

## ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

# Лазерный адаптивный голографический гидроакустический интенсиметр

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

*Исследован новый тип векторного гидроакустического приемника – лазерный адаптивный гидроакустический интенсиметр. В качестве первичного приемника акустического сигнала использованы два разнесенных в пространстве идентичных волоконно-оптических сенсора катушечного типа. Фазовая демодуляция сигналов, полученная на выходе сенсоров, реализуется в двухканальном адаптивном голографическом интерферометре, построенном на основе двух динамических голограмм, мультиплексированных в фоторефрактивном кристалле CdTe. С помощью лазерного интенсиметра исследовано акустическое поле, сформированное в ограниченном объеме. Экспериментально определены рабочие характеристики интенсиметра, пороговая чувствительность которого по интенсивности акустического поля составила  $0.1 \times 10^{-13} \text{ Вт/м}^2$ .*

**Ключевые слова:** векторно-фазовый гидроакустический приемник, волоконно-оптический сенсор, адаптивный интерферометр, динамическая голограмма, фоторефрактивный кристалл.

Решение таких задач, как изучение подводной обстановки, мониторинг океана, подводная связь и ряд других неразрывно связано с созданием эффективных средств регистрации гидроакустических сигналов. В большинстве современных акустических приемников используются электрические преобразователи (пьезоэлектрические, электродинамические, емкостные и т.п.), обладающие рядом недостатков, которые в определенных случаях затрудняют их применение для регистрации сверхслабых акустических сигналов [1, 2]. В связи с этим значительное развитие получили оптические и, в первую очередь, волоконно-оптические приемники акустических сигналов [3, 4]. При этом использование интерферометрических принципов при построении акустических приемников открывает перспективы детектирования сверхслабых сигналов [5].

Интерферометрические системы в силу их высокой чувствительности в значительной степени подвержены влиянию внешних шумовых факторов (случайные механические воздействия, дрейф температуры, давления и пр.), что на практике в большинстве случаев сводит к нулю все достоинства таких систем. Применение в интерферометре электронных систем стабилизации [6, 7] приводит к значительному усложнению измерительной системы, делает затруднительным или даже невозможным построение многоканальных интерферометрических схем, т.к. в каждом канале необходимо реализовывать схему стабилизации. Как было показано в работе [8], использование в интерферометрах динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивных кристаллах (ФРК), является одним из эффективных решений для стабилизации рабочей

точки интерферометра. В работах [9–12] предложены подходы к регистрации слабых акустических и гидроакустических сигналов с помощью адаптивных голографических интерферометров.

При этом существуют задачи, в которых, помимо регистрации акустического сигнала, необходимо также осуществлять пеленг его источников. Такие задачи могут быть решены с использованием векторно-фазового подхода, суть которого заключается в регистрации наряду с амплитудой акустического давления также и фазы колебательной скорости частиц среды (или градиента акустического давления в волне) [13, 14]. Для реализации векторно-фазового подхода следует обеспечить одновременное измерение акустического сигнала в трех парах точек, разнесенных по трем ортогональным направлениям на некоторой пространственной базе, что влечет за собой необходимость использования многоканальных измерительных систем. При этом доступные на сегодня немногочисленные типы векторно-фазовых гидроакустических приемников, как и большинство точечных гидрофонов, создаются на электрической элементной базе [13, 15]. Это влечет за собой существование в таких приемниках проблем, характерных для электрических гидрофонов (электромагнитные помехи, наличие агрессивных сред и др.), которые в векторно-фазовом приемнике многократно усложняются вследствие необходимости обеспечения многоканальности измерения. В работах [16, 17] продемонстрирована возможность регистрации сигналов с помощью адаптивного голографического интерферометра одновременно по 6 и 32 каналам соответственно.

В настоящей работе предложен и исследован векторно-фазовый акустический приемник нового типа – лазерный адаптивный гидроакустический интенсиметр на основе двухканального адаптивного голографического интерферометра и волоконно-оптических сенсоров, позволяющий регистрировать проекцию векторных акустических характеристик, таких как градиент давления, колебательная скорость и колебательное ускорение.

**Р.В.Ромашко, Ю.Н.Кульчин, В.П.Дзюба, Д.В.Стороженко, М.Н.Безрук.** Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Россия, 690041 Владивосток, ул. Радио, 5;  
e-mail: romashko@iacp.dvo.ru

Поступила в редакцию 13 декабря 2019 г., после доработки 30 января 2020 г.

Вектор плотности потока акустической энергии  $I(\omega)$  (вектор акустической интенсивности) определяется в частотной области как реальная часть произведения комплексных давления  $p(\omega)$  и колебательной скорости  $V(\omega)$  [18]:

$$I(\omega) = 0.5\text{Re}[p(\omega)V^*(\omega)], \quad (1)$$

где колебательная скорость определяется через градиент давления  $\nabla p$  и плотность среды  $\rho$ :

$$V(\omega, r) = -\frac{\nabla p(\omega)}{i\rho\omega}, \quad (2)$$

$$\nabla p(\omega) = \frac{p_1(\omega) - p_2(\omega)}{\delta x}, \quad (3)$$

где  $p_1(\omega)$  и  $p_2(\omega)$  – комплексное давление в двух точках пространства, расположенных на расстоянии  $\delta x$ . Таким образом, два чувствительных элемента, расположенных на расстоянии  $l = \delta x$ , обеспечивают получение проекции вектора интенсивности  $I_x(\omega)$  на направление  $x$  при синхронном измерении спектра акустического давления  $p(\omega)$  в этих двух точках.

Схема лазерного адаптивного голографического гидроакустического интенсивметра представлена на рис.1. Чувствительный элемент интенсивметра представляет собой два идентичных волоконно-оптических датчика, расположенных на расстоянии  $\lambda_{ac}/10$  друг от друга ( $\lambda_{ac}$  – наименьшая длина волны акустического поля). Каждый датчик выполнен в виде цилиндра из пенополистирола диаметром 3 см и длиной 4 см, на который навит многомодовый волоконный световод (диаметр сердцевины 62.5 мкм, числовая апертура  $NA = 0.22$ ) длиной 3 м (30 витков).

Оптическая часть лазерного интенсивметра реализована следующим образом. Излучение Nd:YAG-лазера ( $\lambda = 1064$  нм, выходная мощность 1 Вт) проходит через полу-

волновую пластинку и поляризационный светоделитель, разделяясь на сигнальную и опорную световые волны в соотношении 1:5 по интенсивности. Опорная волна, эллиптически поляризованная после прохождения четверть-волновой пластинки, направляется в фоторефрактивный кристалл CdTe вдоль кристаллографической оси [100]. Размеры кристалла  $5 \times 5 \times 5$  мм. Излучение сигнальной волны посредством волоконно-оптического разветвителя  $1 \times 2$  повторно разделяется на две одинаковые по мощности световые волны, направляемые в два идентичных волоконно-оптических датчика в составе чувствительного элемента интенсивметра. Механические колебания материала оснований волоконно-оптических датчиков, вызванные воздействием на них акустического давления, приводят к фазовой модуляции излучения, проходящего по навитому на основание световоду.

Излучение сигнальных волн, прошедшее через волоконно-оптические датчики, посредством волоконных световодов направляется в ФРК вдоль его кристаллографической оси [001] в ортогональном к опорной волне направлении. Попарная интерференция в ФРК каждой из сигнальных и общей опорной волн вследствие фоторефрактивного эффекта приводит к записи в кристалле двух динамических голограмм. Векторное взаимодействие эллиптически поляризованной опорной волны с деполаризованными (после прохождения через многомодовые волоконные световоды) сигнальными волнами в такой ортогональной геометрии в ФРК кубической симметрии обеспечивает выполнение квадратурных условий адаптивного интерферометра, вследствие чего достигается его высокая чувствительность [19, 20]. Интенсивность сигнальных волн, будучи пропорциональной акустическому давлению в месте расположения датчиков, регистрируется с помощью фотоприемников, сигналы которых поступают для обработки в компьютер через двухканальный АЦП.

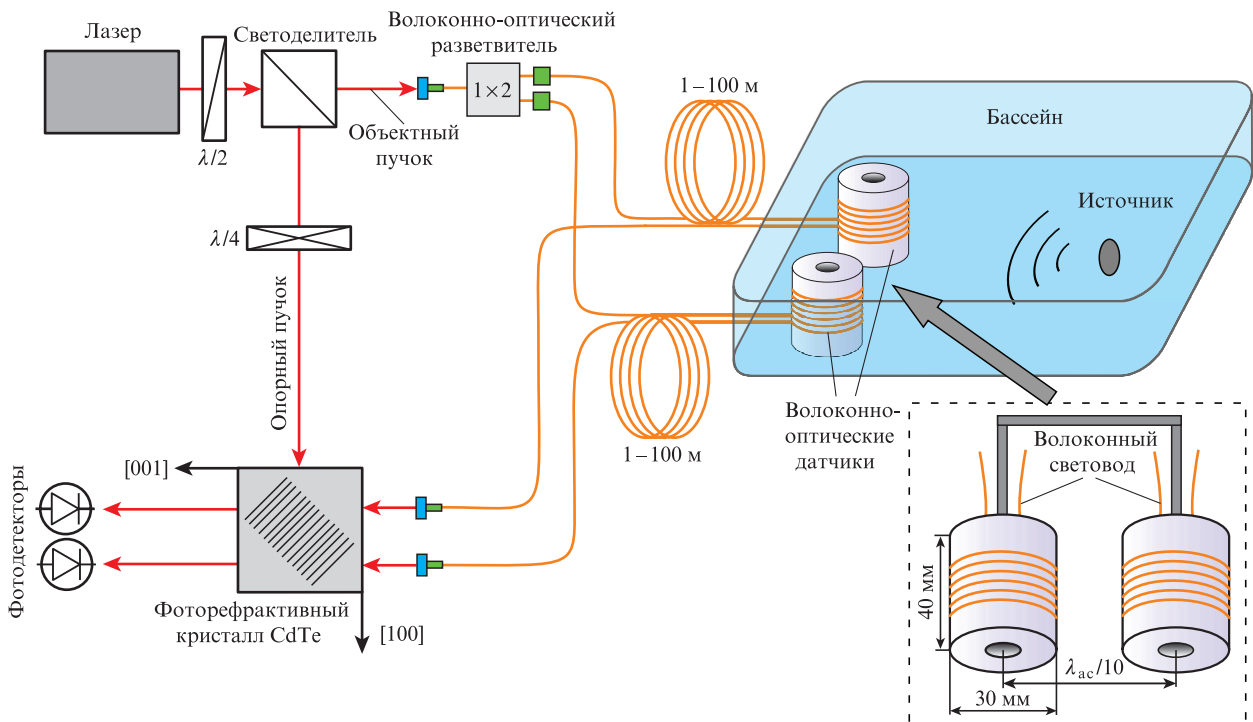


Рис.1. Схема лазерного адаптивного гидроакустического интенсивметра при использовании волоконно-оптического чувствительного элемента.

Следует отметить, что чувствительность интенсивметра определяется чувствительностями волоконно-оптических датчиков и двухканального адаптивного интерферометра. Для обеспечения достоверности получаемых с помощью лазерного интенсивметра результатов необходимо, чтобы как спаренные датчики, так и соответствующие им демодуляционные каналы интерферометра имели одинаковую чувствительность. При этом исходные чувствительности волоконно-оптических датчиков могут различаться, даже если они будут номинально идентичными (форма, размеры, количество намотанного оптоволокна). Чувствительность в разных каналах адаптивного интерферометра также может быть разной в силу ряда других причин, таких как неоднородность свойств фоторефрактивного кристалла по его объему (световой пучок каждой сигнальной волны попадает в определенное место в ФРК), неравномерность коэффициента деления волоконно-оптического разветвителя, а также возможного различия характеристик фотодетекторов. В этой связи в настоящей работе применялась калибровка чувствительности каналов разработанного интенсивметра [21]. Данный метод заключается во внесении в каналы интерферометра заданной фазовой модуляции (калибровочного сигнала) с переменной амплитудой, в построении переходной характеристики и в определении на ее основе калибровочного коэффициента для каждого канала.

Экспериментальные исследования разработанного интенсивметра проводились в испытательном бассейне с размерами  $2.93 \times 1.72 \times 0.6$  м, заполненном водой на 80%. Бассейн находился на песчаном слое толщиной 0.1 м. Скорость звука для воды  $c$  измерялась непосредственно перед экспериментами и составляла 1510 м/с при температуре 8 °С. Источником акустического сигнала служил пьезоэлектрический излучатель Zetlab BC310. Излучатель и приемник находились на одной глубине (20 см от дна бассейна).

В работе была экспериментально измерена амплитудно-частотная характеристика лазерного интенсивметра (рис.2). Для этого на излучатель подавался синусоидальный сигнал с постоянной амплитудой и переменной частотой в диапазоне 1–100 кГц, при этом волоконно-оптические датчики находились на расстоянии  $d = \lambda_{ac}/4$  друг от друга. Как видно из рис.2, интенсивметр имеет достаточно равномерную чувствительность практически во всем измеренном частотном диапазоне с небольшим резонансом на частоте 8.1 кГц. На этой частоте чувствительность

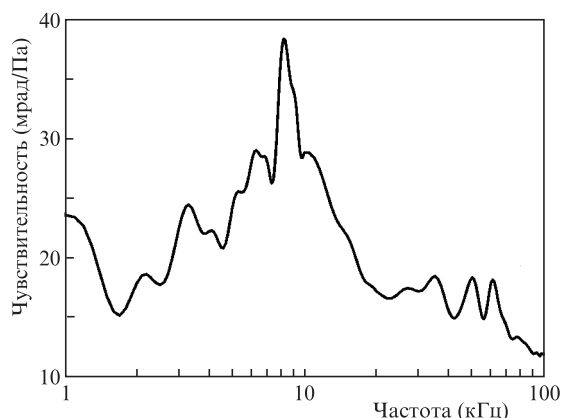


Рис.2. Амплитудно-частотная характеристика волоконно-оптических датчиков гидроакустического интенсивметра.

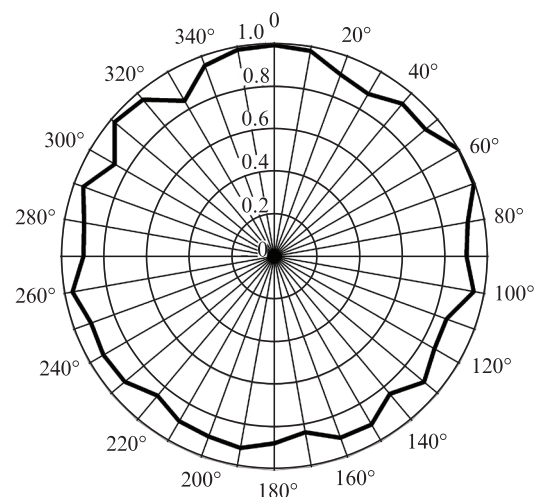


Рис.3. Диаграмма направленности волоконно-оптического датчика гидроакустического интенсивметра (сплошная жирная кривая – нормированная чувствительность, измеряемая в относительных единицах).

интенсивметра составила 37 мРад/Па. Обладая такой чувствительностью, разработанный интенсивметр позволяет регистрировать слабые сигналы с акустическим давлением от 3 мПа и интенсивностью от  $0.1 \times 10^{-13}$  Вт/м<sup>2</sup>.

На рис.3 представлена экспериментально определенная диаграмма направленности одного из датчиков. Как видно из рисунка, чувствительность датчика носит изотропный характер, что позволяет успешно применять его в схеме интенсивметра.

С помощью разработанного лазерного интенсивметра выполнено измерение акустического поля в вышеописанном бассейне. Излучатель был неподвижен, в то время как датчики перемещались по бассейну при помощи моторизованного двухкоординатного шагового транслятора, обеспечивающего точность позиционирования по каждому направлению  $\pm 1.5$  мм (рис.4). Управление транслятором осуществлялось при помощи микроконтроллера, управляемого разработанным в среде Matlab программным обеспечением, которое включало в себя также запись и постобработку выходного сигнала интенсивметра, что позволяет автоматизировать процесс измерений параметров акустического поля.

В процессе измерения сигналы интенсивметра длительностью 0.25 с, поступающие по двум каналам, оцифровывались с частотой дискретизации 96 кГц. Полученные сигналы обрабатывались по алгоритму, включающему преобразование Фурье и прохождение полосового фильтра с конечной импульсной характеристикой. Таким образом, результатом постобработки является комплексный фурье-спектр сигнала в канале, который содержит значения акустического давления  $p(\omega)$  в точке измерения, усредненные

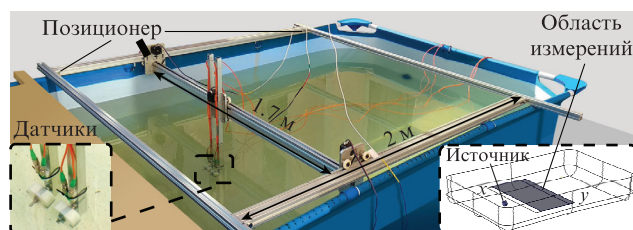


Рис.4. Испытательный бассейн и установленный на нем моторизованный позиционер.

за время 0.25 с. Экспериментальные исследования акустического поля были выполнены на частоте 2.1 кГц при акустическом давлении 0.2 Па, создаваемом излучателем в ближнем поле (определялось при помощи калиброванного пьезоэлектрического датчика). В результате измерения в области пространства бассейна  $130 \times 65$  точек с шагом 1 см и дальнейшей постобработки сигнала был получен двумерный массив значений комплексного спектра. На рис.5 представлены полученные экспериментально модуль акустического комплексного давления (рис.5,а) и его вещественная часть (рис.5,в), отображенные в виде карт распределения по области измерения.

Для верификации результатов измерения выполнено моделирование акустического поля в бассейне. Моделирование осуществлялось в программной среде Comsol-Multiphysics решением волнового уравнения в ограниченной области с заданными материальными параметрами водной и окружающих сред. В геометрии расчетной области модели учтены особенности реального бассейна, такие как скругления по нижним ребрам с радиусом 10 см и перегибка по ширине 5 см. На рис.5 представлены результаты моделирования комплексного модуля акустического давления (рис.5,б) и его вещественной части (рис.5,г). Видно, что экспериментальные результаты (рис.5,а,в) хорошо согласуются с результатами расчетов (рис.5,б,г). На вставке рис.4 показаны направления осей  $x$  и  $y$ . Следует отметить, что излучатель находился на расстоянии 20 см по оси  $y$  от начала области сканирования, представленной на рис.5. Анализируя характер распределения модуля давления, можно заключить, что в бассейне формируется стационарное поле, сильно отличающееся от поля для свободного пространства. Это означает, что модуль акустического давления не будет изменяться с расстоянием от источника по квадратичной зависимости, как в свободном пространстве. Положение максимумов амплитуды давления будет зависеть от частоты акустического сигнала и расположения излучателя в бассейне, соответственно направление вектора интенсивности не будет совпадать с направлением на излучатель для каждой точки пространства. Поэтому для точного определения направ-

ления вектора интенсивности внутри бассейна нам необходимо определить  $x$ - и  $y$ -проекции вектора интенсивности. Используя выражение (1), мы получили комплексные значения градиента и интенсивности давления для  $x$ -проекции в момент измерения в каждой точке, поскольку в этой проекции расположены чувствительные элементы. Расчет дополнительной  $y$ -проекции был произведен путем подстановки в (1) измеренных значений комплексного давления из предыдущих строк и использования дополнительного синхронизирующего сигнала с генератора, который отдельно записывался в ходе эксперимента. Результаты расчета  $x$ - и  $y$ -проекций интенсивности (рис.6,а,в) качественно согласуются с данными моделирования (рис.6,б,г), поскольку характер их распределений в области измерения идентичен.

Указанных двух проекций интенсивности достаточно для построения векторного поля на плоскости (рис.7,а), которое также согласуется с результатами моделирования (рис.7,б). Следует отметить, что характер распределений векторных полей, полученных как экспериментально, так и численно, находится в полном соответствии с физикой процесса распространения акустической волны, которая, распространяясь от излучателя, встречается с волной, отраженной от борта бассейна, и образует по бокам симметричные области с завихрением.

Таким образом, в настоящей работе предложен новый тип лазерного волоконно-оптического векторно-фазового интенсивиметра на основе двухканального адаптивного голографического интерферометра и волоконно-оптических приемников акустических сигналов. Экспериментально определены рабочие характеристики интенсивиметра, пороговая чувствительность которого по интенсивности акустического поля составила  $0.1 \times 10^{-13}$  Вт/м<sup>2</sup>. Показана согласованность результатов эксперимента по измерению проекции вектора интенсивности в ограниченном пространстве с результатами численного моделирования. Применение измерительных систем такого типа дает возможность регистрации вектора интенсивности, энергетических, межфазовых, когерентных и вероятностных свойств сверхслабых акустических полей, что позволяет разви-

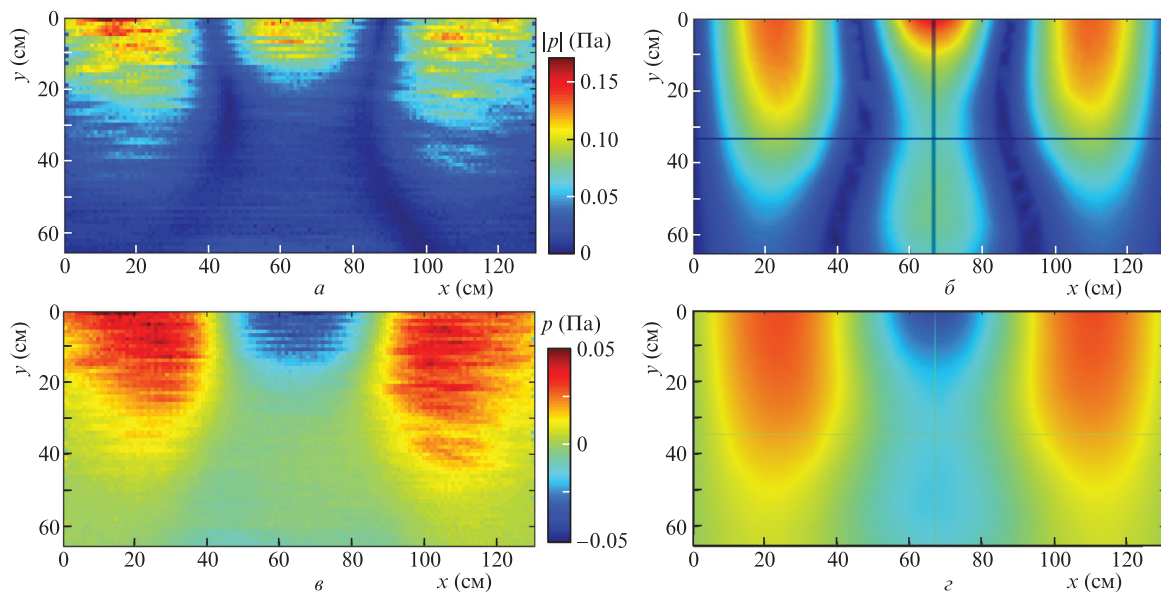


Рис.5. Результаты измерения характеристик акустического поля и сравнение их с численным расчетом в единой шкале значений: а – измеренная амплитуда; б – расчетное поле амплитуды; в – измеренное поле (вещественная часть); г – расчетное поле (вещественная часть). Цветной вариант рис.5 и 6 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

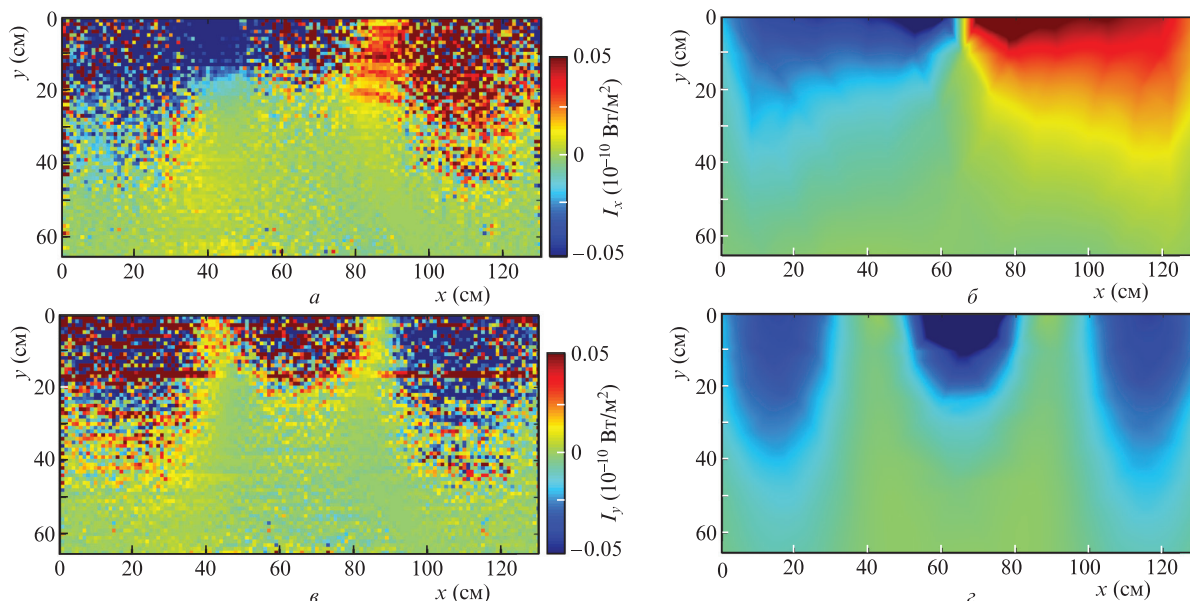


Рис.6. Проекция вектора интенсивности: *a* – измеренное  $I_x$ , *б* – расчётное  $I_x$ , *в* – измеренное  $I_y$ , *з* – расчётное  $I_y$ .

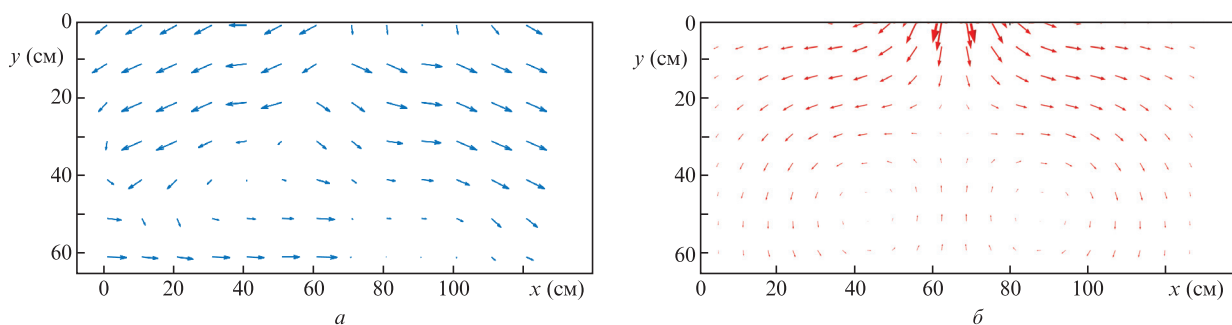


Рис.7. Восстановленное поле вектора акустической интенсивности в области измерения: *a* – измеренное, *б* – расчётное.

вать новые эффективные алгоритмы обнаружения и способы определения пеленга слабых или значительно удаленных источников, а также разработать методы их классификации.

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

- 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).
- Josten G., Lüthy W., Weber H.P. *Appl. Phys. B*, **51** (6), 418 (1990).
- Karhade O., Degertekin L., Kurfess T. *Opt. Lett.*, **34** (19), 3044 (2009).
- Kamshilin A.A., Petrov M.P. *Opt. Commun.*, **53**, 23 (1985).
- Romashko R.V., Kulchin Y.N., Nippolainen E. *Laser Phys.*, **24** (11), 115604 (2014).
- Romashko R.V., Bezruk M.N., Ermolaev S.A., Zavestovskaya I.N., Kulchin Y.N. *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)].
- Kamenev O.T., Petrov Y.S., Hizhnyak R.V., Zavestovskaya I.N., Kulchin Y.N., Romashko R.V. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **44** (7), 202 (2017).
- 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).
- Захаров К.Л. *Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление*, **10** (3), 148 (2014).
- Ромашко Р.В., Безрук М.Н., Камшилин А.А., Кульчин Ю.Н. *Квантовая электроника*, **42** (6), 551 (2012) [*Quantum Electron.*, **42** (6), 551 (2012)].
- Romashko R.V., Bezruk M.N., Ermolaev S.A., Storozhenko D.A., Kulchin Y.N. *Proc. SPIE*, **10176**, 1017612 (2017).
- Дзюба В.П. *Скалярно-векторные методы теоретической акустики* (Владивосток: Дальнаука, 2006).
- 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).
- Безрук М.Н., Ромашко Р.В., Кульчин Ю.Н., Ермолаев С.А., Ноткин Б.С. *Вестник ДВО РАН*, **2**, 117 (2019).