

Лазерная адаптивная векторно-фазовая гидроакустическая измерительная система

Р.В.Ромашко, Ю.Н.Кульчин, Д.В.Стороженко, М.Н.Безрук, В.П.Дзюба

Разработана и экспериментально реализована адаптивная лазерная векторно-фазовая гидроакустическая измерительная система, которая обеспечивает определение полного вектора акустической интенсивности. Приемный элемент системы состоит из шести разнесенных в пространстве волоконно-оптических катушечных датчиков. Фазовая демодуляция сигналов, полученных на выходе датчиков, осуществляется с помощью шестиканального адаптивного голографического интерферометра, построенного на основе фоторефрактивного кристалла CdTe, в котором формируются шесть динамических голограмм. Проведены экспериментальные исследования разработанной измерительной системы для определения пеленга и локализации источника слабого гидроакустического поля.

Ключевые слова: волоконно-оптический сенсор, адаптивный интерферометр, динамическая голограмма, фоторефрактивный кристалл, гидрофон, векторно-фазовый приемник, акустический пеленг.

1. Введение

Решение таких задач, как мониторинг морских и океанических акваторий, освещение подводной обстановки и ряда других требует использования высокочувствительных средств регистрации слабых гидроакустических сигналов [1–4]. В настоящее время наиболее широко используются гидроакустические приемники на основе электрических преобразователей (пьезоэлектрические, электродинамические, емкостные и т. д.) [5, 6]. Однако такие приемники имеют ряд недостатков, которые в определенных случаях существенно ограничивают возможность регистрации с их помощью слабых гидроакустических сигналов. Альтернативой электрическим гидрофонам служат оптические и волоконно-оптические приемники, получившие в последнее время значительное развитие [7, 8]. В отличие от традиционных электрических приемников, оптоволоконные сенсоры нечувствительны к электромагнитным помехам, способны выдерживать высокие температуры и работать в агрессивных средах, что обуславливает широкий интерес к их применению при построении гидрофонов. Кроме того, использование в таких приемниках интерферометрических принципов детектирования позволяет регистрировать сверхслабые сигналы благодаря потенциально высокой чувствительности оптического интерферометра [9–12]. В свою очередь методы адаптивной интерферометрии на основе двухволнового взаимодействия на динамических голограммах, записываемых в фоторефрактивном кристалле

(ФРК) [13–16], позволяют исключить внутреннюю нестабильность оптического интерферометра [17] и проводить с его помощью измерения сверхмалых физических величин, таких как наномасштабные перемещения, колебания и вибрации, сверхмалые деформации и др. при наличии внешних шумовых факторов (случайные механические воздействия, промышленные шумы, дрейф температуры и пр.) [18–24]. Методы адаптивной интерферометрии нашли также применение для регистрации слабых акустических сигналов в задачах неразрушающего контроля [25–29], для акустических [30–33], сейсмоакустических [34, 35] и гидроакустических измерений [36–38], причем в этих работах измерению подлежал скалярный параметр акустического поля – акустическое давление. Вместе с тем для решения ряда прикладных задач, в частности для определения пеленга или локализации источника акустического сигнала, недостаточно информации только о величине акустического давления. Здесь с успехом может быть применен векторно-фазовый подход, суть которого заключается в регистрации наряду с акустическим давлением также и колебательной скорости частиц среды (или градиента акустического давления), что, в свою очередь, позволяет определить вектор акустической интенсивности, несущий информацию о местоположении источника [39–41]. Для нахождения полного градиента акустического давления необходимо обеспечить измерение акустического давления в трех парах точек, разнесенных по трем ортогональным направлениям на некоторое расстояние друг от друга. Такой подход при построении векторного гидрофона был применен в работе [42], где в качестве фазового демодулятора использовались три волоконно-оптических интерферометра, построенных по схеме Майкельсона. Стабилизация и шумоподавление в таком гидрофоне заключаются в регистрации отдельного фазового сигнала, наведенного шумовым воздействием на плечи интерферометра, и в вычитании его из выходного фазового сигнала интерферометра. Для этого в конструкции гидрофона присутствует дополнительный опорный датчик, изолированный от внешних воздействий. При этом

Р.В.Ромашко, Ю.Н.Кульчин, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5; Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690922 Приморский край, остров Русский, пос. Аякс, 10; e-mail: romashko@iacp.dvo.ru

Д.В.Стороженко, М.Н.Безрук, В.П.Дзюба, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5

Поступила в редакцию 14 декабря 2020 г.

стабильность выходного сигнала гидрофона продемонстрирована лишь в течение короткого времени (2 мин), что не позволяет судить о долговременной стабильности гидрофона. В работе [43] на основе двухканального адаптивного интерферометра был реализован лазерный адаптивный гидроакустический интенсивметр, позволяющий регистрировать одну из трех проекций вектора акустической интенсивности на выбранное направление. В то же время для определения полного вектора акустической интенсивности акустическое давление следует измерять одновременно в шести точках, что обуславливает необходимость использования адаптивного интерферометра с числом каналов не менее шести. В работе [44] экспериментально показано, что в одном ФРК в ортогональной геометрии двухволнового взаимодействия может быть сформировано шесть и более динамических голограмм, при этом каналы адаптивного интерферометра работают независимо друг от друга, а уровень перекрестных помех между ними не превышает уровня собственных шумов интерферометра.

В настоящей работе предложена, экспериментально реализована и исследована лазерная адаптивная векторно-фазовая гидроакустическая измерительная система (ВФАИС), в которой приемный элемент состоит из шести волоконно-оптических датчиков катушечного типа, а формируемые датчиками сигналы демодулируются с помощью шестиканального адаптивного голографического интерферометра на основе динамических голограмм, записанных в одном ФРК. Экспериментально показано, что ВФАИС обеспечивает определение полного вектора акустической интенсивности. В работе проведено апробирование ВФАИС для определения пеленга и локализации источника слабого гидроакустического поля.

2. Вектор акустической интенсивности

Вектор плотности потока акустической энергии I (вектор акустической интенсивности) определяется в частотной области как реальная часть произведения акустического давления $p(\omega)$ и вектора колебательной скорости $V(\omega)$ [39]:

$$I(\omega) = 0.5 \operatorname{Re}(p(\omega)V(\omega)), \quad (1)$$

где ω – частота акустического сигнала. Вектор колебательной скорости определяется через градиент давления и плотность среды ρ :

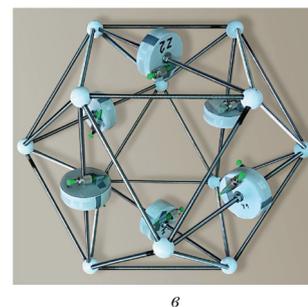
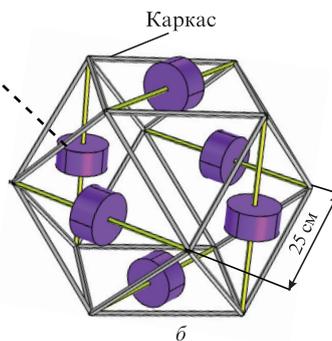
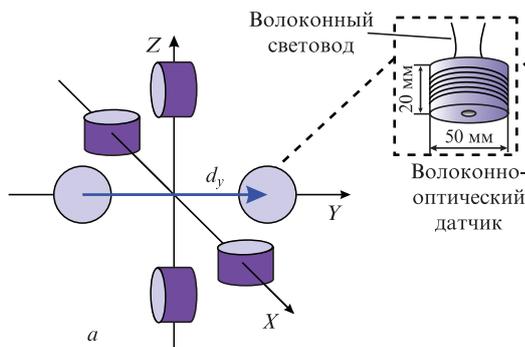


Рис.1. Геометрия расположения волоконно-оптических акустических датчиков в пространстве для измерения вектора акустической интенсивности (из векторов d_x , d_y и d_z показан только вектор вдоль оси Y) (а), а также схема (б) и изображение (в) приемного акустического элемента лазерной адаптивной ВФАИС.

$$V(\omega) = -\frac{dp(\omega)}{i\rho\omega}. \quad (2)$$

С учетом выражений (1) и (2) компоненты вектора $I(\omega) = \{I_x, I_y, I_z\}$ в точке пространства r могут быть представлены в следующем виде:

$$I_j(r) = -\frac{0.5p(r)}{i\rho\omega} \frac{p(r+d_j/2) - p(r-d_j/2)}{d_j}, \quad j = x, y, z, \quad (3)$$

где d_j – вектор, соединяющий две точки в окрестности точки r , разнесенные на расстояние d_j вдоль оси j (рис.1,а). Таким образом, для нахождения вектора $I(\omega)$ необходимо определить акустическое давление в трех парах равноудаленных точек, расположенных на трех ортогональных осях. При этом минимальная длина акустической волны λ_{\min} , которая может быть зарегистрирована таким способом, будет определяться максимальным расстоянием между парами точек, в которых измеряется акустическое давление: $\lambda_{\min} = 6d_0$, где $d_0 = \max\{d_x, d_y, d_z\}$.

3. Архитектура лазерной адаптивной ВФАИС

Схема приемного акустического элемента ВФАИС, обеспечивающего первичную регистрацию акустического сигнала, показана на рис.1,б. Приемный элемент состоит из шести волоконно-оптических датчиков катушечного типа. Основанием каждого датчика служит цилиндр, выполненный из экструдированного пенополистирола XPS, диаметром 50 мм и высотой 20 мм, на который навит многомодовый волоконный световод (диаметр сердцевины 62.5 мкм, числовая апертура $NA = 0.22$) длиной 5 м (30 витков).

Как уже отмечалось, для измерения трех компонент градиента давления необходимо разместить датчики парами на концах отрезков, ориентированных вдоль трех взаимно ортогональных осей пространства X , Y , Z (рис.1,а). Для выполнения этого требования приемный элемент ВФАИС был построен на основе металлического каркаса, имеющего форму кубооктаэдра (рис.1,б, в). Последний, помимо треугольных, имеет три пары квадратных параллельных граней, расположенных так, что их диагонали в каждой паре ориентированы в трех взаимно ортогональных направлениях. На каждой из этих диагоналей было размещено по одному датчику (всего их шесть), что позволило выполнить требуемые пространственные условия (рис.1,а), при этом расстояние d_j между датчиками в каждой паре было одинаковым и составляло 25 см.

Схема адаптивной лазерной ВФАИС показана на рис.2. Излучение Nd:YAG-лазера (длина волны 1064 нм, выходная мощность 1000 мВт, длина когерентности 300 м) проходит через полуволновую фазовую пластинку, поворачивающую плоскость поляризации таким образом, что после прохождения через поляризационный светоделитель излучение делится на сигнальную и опорную световые волны в соотношении 1:5. Затем опорная волна, эллиптически поляризованная после прохождения четвертьволновой пластинки, направляется в ФРК CdTe с размерами $5 \times 5 \times 5$ мм вдоль кристаллографической оси [100]. В свою очередь излучение сигнальной волны посредством волоконно-оптического разветвителя 1×6 дополнительно разделяется на шесть световых волн, направляемых в шесть волоконно-оптических датчиков в составе приемного элемента ВФАИС. Благодаря высокой когерентности излучения расстояние между приемным элементом и адаптивным интерферометром может достигать 100 м, что позволяет разместить приемный элемент ВФАИС на значительном удалении от самой системы. Механические колебания материала оснований датчиков, вызванные воздействием на них акустического давления, приводят к фазовой модуляции излучения сигнальных волн, проходящих по волоконным световодам. Далее фазомодулированное излучение от каждого датчика по отводящим световодам направляется в ФРК вдоль кристаллографической оси [001] ортогонально опорной волне. На входе в кристалл интенсивность каждой из сигнальных волн составляла 1 мВт/мм^2 , опорной – 30 мВт/мм^2 . Векторное взаимодействие эллиптически поляризованной опорной волны с деполаризованными (после прохождения через многомодовые волоконные световоды) сигнальными волнами в такой ортогональной геометрии в ФРК кубической симметрии приводит к записи в нем шести динамических голограмм, при этом дифракция сигнальных волн на голограммах обеспечивает линейное преобразование модуляции фазы в модуляцию интенсивности [45, 46]. С учетом того что модуляция фазы световой волны пропорциональна акустическому давлению, электрические сигналы фотоприемников ФД1 – ФД6, регистрирующие интенсивность излучения по шести кана-

лам на выходе из ФРК, позволяют определить акустическое давление в местах расположения шести датчиков.

Электрический сигнал от каждого фотодетектора, прошедший через фильтр постоянной составляющей и усиленный на 30 дБ, направляется в 12-разрядный АЦП. Затем оцифрованные с частотой дискретизации 50 кГц сигналы обрабатываются с помощью алгоритма, реализованного в программной среде MATLAB®. В соответствии с этим алгоритмом полученные данные последовательно проходят через полосовой фильтр, настраиваемый на полосу частот ожидаемого сигнала, и подвергаются преобразованию Фурье, необходимому для построения комплексного спектра сигнала с периодом усреднения в диапазоне 0.1–4.0 с (в зависимости от условий эксперимента). На основе полученного таким образом комплексного спектра и с учетом предварительно определенной чувствительности измерительной системы рассчитываются значения акустического давления в точках нахождения волоконно-оптических датчиков. Чтобы определить вектор интенсивности с использованием выражения (3), необходимо, помимо измерения акустического давления в шести точках по направлениям X, Y, Z , определить также давление $p(\omega)$ в геометрическом центре приемного элемента ВФАИС. Благодаря тому что все шесть датчиков равноудалены от центра приемного элемента ВФАИС и расстояние между ними не превышает $1/6$ длины волны, давление $p(\omega)$ можно определить как среднее арифметическое от значений давления в точках расположения всех датчиков.

Следует отметить, что поскольку определение вектора интенсивности акустического давления связано с измерением градиента акустического давления, важно, чтобы чувствительность всех каналов ВФАИС была одинаковой. Чувствительность отдельно взятого канала определяется как чувствительностью волоконно-оптического датчика (в составе приемного элемента) к акустическому давлению, так и фазовой чувствительностью адаптивного голографического интерферометра. Чувствительность к акустическому давлению зависит от формы датчика, его геометрических размеров, длины наматываемого оптоволоконка и может различаться от датчика к датчику

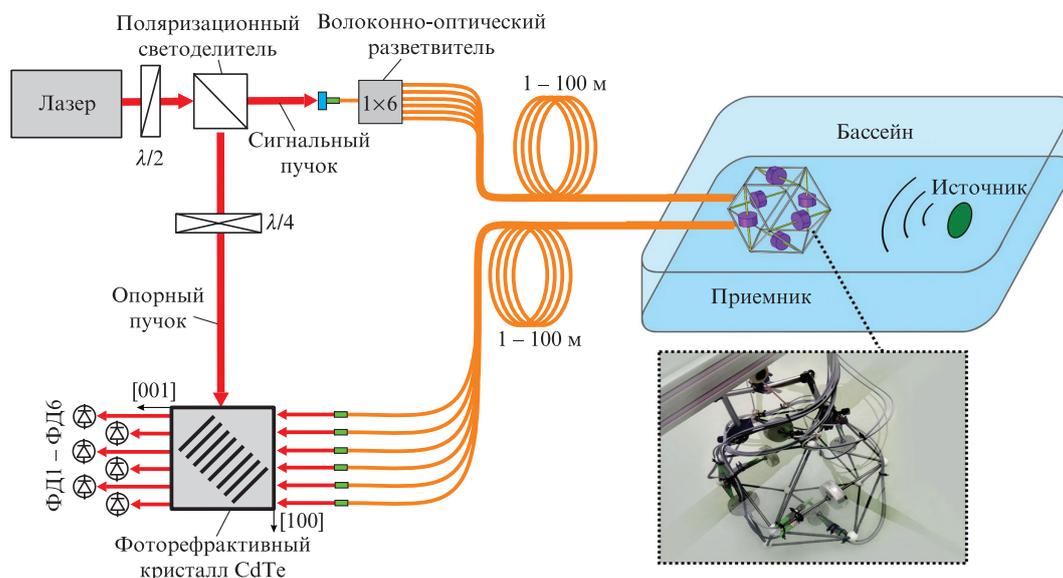


Рис.2. Схема лазерной адаптивной векторно-фазовой акустической измерительной системы. На вставке: фото приемного элемента измерительной системы в бассейне.

ввиду неизбежных отличий их фактических параметров от номинальных. Фазовая чувствительность адаптивного интерферометра в разных каналах также может быть разной в силу ряда причин, таких как неоднородность свойств фоторефрактивного кристалла по его объему (световые пучки в разных каналах попадают в разные участки ФРК), различие амплитуд световых волн на выходе волоконно-оптического разветвителя, а также возможный разброс характеристик фотоприемников.

Чтобы нивелировать эти вариации параметров, в работе применялась двухэтапная калибровка чувствительности каналов адаптивного интерферометра на основе подхода, предложенного в [47] и развитого в [48]. На первом этапе калибровки во все каналы интерферометра вносилась одинаковая фазовая модуляция (калибровочный сигнал) с растущей по линейному закону амплитудой, строилась переходная характеристика и на ее основе определялся калибровочный коэффициент для каждого канала. Такая калибровка позволяла нивелировать различия в чувствительности адаптивного интерферометра к фазовой модуляции. Устранение различий в чувствительности волоконно-оптических датчиков к акустическому давлению достигалось на втором этапе калибровки, в ходе которого каждый датчик помещался в акустическое поле с известным давлением (0.4 Па), а обработка сигналов осуществлялась с учетом уже полученных на первом этапе калибровочных коэффициентов. В итоге, после выполнения полного цикла калибровки, была обеспечена одинаковая чувствительность в каналах ВФАИС, равная 29 ± 0.12 В/Па.

4. Определение пеленга на акустический источник

Для изучения возможности определять с помощью разработанной лазерной адаптивной ВФАИС направление на гидроакустический источник по измеренному вектору акустической интенсивности был проведен эксперимент в лабораторных условиях, имитирующих открытую подводную среду. Для этого использовался испытательный бассейн с размерами $2.6 \times 1.7 \times 0.6$ м, заполненный на 80% пресной водой; бассейн располагался на песчаном основании. Измерения проводились при температуре воды 10°C , скорость звука в которой составляет 1450 м/с [49]. Акустическим источником служил электродинамический излучатель, диаграмма направленности которого

представлена на рис.3. Источник был погружен в воду и находился на одинаковой с приемным элементом ВФАИС глубине – 25 см от дна бассейна.

Поскольку испытания ВФАИС проводились в бассейне ограниченного размера, в котором могут возникать отражения акустических волн от его стенок, необходимо было подобрать условия, при которых таким отражением можно пренебречь; это позволило бы считать, что пеленг на источник сигнала обратен вектору интенсивности. С этой целью в программной среде COMSOL Multiphysics® с использованием модуля Acoustic Toolbox было проведено моделирование акустического поля, создаваемого в ограниченном бассейне. Физический интерфейс данной модели представляет собой решение уравнения Гельмгольца методом конечных элементов в частотной области с идеально согласованным слоем на границе расчетной области, геометрический объем которой составлял 11 м^3 с числом элементов сетки типа тетраэдр 1.1×10^6 . В модели заданы диаграмма направленности использованного гидроакустического источника, плотность пресной воды и скорость звука в ней ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $c = 1450 \text{ м/с}$), заполняющей бассейн, а также грунта ($\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$, $c = 1600 \text{ м/с}$) и окружающего воздуха ($\rho = 1.2 \text{ кг/м}^3$, $c = 343 \text{ м/с}$). В геометрии расчетной области модели были учтены ее размеры ($2.6 \times 1.7 \times 0.48$ м), а также особенности формы реального бассейна [43]. В результате моделирования было установлено, что в диапазоне частот 100–1500 Гц отражение от границ водной среды (стенки бассейна) существенно не влияет на распределение акустического поля, что показано на рис.4,а и 5,а. Таким образом, для испытаний была выбрана рабочая частота акустического источника 900 Гц, для которой длина волны в воде $\lambda = 1.6 \text{ м}$ ($\lambda > \lambda_{\min} = 6d_0 = 1.5 \text{ м}$).

В ходе эксперимента акустический источник при помощи моторизованного транслятора равномерно, со скоростью 2 см/с, и прямолинейно, вдоль оси X , перемещался внутри бассейна из точки x_1 в точку x_2 , расстояние между которыми составляло 1 м (рис.4,а). Приемный элемент ВФАИС был зафиксирован на расстоянии 25 см от линии перемещения источника. Регистрация выходного сигнала ВФАИС велась непрерывно в течение всего времени движения источника (60 с). Из полученного сигнала последовательно выбирались периоды длительностью 0.3 с для вычисления программным алгоритмом давления в шести точках нахождения датчиков. Далее с помощью выражения (3) вычислялся вектор акустической интен-

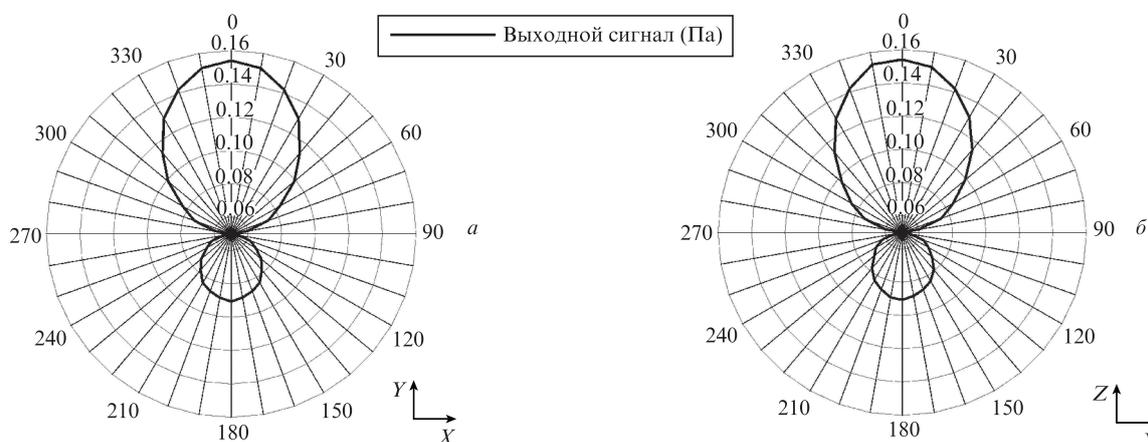


Рис.3. Характеристики угловой направленности электродинамического гидроакустического излучателя на частоте 900 Гц в плоскостях XY (а) и YZ (б).

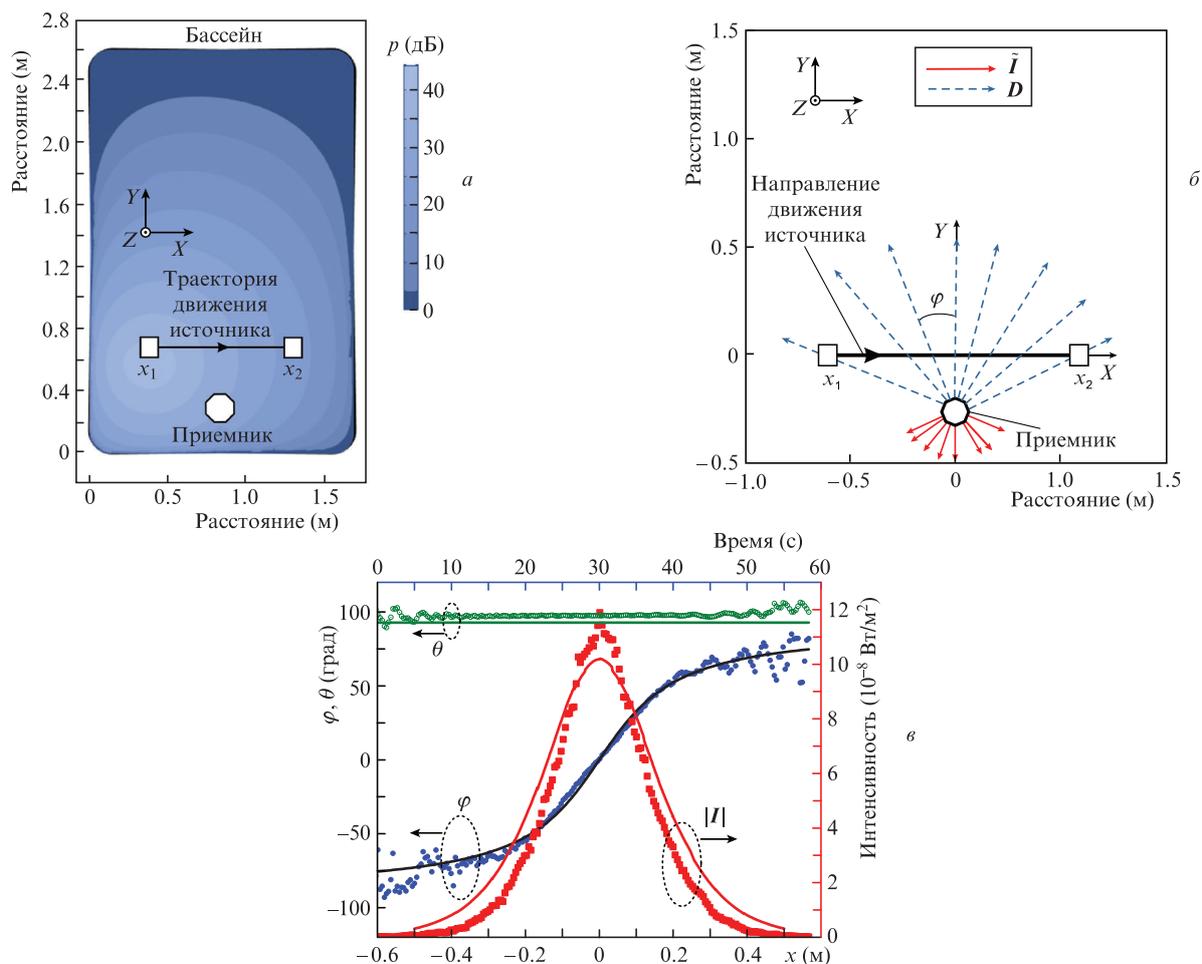


Рис.4. Схема и результаты экспериментальных исследований работы ВФАИС для определения пеленга на движущийся акустический источник: *a* – распределение амплитуды модельного акустического поля в испытательном бассейне на частоте 900 Гц и схема перемещения акустического источника относительно приемника ВФАИС; *б* – экспериментально полученные единичные векторы акустической интенсивности \vec{I} и векторы пеленга \vec{D} на гидроакустический источник (отображены на рисунке без соблюдения взаимного масштаба); *в* – диаграмма модуля вектора интенсивности $|I|$, а также азимутального (φ) и зенитного (θ) углов, задающих вектор пеленга на движущийся гидроакустический источник (точки – экспериментальные данные, сплошные линии – расчетные зависимости).

сивности I ; это позволило определить его в 207 точках положения источника, что соответствует шагу перемещения последнего примерно 5 мм. На рис.4,б изображены полученные таким образом единичные векторы интенсивности $\vec{I} = I/|I|$ и обратные к ним векторы пеленга на источник $\vec{D} = -\vec{I}$. Для наглядности векторы \vec{I} и \vec{D} изображены выборочно – для некоторых положений источника. На рис.4,в показаны рассчитанные и экспериментально полученные с помощью ВФАИС диаграммы азимутального φ (угол между вектором \vec{D} и осью Y) и зенитного θ (угол между вектором \vec{D} и осью Z) углов вместе с модулем вектора интенсивности $|I|$. При этом на диаграмме измеренные зависимости φ и θ составлялись по временным отсчетам (на основе значений компонент вектора I , полученных с помощью ВФАИС в момент времени t), а расчетные – согласно априори известному геометрическому положению источника на оси X в момент измерения t . Как видно из рис.4,в, несмотря на некоторое расхождение значений $|I|$, расчетные и измеренные значения угла φ с достаточно высокой точностью совпадают в диапазоне $\varphi = [-55^\circ, 55^\circ]$, где среднеквадратичное отклонение (СКО) угла равно 3.3° . При больших углах пеленга (более $\pm 55^\circ$) отклонение увеличивалось до 10.4° , что связано с ухудшением отношения сигнал/шум (С/Ш) из-за уменьшения

амплитуды сигнала, вызванного удалением источника с сильной анизотропией диаграммы направленности от приемника. Поскольку в рамках геометрии эксперимента источник и приемник все время находились на одинаковой глубине, то ожидаемое значение зенитного угла θ составляло 90° . На рис.4,в показана полученная с помощью ВФАИС зависимость $\theta(x)$, из которой следует, что экспериментальное значение зенитного угла θ при нахождении источника звука в диапазоне $x = [-0.4 \text{ м}, 0.4 \text{ м}]$, где еще обеспечивается детектируемое отношение С/Ш практически не изменяется и составляет $98^\circ \pm 1^\circ$. Отклонение измеренного θ от расчетного (ожидаемого, 90°) в сторону больших значений, по-видимому, связано с отражением акустической волны от дна бассейна. Следует отметить, что уменьшить ошибки определения углов φ и θ в случае применения ВФАИС при малом отношении С/Ш можно, увеличив длительность усреднения сигнала.

5. Определение местоположения акустического источника

В работе также были проведены экспериментальные исследования ВФАИС для определения локализации акустического источника. Следует отметить, что для этого

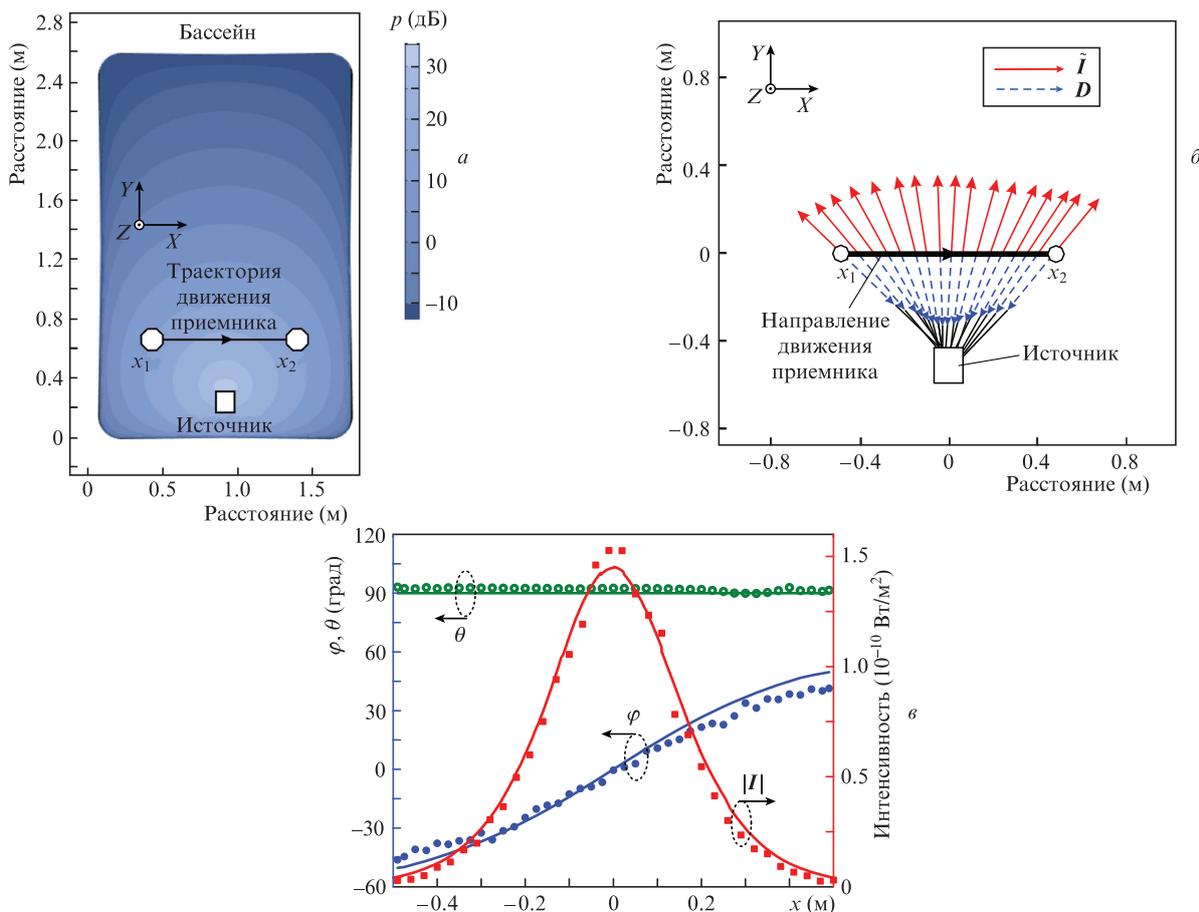


Рис.5. Схема и результаты экспериментальных исследований ВФАИС в задаче локализации неподвижного акустического источника с помощью движущегося приемника: *a* – распределение амплитуды модельного акустического поля в испытательном бассейне с фиксированным источником и траекторией движения приемника; *б* – измеренные единичные векторы интенсивности \vec{I} и векторы пеленга \vec{D} на гидроакустический источник; *в* – диаграмма модуля вектора интенсивности $|I|$, а также азимутального (φ) и зенитного (θ) углов (точки – экспериментальные данные, сплошные линии – расчетные зависимости).

необходимо использовать или несколько приемников, или с помощью одного приемника выполнить измерения в нескольких точках пространства. С этой целью приемный элемент ВФАИС перемещался на расстояние 1 м с шагом 2.5 см вдоль оси X из точки x_1 в точку x_2 относительно неподвижно зафиксированного акустического источника в точке с координатами $x = 0, y = -0.4$ м (рис.5,*a, б*). На каждом шаге приемник останавливался и в течение 2 с измерялся акустический сигнал. На рис.5,*б* построены полученные в результате измерения единичные векторы интенсивности \vec{I} и обратные к ним векторы пеленга на источник \vec{D} . При этом для координат начальной точки каждого вектора \vec{I} было использовано положение приемника в момент измерения.

Показанные на рис.5,*в* диаграммы рассчитанных и измеренных углов φ и θ , представленные совместно с диаграммой модуля вектора интенсивности $|I|$, хорошо совпадают друг с другом. При этом СКО измеренных значений угла φ в диапазоне $[-35^\circ, 35^\circ]$ не превышает 6° . Увеличение СКО до 9° при углах пеленга более $\pm 35^\circ$ связано с уменьшением отношения С/Ш, вызванным удалением приемника от источника, имеющего значительную анизотропию диаграммы направленности. Как видно из рис.5,*б*, большая часть векторов \vec{D} сходится в области, где был размещен источник, что демонстрирует успешное определение его местоположения приемной системой. Используя данные, полученные с помощью ВФАИС, был

также определен зенитный угол θ (рис.5,*в*). При перемещении приемника во всем диапазоне его положений экспериментальное значение угла θ практически не изменялось и составляло $95.5 \pm 1.6^\circ$. Здесь, как и в предыдущем случае (см. рис.4), наблюдается постоянное отклонение измеренных значений угла θ от расчетного (90°) в сторону больших значений, что, по всей видимости, связано с наличием отражения акустической волны от дна бассейна.

6. Заключение

Таким образом, в настоящей работе предложен, создан и исследован новый тип векторно-фазового акустического приемника – лазерная адаптивная векторно-фазовая гидроакустическая измерительная система на основе шестиканального адаптивного голографического интерферометра, построенного с использованием динамических голограмм, записанных в одном фоторефрактивном кристалле, и волоконно-оптических приемников акустических сигналов, пространственно организованных так, чтобы обеспечить регистрацию трех компонент градиента акустического давления. Показано, что данные, регистрируемые с помощью разработанной ВФАИС, позволяют в итоге получить полный вектор акустической интенсивности. Экспериментально продемонстрирована возможность определения с помощью ВФАИС пеленга на движущийся акустический источник в режиме реаль-

ного времени с точностью до 3.3° , а также возможность определения местоположения источника слабого гидроакустического поля. Применение измерительных систем такого типа открывает новые возможности при решении задач, связанных с определением энергетических, межфазовых, когерентных и вероятностных свойств слабых акустических полей, что, в свою очередь, может стать основой для создания новых эффективных алгоритмов обнаружения и способов определения пеленга слабых акустических источников, а также для разработки методов их классификации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-12-00323).

- Howe В.М., Miksis-Olds J., Rehm E., Sagen H., Worcester P.F., Haralabus G. *Front. Marine Sci.*, **6**, 426 (2019).
- Venkatesan R., Tandon A., D'Asaro E., Atmanand M.A. *Observing the Oceans in Real Time* (Springer International Publishing, 2018).
- Моргунов Ю.Н. *Докт. дисс.* (ИАПУ, Владивосток, 2001).
- Лаверов Н.П., Попович В.В., Ведешин Л.А., Коновалов В.Е. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, **14** (3), 141 (2017).
- Свердлин Г.М. *Прикладная гидроакустика* (Л.: Судостроение, 1990).
- Bjørnø L. *Applied Underwater Acoustics* (Amsterdam: Elsevier, 2017).
- Бусурин В.И., Носов Ю.Р. *Волоконно-оптические датчики* (М.: Энергоатомиздат, 1990).
- Udd E. *Fiber Optic Smart Structures* (New York: John Wiley & Sons Inc., 1995).
- Wagner J.W., Spicer J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **4**, 1316 (1987).
- Abbott V.P. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **116** (6), 061102 (2016).
- Беврини Н., Басти А., Боси Ф., Карелли Г., Чампини Д., Ди Вирджилио А., Ферранте И., Фусо Ф., Джакомелли У., Макчиони Э., Симонелли А., Стефани Ф., Террени Г., Алтуччи Ч., Порцио А., Велотта Р. *Квантовая электроника*, **49** (2), 195 (2019) [*Quantum Electron.*, **49** (2), 195 (2019)].
- Гордеев А.А., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Михайлов С.И. *Квантовая электроника*, **49** (9), 878 (2019) [*Quantum Electron.*, **49** (9) 878 (2019)].
- Kamshilin A.A., Petrov M.P. *Opt. Commun.*, **53**, 23 (1985).
- Stepanov S.I., in *International Trends in Optics* (New York: Academic, 1991, Chap. 9).
- Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. *Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике* (СПб: Наука, 1992).
- Шандаров С.М., Буримов Н.И., Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В., Толстик А.Л., Шепелевич В.В. *Квантовая электроника*, **38** (11), 1059 (2008) [*Quantum Electron.*, **38** (11), 1059 (2008)].
- Крылов Г.М., Фатьянов О.В., Дуплинский А.В. *Квантовая электроника*, **50** (5), 447 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (5), 447 (2020)].
- Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N. *J. Appl. Phys.*, **105**, 031101 (2009).
- Romashko R.V., Kulchin Y.N., Girolamo S.D., Kamshilin A.A., Launay J.C. *Key Eng. Mater.*, **381–382**, 61 (2008).
- Ромашко Р.В., Ефимов Т.А., Кульчин Ю.Н. *Квантовая электроника*, **44** (3), 269 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (3), 269 (2014)].
- Romashko R., Efimov T., Kulchin Y. *J. Russ. Laser Resear.*, **37** (1), 102 (2016).
- Stepanov S., Casillas D.G., Cota F.P., Hernández E.H., Sánchez M.P., Montero P.R., in *CLEO/Europe and IQEC 2007 Conference Digest* (USA: Opt. Soc. Am., 2007, paper CC3_3).
- Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Launay J.C. *Opt. Lett.*, **32** (13), 1821 (2007).
- Bryushinin M.A., Kulikov V.V., Petrov A.A., Sokolov I.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N. *Appl. Opt.*, **59** (8), 2370 (2020).
- Ja Y.H. *Opt. Laser Technol.*, **17** (1), 36 (1985).
- Murray Todd W., Tuovinen H., Krishnaswamy S. *Appl. Opt.*, **39**, 3276 (2000).
- Berer T., Hochreiner A., Zamiri S., Burgholzer P. *Opt. Lett.*, **35**, 4151 (2010).
- Bashkov O.V., Romashko R.V., Zaikov V.I., Panin S.V., Bezruk M.N., Khun K., Bashkov I.O. *Russ. J. Nondestruct. Testing*, **53** (6), 415 (2017).
- Jacquot P., Fournier J.M. (Eds) *Interferometry in Speckle Light* (Berlin: Springer Intern. Publ., 2000, pp 171–178).
- Romashko R.V., Kulchin Y.N., Nippolainen E. *Laser Phys.*, **24** (11), 115604 (2014).
- Romashko R.V., Efimov T.A., Kulchin Y.N. *Proc. SPIE*, **10176**, 1017616 (2016).
- Bryushinin M.A., Kulikov V.V., Mokhov E.N., Romashko R.V., Sokolov I.A. *Optik*, **127** (1), 341 (2016).
- Romashko R.V., Bezruk M.N., Ermolaev S.A., Storozhenko D.A., Kulchin Y.N. *Proc. SPIE*, **10176**, 1017612 (2016).
- Каменев О.Т., Петров Ю.С., Хижняк Р.В., Завестовская И.Н., Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **44** (7), 27 (2017) [*Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **44** (7), 202 (2017)].
- Каменев О.Т., Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н. *Лазерные приемники сейсмо- и гидроакустических сигналов* (Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016).
- Ромашко Р.В., Безрук М.Н., Ермолаев С.А., Завестовская И.Н., Кульчин Ю.Н. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **42** (7), 14 (2015) [*Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **42** (7), 201 (2015)].
- Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н., Безрук М.Н., Ермолаев С.А. *Квантовая электроника*, **46** (3), 277 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (3), 277 (2016)].
- Кульчин Ю.Н., Вознесенский С.С., Гамаюнов Е.Л., Голик С.С., Ильин А.А., Каменев О.Т., Никитин А.И., Павлов А.Н. *Квантовая электроника*, **50** (5), 475 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (5), 475 (2020)].
- Гордиенко В.А. *Векторно-фазовые методы в акустике* (М.: Физматлит, 2007).
- Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Краснописцев Н.В., Некрасов В.Н. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.*, №2, 3 (2014) [*Moscow Univ. Phys. Bull.*, **69** (2), 105 (2014)].
- Дзюба В.П. *Скалярно-векторные методы теоретической акустики* (Владивосток: Дальнаука, 2006).
- Wang J., Luo H., Meng Z., Hu Y. *J. Lightwave Technol.*, **30** (8), 1178 (2011).
- Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н., Дзюба В.П., Стороженко Д.В., Безрук М.Н. *Квантовая электроника*, **50** (5), 514 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (5), 514 (2020)].
- Ромашко Р.В., Безрук М.Н., Камшилин А.А., Кульчин Ю.Н. *Квантовая электроника*, **42** (6), 551 (2012) [*Quantum Electron.*, **42** (6), 551 (2012)].
- Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Yu.N., Launay J.-C. *Opt. Express*, **15** (2), 545 (2007).
- Romashko R.V., Di Girolamo S., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **27** (2), 311 (2010).
- Ромашко Р.В., Безрук М.Н., Ермолаев С.А., Завестовская И.Н. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **41** (12), 8 (2014) [*Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **41**, 348 (2014)].
- Безрук М.Н., Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н., Ермолаев С.А., Ноткин Б.С. *Вестник ДВО РАН*, №2, 117 (2019) [*Vestnik FEB RAS*, (2), 117 (2019)].
- Белогольский В.А., Секоян С.С., Саморукова Л.М., Стефанов С.Р., Левцов В.И. *Измерительная техника*, №4, 66 (1999) [*Measur. Techniq.*, **42**, 406 (1999)].