на источник относительно оси X : $\theta = \arctan \left| \hat{V}_Y / \hat{V}_X \right|$, но одновременно определяется и «зеркальный» сигнал, смещенный на 180° . В результате для сигнала, намного превышающего помеху, получим устойчивую, но неоднозначную по направлению оценку пеленга. Если же полезный сигнал мал, а помеха в горизонтальной плоскости изотропна, то при равенстве $|V_X|$ и $|V_Y|$ всегда «что-то пеленгуется» в направлениях $\pm 45^\circ$ к осям X и Y и в противоположных направлениях. Поскольку источника сигнала там нет, то возникают ложные тревоги. Поэтому далее мы будем применять для пеленгования комплексную величину $\mathbf{W} = P\mathbf{V}$, где в вектор \mathbf{V} , определяющий колебательную скорость, уже включены множители ρ и c , т.е. «скорость» \mathbf{V} приведена к размерности акустического давления P Па ([3]). Учтем также, что под плотностью потока мощности подразумевается только его действительная часть $\text{Re}(\mathbf{W})$.

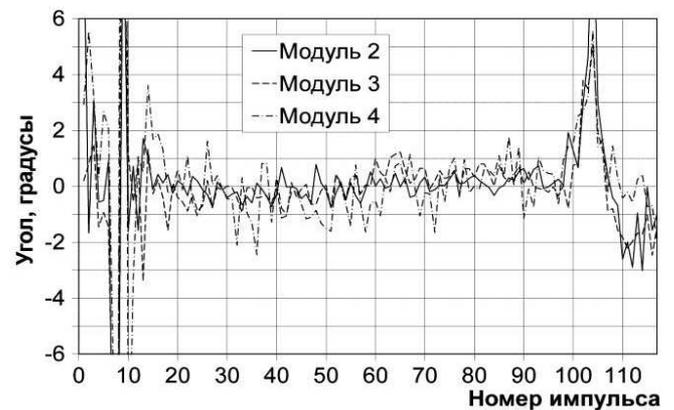


Рис. 3: Разности оценок пеленга по потоку мощности для модулей 2, 3 и 4 и пеленга, измеренного двумя разнесенными СП модулей 3 и 4

Расчеты пеленгов θ_X по потоку мощности импульсов выполнены в полосе рабочих частот 140–300 Гц по формулам, приведенным в [3], но с поправкой на начальные смещения углов ориентации ВСМ относительно оси Z — соответственно, для ВСМ 1–4: $\varphi_Z = \{+18.3; -11.5; +3.3; +2.6\}$. На рис. 3 показаны разности оценок пеленгов по потоку мощности для модулей 2–4 и пеленгов, измеренных двумя разнесенными на 50 м СП с номерами 3 и 4.

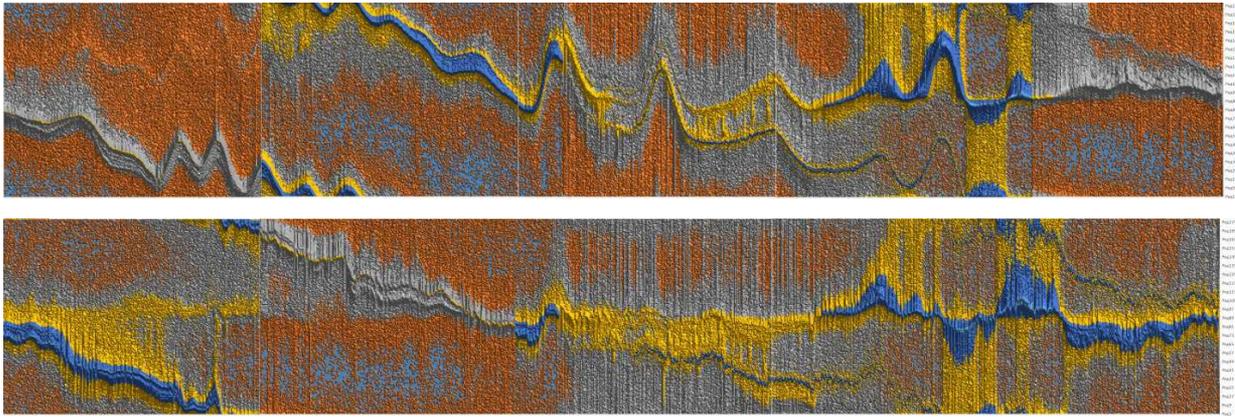


Рис. 4: Оценка пеленга с использованием двух разнесенных по вертикали четырехкомпонентных векторно-скалярных приемников. Видно, что при смещении приемника под действием течения происходит неконтролируемые, в отдельных случаях «дружные» изменения оценки пеленга

Из рисунка следует, что различие оценок возрастает при малых отношениях сигнал/помеха (вблизи импульсов 10 и 103). На остальных участках (импульсы 12–100) разница между оценками пеленга, полученными с использованием ВСМ или пар разнесенных в пространстве СП, не велика и имеет в основном случайный характер, т.е. погрешности оценки пеленга с использованием одиночного точечного ВСМ или СА с апертурой 50 или 100 м соизмеримы.

На рис. 4 приведены зависимости оценки пеленга на два разнесенных по вертикали четырехкомпонентных приемника, которые под действием приливно-отливного течения изменяли ориентацию в горизонтальной и вертикальной плоскости. Видно, что вдоль всей трассы буксировки низкочастотного излучателя каждым ВСМ выполняется уверенное пеленгование, но из-за изменения в пространстве ориентации приемника практически случайным образом изменяются оценки пеленга (что реально невозможно). В отдельных случаях наблюдается синхронное перемещение приемников и, соответственно, синхронное изменение оценок пеленга, в том числе при «расщеплении» оценок пеленга, связанных с наличием судоходства в районе работ.

Пеленгование с использованием комбинированного псевдовектора. Видно, что при несомненных достоинствах метода оценки пеленга с использованием вектора потока мощности \mathbf{W} , он обладает известным недостатком — повышенной чувствительностью к помехам, приходящим в вертикальной плоскости. Новый метод, основанный на искусственном построении псевдовектора, не использует сигналы от скалярного приемника и поэтому обладает повышенной помехоустойчивостью в условиях интенсивных изотропных помех — особенно образованных шумами моря, приходящими сверху или снизу. Слабо чувствительными к таким помехам являются построенные функции U_1 и U_2 . Для этих функций и для проекций ВКС $V(t)$, имеющих направление θ от оси X к оси Y , запишем $U_1 = V_X^2 - V_Y^2$,

$U_2 = 2V_X V_Y$, $U_1 = V^2(t) \cos(2\theta)$, $U_2 = V^2(t) \sin(2\theta)$, $U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} = V^2(t)$, где U в горизонтально-изотропном поле помех при отсутствии сигналов не зависит от направления приема. При усреднении изотропных помех обе величины U_1 и U_2 , независимо от величины помех, приближаются к нулевым значениям.

Можно сформировать функции G_X и G_Y , являющиеся проекциями искусственно построенного псевдовектора \mathbf{G} с размерностью, аналогичной вектору \mathbf{W} $G_X = (\rho c)^2 U \cos \theta$, $G_Y = (\rho c)^2 U \sin \theta$. Величины U_1 и U_2 не являются проекциями вектора, но углы прихода сигналов получим оценку пеленга $\theta = \arctan(U_1/U_2)/2$. С использованием псевдовектора \mathbf{G} можно также записать $\theta = \arctan(G_Y/G_X)$. Поэтому величины (U_1, U_2) и (G_X, G_Y) можно использовать для пеленгования как совместно с проекциями потока мощности, так и самостоятельно.

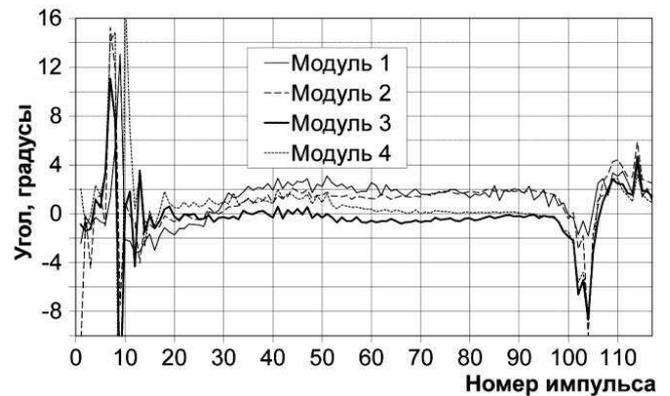


Рис. 5: Разность пеленгов, измеренных с использованием вектора \mathbf{W} и псевдовектора \mathbf{G} для модулей 1–4

На рис. 5 приведены разности пеленгов, измеренных модулями 1–4 с использованием вектора потока мощности \mathbf{W} и комбинированного псевдовектора \mathbf{G} . Видно, что при малых ОСП величина разброса

(или смещения) возрастает, а погрешности пеленгования с использованием компонент вектора потока мощности \mathbf{W} или псевдовектора \mathbf{G} соизмеримы. При достаточно больших значениях ОСП различие значений пеленгов (импульсы 15–95) не велики — в пределах 1–1.5°.

2. ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ ОТ ЛОКАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА

При расположении двух или более источников в разных квадрантах ВСМ появляется возможность подавления мешающего источника. В основе решения этой задачи лежит раздельное и одновременное пеленгование разнесенных по углу источников, оценку параметров сигнала от источников помех с использованием направленных $PV_{x,y,z}$ -каналов и последующее вычитание помехи из суммарного сигнала, принятого СП. Таким образом, на выходе СП формируется «очищенное» от локальной помехи поле $\tilde{P}(f)$ вместо исходного поля P . Как следствие, если для решения задач обнаружения и пеленгования использовать величины $\tilde{P}(f)$ вместо P , то возрастает помехоустойчивость обнаружения и точность пеленгования. Для этого необходимо сформировать модифицированный поток мощности $\tilde{W} = \tilde{P}V$ [4].

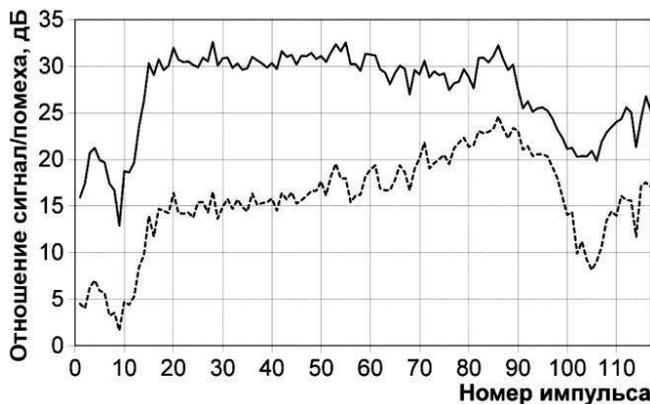


Рис. 6: ОСП на СП (канал P) модуля 4 при движении излучателя по дуге. Пунктирная кривая — исходное ОСП, сплошная кривая — после вырезания помехи

На рис. 6 представлен пример использования этого метода. По визуальным наблюдениям за надводной обстановкой и по акустическим сигналам установлено, что в третьем квадранте в зоне размещения ВСМ при пеленгах минус (60–85°) перемещается надводное судно, шумы которого дают заметный вклад в общее поле помех. Необходимо помеху подавить на всем интервале буксировки ПИ, соответствующем импульсам от 1 до 117. Для выделения помех были выбраны интервалы времени, предшествовавшие каждому импульсу в зоне от 28 до 2 с, а вычисленные параметры применялись далее к интервалам времени, содержащим импульсы, и к интервалам длительностью 1 с, непосредственно предшествующим импульсам. Видно, что из-за уменьшения исходного уровня помех после «вырезания» помехи от локального источника ОСП в полосе частот от 140 до 300 Гц увеличилось на 12–15 дБ (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено пеленгование буксируемого источника с использованием скалярной антенны с апертурой 100 м и одиночными векторно-скалярными модулями по трем алгоритмам — по запаздыванию сигналов, принятых только разнесенными в пространстве СП; по ортогональным проекциям вектора плотности потока мощности, построенным по сигналам от ВП и СП, а также по ортогональным проекциям искусственно созданного псевдовектора, использующим только ВП. Установлено, что при большом ОСП пеленгование выполняется с соизмеримыми погрешностями, не превышающими 1–2°. Погрешности применения всех методов при увеличении помех возрастают. Точность пеленгования с применением ВСМ не зависит от акустико-гидрологических условий, расстояния до источника и его глубины, что позволяет считать оценку пеленга по векторно-скалярному полю «динамическим инвариантом».

Метод «вырезания» из суммарного сигнала, принятого СП, помех от локальных источников уменьшает величину помехи на 12–15 дБ и позволяет в сложной помеховой обстановке при наличии надводного судноходства увеличить помехоустойчивость обнаружения и пеленгования.

[1] Белова Н. И., Кузнецов Г. Н. Гидроакустика. 2015. **22**, № 2. С. 32.
[2] Кузнецов Г. Н., Лебедев О. В. Акуст. журн. 2012. **58**, № 5. С. 628.
mbox

[3] Гордиенко В. А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007.
[4] Kuznetsov G. N., Kurchanov A. F. Phys. Wave Phenom. 2016. **24**, N 1. P. 77.

Methods to improve immunity noise detection and direction finding using a vector-scalar modules

G. N. Kuznetsov^{1,a}, A. F. Kurchanov^{2,b}

¹Wave Research Center at General Physics Institute. Moscow 119991, Russia

²VNIIFTRI. Mendeleevo, MO, 141570, Russia

E-mail: ^askbmortex@mail.ru, ^ba.f.kurchanov@gmail.com

Made direction finding of broadband sources of scalar antenna (SA) and vector-scalar modules (VSM) using processing the flow of power and the new method based on the use of pseudovectors built on the projection of vector vibrational rate (VVV). Investigated method of interference suppression from a local source with using of vector fields.

PACS: 43.60.+d

Keywords: vector-scalar modules, direction finding, suppression of interference from local sources.

Received 26 July 2017.

Сведения об авторах

1. Кузнецов Геннадий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, нач. СКБ «Морские технологии», профессор; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: skbmortex@mail.ru.
2. Курчанов Анатолий Федорович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: a.f.kurchanov@gmail.com.