

Исследование векторно-фазовой структуры звукового поля на гидроакустическом полигоне МГУ для целей пассивной томографии

Е. В. Медведева^{1,*}, Б. И. Гончаренко¹, А. С. Шуруп^{1,2,3}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

³Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

(Статья поступила 01.07.2019; Подписана в печать 31.07.2019)

Приводятся результаты обработки данных натуральных измерений векторно-фазовой структуры звукового поля, полученных в ходе эксперимента на гидроакустическом полигоне МГУ летом 2018 г., в котором двумя разнесенными в пространстве комбинированными приемными модулями (содержащими приемник звукового давления и векторный приемник) регистрировалось шумовое поле акватории при наличии активного судоходства. На основе синхронизированных записей давления и трех взаимно ортогональных проекций колебательной скорости проведена оценка пространственной анизотропии и убывания шумового поля, оценены значения пеленгов на проходящее судно как на звуковой источник. Полученные результаты используются для экспериментальной апробации алгоритма, позволяющего восстановить взаимную ориентацию каналов векторных приемников, установленных на дно акватории в различных географических точках. Предложенный подход позволяет упростить техническую сторону проведения экспериментов с разнесенными в пространстве комбинированными приемными модулями, так как не требует дополнительных процедур по контролю ориентации каналов векторных приемников при их установке на дно акватории. Полученные результаты могут быть использованы при построении схем пассивной томографии шельфовых морей с упрощенными требованиями на их практическую реализацию.

PACS: 43.60.+d, 43.58.+z.

УДК: 534.6.

Ключевые слова: векторно-фазовые методы измерений, пространственная анизотропия и затухание шумового поля в мелком водоеме, пассивная томография мелкого моря.

ВВЕДЕНИЕ

Акустическая томография глубокого океана и мелких морей [1, 2] является актуальным методом исследования обширных морских акваторий, основанным на способности низкочастотных звуковых волн распространяться в морской воде на большие расстояния, неся информацию о физических параметрах океанического волновода, влияющих на характер распространения звука [3]. Однако, несмотря на всю перспективность акустической томографии, ее реализация в условиях натурального эксперимента сопряжена со значительными трудностями как с точки зрения применения общих методов решения обратных задач в случае акустического рассеяния в неоднородных движущихся средах, так и в плане практической реализации. В частности, использование дорогостоящих низкочастотных излучателей требует значительных финансовых затрат на проведение исследований, а также может оказывать потенциально вредное воздействие на морскую фауну.

Решение данной проблемы возможно при переходе к пассивной акустической томографии, основанной на теоретически обоснованном [4–9] способе оценки функции Грина для двух разнесенных в пространстве точек с помощью взаимной корреляции диффузных шумовых полей, принятых в этих точках. В такой по-

становке становится возможным использование собственных шумов океана в качестве источника, в результате чего возникает возможность отказаться от низкочастотных излучателей. Однако при этом существует необходимость длительного времени накопления шумов, что осложнено нестационарностью условий в акватории и создает сложности для осуществления мониторинга в реальном времени [6]. Различные оценки дают величины приемлемой длительности записи шумового сигнала порядка суток [7] или даже месяца [8], что превышает время динамических изменений параметров океана, представляющих интерес в гидроакустических приложениях.

Как было показано ранее [5], перспективным направлением развития методов пассивной акустической томографии океана является использование комбинированных приемных модулей (КПМ) [10], содержащих приемник звукового давления и векторный приемник и позволяющих регистрировать как скалярные, так и векторные характеристики акустических полей. В этом случае удается извлечь из ограниченной области пространства значительно больший объем информации по сравнению с одиночным приемником давления, в том числе осуществить прямые измерения потока акустической мощности и выделить ту ее часть, которая обусловлена анизотропией поля, измерить спектральные уровни колебательной скорости частиц, оценить их разностно-фазовые характеристики. Более того, поскольку каждый векторный канал является естественным диполем, появляется воз-

*E-mail: medvedeva.ev15@physics.msu.ru

возможность определения местоположения источника звука и формирования характеристики направленности для приемного модуля [11].

Согласно теоретическим оценкам и предварительным экспериментальным результатам, формирование характеристик направленности позволяет значительно увеличить соотношение сигнал/шум на выходе коррелятора при оценке функции Грина из функции взаимной корреляции шумов моря [5], то есть, сократить время накопления шумового сигнала, необходимое для реализации пассивной томографии. В виду того, что основной вклад в оценку функции Грина дают шумы, распространяющиеся преимущественно вдоль линии, соединяющей точки приема шумового сигнала, то, выделяя из всех направлений приходов шумовых полей только это основное направление, можно добиться заметного увеличения отношения сигнал/помеха. Выделение нужного направления регистрации акустической волны в простейшем случае возможно при формировании кардиоидной характеристики направленности КПМ, в двухмерном случае имеющей вид:

$$U_c = p + \rho c (v_x \cos \varphi + v_y \sin \varphi), \quad (1)$$

где p , v_x , v_y — сигналы с выходов приемника давления и горизонтальных каналов векторного приемника, соответственно (для сокращения объема текста аргументы функций опущены); ρ и c — плотность и скорость звука в водном слое; азимутальный угол φ характеризует направление максимума кардиоиды. В рассматриваемом случае для каждого из приемных модулей значение φ должно быть таким, чтобы максимум кардиоиды оказался развернут в направлении на противоположный приемник. Такая конфигурация позволяет выделить шумы, распространяющиеся в основном вдоль линии, соединяющей точки приема, и, в конечном счете, добиться улучшения отношения сигнал/помеха по сравнению с использованием одиночных ненаправленных приемников. Сложность практической реализации описанного подхода заключается в том, что для выбора нужного направления φ необходимо знать то, как сориентированы относительно друг друга горизонтальные каналы двух установленных на дно акватории приемных модулей. В реальных условиях взаимная ориентация каналов является неизвестной величиной, так как при установке на дно приемник может поворачиваться под действием течений. Как правило, с приемлемой точностью удается гарантировать вертикальную направленность векторного приемника, однако то, как будут ориентированы горизонтальные каналы, сказать заранее нельзя. В связи с этим применяются дополнительные процедуры по оценке ориентации каналов: работа водолазов для непосредственного контроля на не сильно глубокой воде; использование дополнительных компасов, позволяющих говорить об ориентации каналов относительно направления на Север; контролируемые взрывы или дополнительные источники вблизи установки КПМ.

В работе рассматривается алгоритм восстановления

взаимной ориентации каналов, который требует лишь того, чтобы после спуска приемных модулей за борт судно-установщик прошло вдоль прямой линии мимо КПМ с известной постоянной скоростью. Кроме того, необходимо знать расстояние между КПМ, определенное, например, по GPS координатам точек установок. Такой алгоритмический способ восстановления ориентации каналов позволяет упростить техническую сторону эксперимента.

Для реализации обсуждаемого алгоритма требуется предварительная оценка пеленга на звуковой источник (судно) в момент траверза. Еще один фактор, который требуется учитывать при реализации рассматриваемого подхода — это сильное пространственное затухание звука в условиях мелководья, связанное с интенсивным взаимодействием распространяющейся акустической волны с дном. Это накладывает ограничения на дальность прохода судна относительно рассматриваемых КПМ. Для экспериментальной проверки работоспособности алгоритма используются записи шумового поля одиночного судна, проходившего мимо КПМ в ходе измерений на гидроакустическом полигоне МГУ летом 2018 г. Ниже, после описания эксперимента, приводятся результаты оценки пространственной анизотропии шумового поля, а также значений пеленгов на проходящее судно как на звуковой источник. Далее анализируются особенности пространственного убывания различных составляющих акустического поля. В завершение, полученные результаты используются для экспериментальной апробации обсуждаемого алгоритма восстановления взаимной ориентации каналов КПМ.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные работы проводились в акватории Клязьминского водохранилища на гидроакустическом полигоне МГУ в июне 2018 г. [12]. Из предыдущих исследований, осуществленных на полигоне, известно [13], что место проведения работ характеризуется сложными условиями распространения, вызванными в том числе присутствием в дне акватории газонасыщенного слоя ила, что приводит к существенному уменьшению скорости звука в дне до величин ≈ 100 м/с и значительному поглощению сигналов при распространении.

В ходе проведения эксперимента регистрация сигналов проводилась с помощью двух комбинированных приемных модулей КПМ №1 и №2, осуществлявших одновременное измерение звукового давления и трех взаимно ортогональных составляющих колебательной скорости шумового поля. Далее по кабелям аналоговый сигнал поступал на АЦП, запись преобразованного цифрового сигнала велась с помощью программного обеспечения персонального компьютера.

В ходе проведения эксперимента (рис. 1) на дно Клязьминского водохранилища на глубину порядка

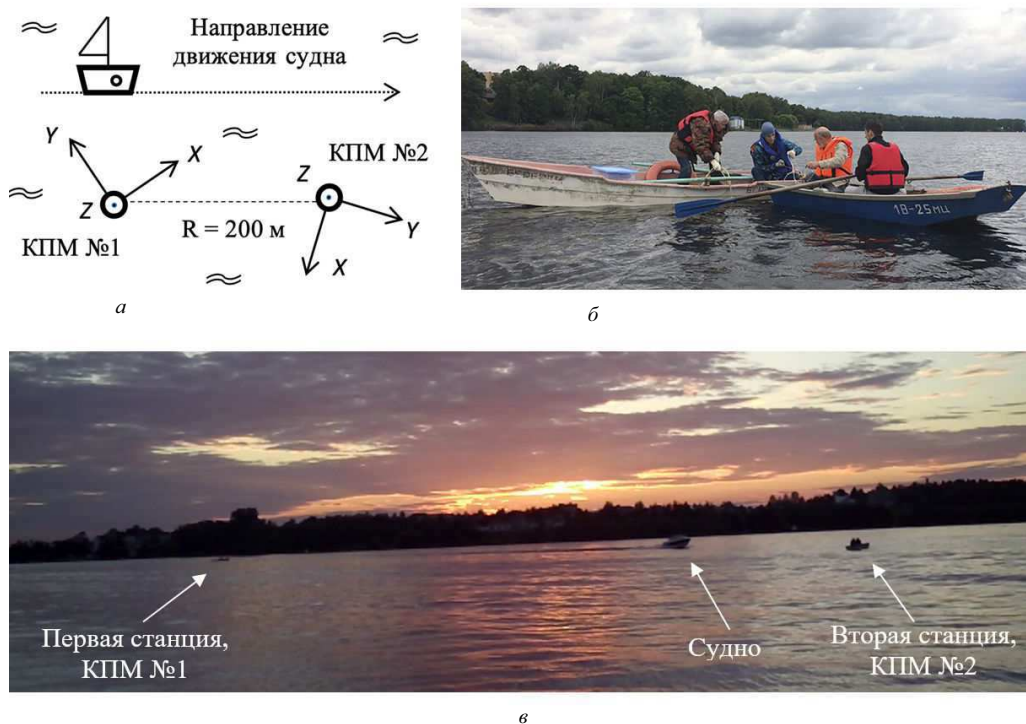


Рис. 1: Схематическое изображение (вид сверху) эксперимента по измерению шумового сигнала судна с помощью двух комбинированных приемных модулей (КПМ №1 и №2) (а); изображение момента установки одного из КПМ на дно (б), а также расположение двух лодок и проходящего мимо судна (в)

8 м, на расстоянии 200 м друг от друга с борта двух закоренных лодок, непосредственно на которых размещалось записывающее оборудование, были установлены КПМ №1 и №2. Взаимная ориентация их x каналов впоследствии была восстановлена и составила $\approx 144^\circ$. Расстояние от КПМ №2 до проходящих мимо судов в разные моменты фиксировалось с помощью лазерного дальномера. Параллельно велась запись на видеорегистратор, установленный на берегу. Для дальнейшего анализа был выделен отрезок записи, на котором четко прослеживается шумовой сигнал от одиночного судна; максимальное расстояние, для которого проводилась регистрация местоположения судна, составляла 160 м, минимальное 70 м (траверз).

2. ОЦЕНКА ПЕЛЕНГА НА ДВИЖУЩИЙСЯ ИСТОЧНИК

В качестве пеленга $\varphi(t)$ рассматривается угол направления на судно относительно ориентаций каналов x КПМ №1 и №2 как функция времени наблюдения t . Оценка $\varphi(t)$ проводилась на основании расчетов проекций потоков акустической мощности [11]: $\varphi(t) = \frac{W_{Ry}}{W_{Rx}}$, где $W_{Rj} = \frac{1}{4} (PV_j^* + P^*V_j)$ — активные составляющие проекций потоков акустической мощности на направление j (соответствующее x и y) выделенные в полосе частот 500–900 Гц, в которой сосредото-

чена основная энергия сигнала. На рис. 2 изображены полученные оценки пеленгов, а также моменты траверза, зафиксированные с помощью дальномера. Эти моменты времени также хорошо согласуются с временами, на которых наблюдаются максимумы амплитуды давления на КПМ, соответствующие минимальному удалению до судна. Ошибка результатов оценки $\varphi(t)$, представленных на рис. 2, рассчитанная как среднеквадратичное отклонение значений пеленгов, полученных для различных параметров усреднения шумового сигнала, составила примерно $3-4^\circ$, что является приемлемым результатом [11]. Итоговое значение $\varphi(t)$ на траверзе оказалось равным $\approx 316^\circ$ для КПМ №1 и $\approx 188^\circ$ для КПМ №2.

Для проверки полученных результатов оценки $\varphi(t)$, была проведена дополнительная обработка экспериментальных данных, позволяющая оценить пространственную анизотропию шумового поля. В рассматриваемом случае присутствия интенсивного источника, максимум гистограммы должен совпадать с полученной оценкой пеленга на траверзе.

Была получена картина пространственной анизотропии шумов акватории при наличии движущегося источника в соответствии с алгоритмом, представленным в работе [14]. Оценивать анизотропию шумового поля в акватории с большой точностью удобно при помощи построения гистограмм интенсивности в заданном частотном диапазоне. Выбранная полоса частот при этом

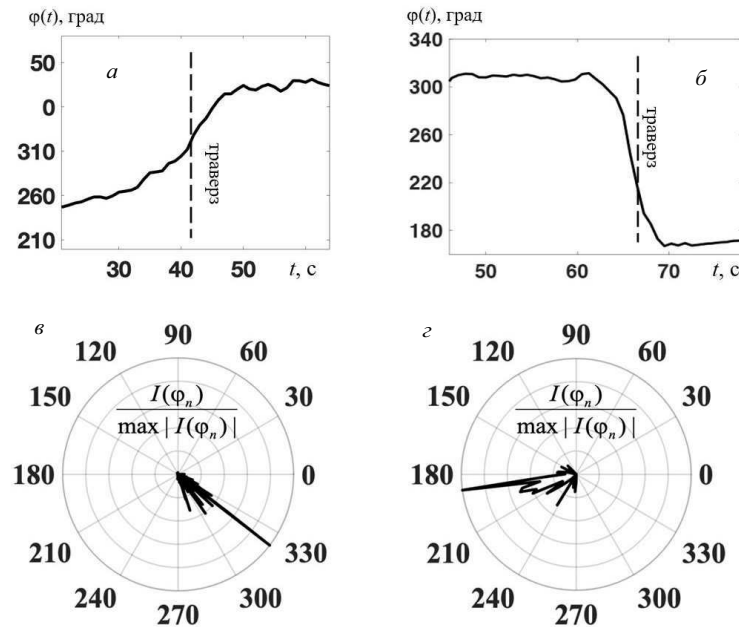


Рис. 2: Оценка пеленга на судно по мере его движения относительно КПМ №1 (а) и КПМ №2 (б); пространственная анизотропия шумов акватории в полярных координатах при прохождении судна мимо КПМ №1 (в) и мимо КПМ №2 (г)

разбивается на N различных дискретных составляющих f_i , для каждой из которых рассчитывается значение азимутального угла φ_i , а также значение интенсивности как сумма модулей составляющих вектора потока акустической мощности по формулам [14]:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_i &= \frac{W_{Ry,i}}{W_{Rx,i}}, \\ I(f_i, \varphi_n) &= \sqrt{W_{Rx,i}^2 + W_{Ry,i}^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Далее, диапазон углов от 0 до 360° разбивается на M секторов $\Delta\varphi_0$, после чего строится гистограмма для суммарных интенсивностей $I(\varphi_n)$ сигнала, попадающего в каждый из секторов:

$$I(\varphi_n) = \sum_{i=1}^N I(f_i, [n-1]\Delta\varphi_0 \leq \varphi_i < n\Delta\varphi_0), \quad (3)$$

где $\varphi_n = \Delta\varphi_0 \left(n + \frac{1}{2}\right)$, $n = 1, 2, \dots, M$. Для оценки относительно стационарных в пространственно-временной области уровней источников сигнала гистограмма строится по усложненному алгоритму: в каждую угловую ячейку с номером i , характеризующую средним значением угла пеленга φ_i , попадают $I(\varphi_i)$, определяемые из условия:

$$I_i = \{I(\varphi_i) - I(180^\circ + \varphi_i) + |I(\varphi_i) - I(180^\circ + \varphi_i)|\} / 2.$$

В таком случае изотропная составляющая быстро убывает уже при небольших временах усреднения, оставляя только стационарные в пространстве и времени анизотропные составляющие шумовых источников.

На основе (3) была получена оценка зависимости углового распределения интенсивности шумов акватории при наличии проходящего судна. Весь временной промежуток из выбранного отрезка записи длительностью 80 с был профильтрован в полосе частот 500–900 Гц и разбит на 160 частотных поддиапазонов по 5 Гц, для каждого из которых было рассчитано усредненное значение пеленга и интенсивности. Диапазон углов от 0 до 360° при таких параметрах был разбит на 160 секторов по 2.25°. В результате обработки была получена картина пространственной анизотропии шумового поля, изображенная на рис. 2в, г, где можно наблюдать увеличение интенсивности по мере приближения шумового источника к КПМ №1 и №2, которая достигает максимального значения в направлении, составляющем $\approx 318^\circ$ и $\approx 189^\circ$ с точностью до $\pm 2.25^\circ$ (рис. 2в, г). Таким образом, направления на максимумы интенсивности (рис. 2в, г) совпадают в пределах погрешности со значениями пеленга на источник в моменты траверза судна относительно КПМ (рис. 2а, б), что подтверждает достоверность полученных оценок $\varphi(t)$.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО УБЫВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Полученные ранее оценки $\varphi(t)$ зависимости пеленга на источник от времени позволяют учесть диаграммы направленности каналов векторного приемника и рассчитать пространственное затухание векторных составляющих акустического поля. Анализ про-

водился в полосе частот 500–900 Гц, где преобладает шумовой сигнал проходящего судна. Были рассчитаны относительные уровни пространственного убывания $L(r)$ [15] различных составляющих звукового поля в зависимости от расстояния r между КПМ №2 и источником звука:

$$L(r) = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{g^2(r, t)}{g_0^2} dt \right],$$

где в качестве функции $g(r, t)$ выбираются значения давления $p(r, t)$, проекций колебательной скорости $V_x(r, t)$, $V_y(r, t)$, или $V_z(r, t)$; $V_x(r, t) = v_x(r, t) / \cos \varphi(t)$, $V_y(r, t) = v_y(r, t) / \sin \varphi(t)$ — значения компонент колебательной скорости $v_x(r, t)$, $v_y(r, t)$, на x и y выходах КПМ с учетом их диаграмм направленности; $\varphi(t)$ — значения пеленга на источник в горизонтальной плоскости, оцененные ранее; t_1 и t_2 — времена начала и окончания записи сигналов на заданном расстоянии r ; $g_0^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} g^2(r_0, t) dt$, где r_0 — минимальное расстояние до источника.

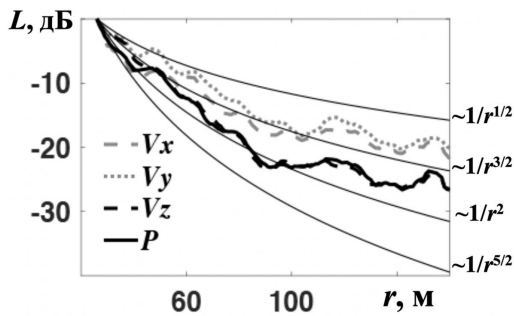


Рис. 3: Относительные уровни убывания давления и трех взаимно ортогональных составляющих вектора колебательной скорости шумового источника. Тонкими сплошными линиями обозначены аналитические зависимости

На рис. 3 можно наблюдать различный характер пространственного убывания амплитуд звукового давления и проекций колебательной скорости. Относительные уровни для $p(r, t)$ и $V_z(r, t)$ ведут себя практически одинаково, в то время как $V_x(r, t)$ и $V_y(r, t)$ убывают заметно медленнее. При увеличении расстояния до источника характер убывания становится более плавным, соответствуя значениям между $\sim 1/r^{1/2}$ и $\sim 1/r^{3/2}$ для компонент $V_x(r, t)$ и $V_y(r, t)$; значениям между $\sim 1/r^{3/2}$ и $\sim 1/r^2$ для компонент $p(r, t)$ и $V_z(r, t)$. Высокая скорость затухания различных составляющих шумового поля объясняется особенностью строения дна водохранилища, в частности, наличием газонасыщенного слоя ила, существенно поглощающего звук. Также на рис. 3 наблюдаются заметные вариации уровней для всех рассматриваемых составляющих звукового поля, обусловленные интерференцией звука в мелком водоеме. Результаты, представленные на рис. 3, в качестве источника демонстрируют необходимость учета ожидаемого пространственного убывания звука в месте проведения

экспериментальных работ для адекватного выбора расстояния между КПМ и движущимся источником. С одной стороны, это расстояние не должно быть слишком малым, так как присутствие интенсивного источника может привести к перегрузке приемного тракта КПМ в виду ограниченного динамического диапазона. С другой стороны, расстояние должны быть таким, чтобы обеспечить высокое значение отношения сигнал/помеха для адекватной оценки пеленга и последующей оценке взаимной ориентации каналов двух рассматриваемых КПМ.

4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ОРИЕНТАЦИИ КАНАЛОВ РАЗНЕСЕННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ ВЕКТОРНЫХ ПРИЕМНИКОВ

Обозначим значения пеленгов в моменты траверза судна t_1 и t_2 как φ_1 и φ_2 . Для оцененных φ_1 и φ_2 , а также при известном расстоянии между станциями R (определяется по координатам точек установки КПМ, взятым, например из GPS данных), минимальном расстоянии от КПМ №2 до судна в момент траверза r , а также в случае известной скорости движения судна v , возможно аналитически восстановить взаимную ориентацию каналов горизонтальных проекций колебательной скорости из простых геометрических соображений (рис. 4):

Пусть известен промежуток времени, за который судно преодолело расстояние между приемниками $\Delta t = t_2 - t_1$ (это время может быть оценено как время между максимумами давления на двух КПМ). Путь судна за время Δt составит $L = \Delta t \cdot v$. Введем вспомогательные величины: $\Delta r = \sqrt{R^2 - L^2}$, $\alpha_1 = -\varphi_1$, $\beta_1 = \arctg(L/\Delta r)$, $\beta_2 = \arctg(\Delta r/L)$, $\theta_1 = \beta_1 + \alpha_1$. Тогда (рис. 4) $\varphi_1 + \gamma = \varphi_2$, где $\gamma = 360^\circ - 90^\circ - \beta_2 - \theta_1$ — угол, определяющий взаимную ориентацию каналов векторного приемника.

Несмотря на простоту аналитических соотношений и очевидный геометрический смысл предлагаемого алгоритма, требуется его аккуратная реализация. Предварительно требуется оценить пеленг, что является непростой задачей в условиях мелководья в силу наличия большого количества переотражений сигналов от дна и поверхности водного слоя. Также следует учитывать повышенное пространственное затухание звукового поля в условиях мелкого моря, что накладывает ограничения на применимость обсуждаемого подхода по дальности между КПМ и источником.

Для условий рассматриваемого эксперимента расстоянию между станциями $R = 200$ м, минимальном расстоянии от КПМ №2 до судна в момент траверза $r = 26$ м, а оценка скорости движения судна, полученная путем линейной аппроксимации данных о расстоянии до источника относительно КПМ №2 составила $v \approx 6.5$ м/с. На основе этих данных можно восстановить угол между направлениями x -каналов двух векторных приемников: в момент времени $t_1 =$

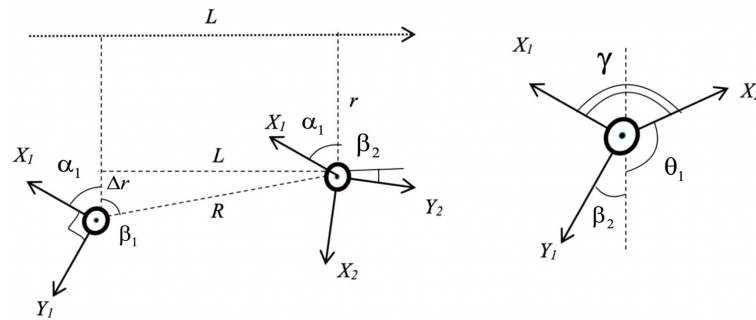


Рис. 4: Геометрическая схема восстановления ориентации каналов x_1 и y_1 КПМ №1, x_2 и y_2 КПМ №2

40.5 с, $\varphi_1 = -37^\circ$ и $\varphi_2 = -50^\circ$; в момент времени $t_2 = 68.5$: $\varphi_1 = 26^\circ$, $\varphi_2 = -178^\circ$; что дает значение $\Delta t = t_2 - t_1 = 28$ с.

Путь судна за время Δt составил $L = \Delta t \cdot v = 182$ м, откуда $\Delta r \approx 83$ м, $\alpha_1 = 37^\circ$, $\beta_1 \approx 65^\circ$, $\beta_2 \approx 24^\circ$, $\theta_1 \approx 102^\circ$. Тогда (см. рис. 4) $\gamma = 360^\circ - 90^\circ - \beta_2 - \theta_1 = 144^\circ$. Таким образом, оцененный с помощью обсуждаемого алгоритма поворот КПМ №2 относительно КПМ №1 составил $\approx 144^\circ$, что согласуется с наблюдавшимся в эксперименте смещением КПМ при их установке на дно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были разработаны алгоритмы обработки сигналов с векторно-скалярных приемников, позволяющие проводить оценку пеленга на движущийся шумовой источник, а также исследовать пространственную анизотропию шумового поля с последующей оценкой взаимной ориентации каналов КПМ. Проведена экспериментальная апробация разработанных алгоритмов с использованием данных натурального эксперимента, проведенного в акватории Клязьминского водохранилища на гидроакустическом полигоне МГУ в летний период, показавшая работоспособность предложенного подхода. Такой алгоритмический способ восстановления ориентации каналов позволяет заметно упростить техническую сторону эксперимента, использующего разнесенные в пространстве векторные приемники.

Рассчитано пространственное затухание трех ортогональных составляющих колебательной скорости (с

учетом диаграмм направленности каналов векторного приемника) и поля давления в полосе частот, где преобладает шумовой сигнал проходящего судна. Выявлен различный характер убывания для горизонтальных компонент колебательной скорости в сравнении с давлением и вертикальной компонентой.

Полученные в ходе проведенных натурных измерений данные в совокупности с алгоритмами обработки, численно реализованными и апробированными в настоящей работе, являются основой для развития методов пассивной томографии мелкого моря, использующей векторно-фазовые методы измерений. Перспективной является корреляционная обработка шумов с учетом формирования кардиоиды на каждом комбинированном приемном модуле с целью задания выделенных направлений для приема гидроакустических шумовых полей. Также определенный интерес представляет исследование возможностей использования пространственного убывания шумового поля в акватории для оценки характеристик волновода. Полученные в работе характерные вариации уровней давления и компонент колебательной скорости, вызванные интерференционными эффектами, указывают на принципиальную реализуемость этой возможности.

Авторы выражают благодарность участникам эксперимента на Клязьминском водохранилище В. А. Рожкову, А. В. Григорьеву, И. Р. Сабирову, О. С. Красулину и П. Ю. Муханову за помощь в организации и проведении полевых измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-70034, а также гранта Президента РФ для научных школ № НШ 5545.2018.5.

[1] Munk W., Worcester P., Wunsch C. Ocean Acoustic Tomography. Cambridge University Press, 1995. 433 p.
[2] Гончаров В.В., Зайцев В.Ю., Куртенов В.М., Нечаев А.Г., Хилько А.И. Акустическая томография океана. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997.
[3] Веденев А.И., Гончаров В.В., Муханов П.Ю., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. // Ученые записки физ. ф-та

Моск. ун-та. 2017. № 5. 1750107.
[4] Godin O. A. // Phys. Rev. Lett. 2006. **97**. 054301.
[5] Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. // Акустический Журнал. 2008. **54**, №1. С. 51.
[6] Гринюк А.В., Кравченко В.Н., Муханов П.Ю., Сабиров И.Р., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. // Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та. 2017. № 5. 1750113.

- [7] *Zabotin N. A., Godin O. A.* // Acta Acust. U. Acust. 2011. **97**. P. 44.
- [8] *Курьянов Б. Ф.* // Доклады XI школы-семинара акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещённой с XVII сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2006. С. 179.
- [9] *Brooks L. A., Gerstoft P.* // J. Acoust. Soc. Am. 2009. **125**. P. 723.
- [10] *Гончаренко Б. И., Гордиенко В. А.* Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1994. **35**, № 6. С. 93.
- [11] *Гордиенко В. А.* Векторно-фазовые методы в акустике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
- [12] *Медведева Е. В.* // XXVI Международная конференция «Ломоносов-2019». Секция «Физика». Сб. тезисов. Подсекция «Акустика». М.: Физ. ф-т МГУ, 2019. С. 22.
- [13] *Рожин Ф. В., Тонаканов О. С.* Общая гидроакустика. М.: Издательство Московского университета, 1988.
- [14] *Гордиенко В. А., Гордиенко Т. В., Краснописцев Н. В., Некрасов В. Н.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2014. № 2. С. 3.
- [15] *Гончаренко Б. И., Веденев А. И., Муханов П. Ю., Шуруп А. С.* // Известия РАН. Сер. Физ.. 2019. **83**, № 1. С. 96.

Investigation of the vector-phase structure of the sound field at the hydroacoustic polygon of Moscow State University for the purposes of passive tomography

E. V. Medvedeva^{1,a}, B. I. Goncharenko¹, A. S. Shurup^{1,2,3}

¹*Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*P. P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia*

³*The Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

E-mail: ^amedvedeva.ev15@physics.msu.ru

The results of field measurements data processing of the sound field vector-phase structure are presented. The data was obtained during the experiment at the hydroacoustic polygon of Moscow State University in the summer of 2018, in which two separated in space combined receiving modules, containing a sound pressure receiver and a vector receiver, have recorded a noise field in the presence of an active shipping. On the basis of synchronized pressure recordings and three mutually orthogonal projections of the oscillatory velocity, the spatial anisotropy and decay of the noise field are estimated. Additionally, the bearing values for the passing vessel as a sound source are estimated. The obtained results are used for experimental approbation of the algorithm, which allows to reconstruct the mutual orientation of the vector receiver channels installed at the bottom of the water area in different geographical points. The proposed approach allows us to simplify the technical side of conducting experiments with spaced combined receiver modules, since it does not require additional procedures to control the orientation of the vector receiver channels when they are installed on the bottom of the water area. The results obtained can be used in constructing the schemes of passive tomography of shallow seas, with simplified requirements for their practical implementation.

PACS: 43.60.+d, 43.58.+z.

Keywords: vector-phase measurement methods, spatial anisotropy and decay of the noise field in a shallow water, passive acoustic tomography

Received 2019.

Сведения об авторах

1. Медведева Елена Владимировна — студентка; тел.: (499) 939-30-81, e-mail: medvedeva.ev15@physics.msu.ru.
2. Гончаренко Борис Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (499)939-29-69, e-mail: goncharenko@phys.msu.ru.
3. Шуруп Андрей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (499) 939-30-81, e-mail: shurup@physics.msu.ru.