

Фокусировка нелинейной ультразвуковой волны с обращенным фронтом, прошедшей через фазово-неоднородный слой

А. П. Брысев¹⁾, Ф. В. Бункин, Р. В. Клопотов, Л. М. Крутянский, В. Л. Преображенский

Научный центр волновых исследований Института общей физики РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 28 февраля 2001 г.

Экспериментально исследовано прохождение нелинейной ультразвуковой волны с обращенным фронтом через слой, вносящий случайные фазовые aberrации. Волна создавалась с помощью запорогового параметрического обращенного фронт усилителя ультразвука. Показано, что при достигнутой степени нелинейности обращенной волны сохраняется фазовая синхронизация гармоник и, как следствие, происходит компенсация внесенных слоев искажений. Продемонстрирована важная для приложений возможность автоматической фокусировки нелинейной обращенной волны в неоднородной среде.

PACS: 43.25.Jh

Как известно, преобразование обращения волнового фронта (ОВФ) позволяет осуществлять автоматическую фокусировку волновых пучков на объекты, помещенные как в однородную, так и в неоднородную среду, вносящую существенные фазовые aberrации в волновое поле [1]. В последние годы ОВФ-фокусировка стала объектом интенсивных экспериментальных исследований в акустике [2–6], что обусловлено разработкой эффективных методов ОВФ акустических волн ультразвукового диапазона [5, 7–9] и перспективами возможных приложений ОВФ в медицинской диагностике и неразрушающем контроле. Среди методов ОВФ ультразвука особый интерес представляет параметрическое фазовое сопряжение волн за порогом абсолютной неустойчивости в твердом теле, обеспечивающее гигантское усиление обращенной волны по отношению к падающей [10]. Экспериментально была продемонстрирована возможность применения этого метода для ОВФ-фокусировки ультразвука в твердых телах [2] и жидких средах [11]. Наблюдались эффекты самонацеливания акустических пучков на регулярные и случайные рассеивающие объекты в жидкости [12, 3] и компенсации фазовых искажений на несущей частоте обращаемой волны [13]. Высокая интенсивность обращенной волны в режиме гигантского параметрического усиления позволяет исследовать особенности автофокусировки ультразвуковых пучков в условиях их нелинейного распространения. Фокусировка нелинейных ОВФ-пучков в однородной среде исследовалась в работе [14]. В то же время, вопрос о возможности компенсации фазовых искажений при фокусировке ОВФ-пучка в условиях усиления и нелинейного распространения оставался дискуссионным. Недавно

¹⁾e-mail: brysev@orc.ru

сообщалось о компенсации фазовых aberrаций изображения, полученного на второй гармонике обращенной волны, в акустическом микроскопе на основе параметрического ОВФ-усилителя [15].

В настоящей работе сообщаются результаты прямых измерений структуры поля сфокусированной обращенной ультразвуковой волны, распространяющейся в фазово-неоднородной среде в условиях развитой нелинейности. Приводятся распределения амплитуд первых четырех гармоник и среднеквадратичного значения давления в фокальной плоскости и вдоль оси пучка. Обсуждается механизм фазовой синхронизации гармоник при автофокусировке нелинейной обращенной волны.

Упрощенная схема эксперимента приведена на рис.1. Сферически сфокусированный ультразвуковой излучатель S с фокусным расстоянием 82 мм и диаметром 27 мм был помещен в заполненный водой бассейн. Расходящийся из области фокуса ультразвуковой пучок с несущей частотой 5 МГц и импульсной длительностью 30 мкс направлялся в запороговый параметрический ОВФ-усилитель, выполненный на основе магнитострикционной керамики [7, 16]. ОВФ-усилитель помещался на расстоянии 206 мм от излучателя и имел рабочую апертуру диаметром 36 мм. Генерируемая им на той же частоте усиленная обращенная волна распространялась назад через фокус к излучателю. В используемом импульсно-периодическом режиме работы цуги падающей и обращенной волн при их распространении в воде были полностью разделены во времени. Соответствующее временное стробирование позволяло делать измерения в нужном волновом цуге. Акустическое поле в воде измерялось звукопрозрачным

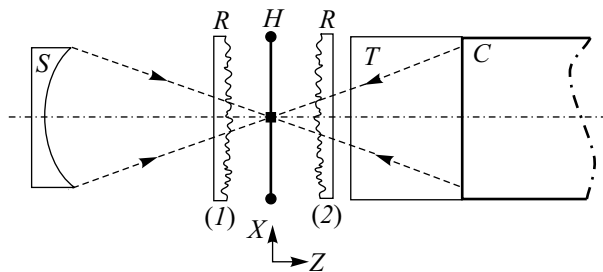


Рис.1. Упрощенная схема эксперимента. Штриховыми линиями условно показано распространение падающей и обращенной звуковой волны в отсутствие слоя. *S* – ультразвуковой излучатель, *C* – ОВФ-усилитель, *T* – металлическая трубка, *H* – мембранный гидрофон, *R* – фазовый слой, (1), (2) – положения слоя, *X*, *Z* – направления осей позиционирования гидрофона

широкополосным мембранным PVDF гидрофоном *H* с диаметром чувствительного элемента 0.5 мм. Позиционирование гидрофона осуществлялось автоматической двухкоординатной системой с точностью 0.2 мм. Измерительная схема производила в каждой точке поля усреднение сигнала гидрофона по 32 выборкам и определяла пиковое и среднедействующее значения, а также амплитуды первых четырех спектральных компонент. Амплитуда падающей волны в фокусе составляла $2.44 \cdot 10^5$ Па, при этом уровень второй гармоники не превышал -25 дБ от основной, что позволяло считать распространение пучка практически линейным.

В качестве неоднородной среды использовался специально изготовленный слой *R* из силиконового полимера. Материал слоя имел следующие акустические параметры: плотность – 850 кг/м^3 , скорость звука – 1160 м/с , затухание на частоте 5 МГц – 6 дБ/см . Одна сторона слоя была плоской, а вторая имела хаотически расположенные неровности неправильной пирамидальной формы. Размеры основания и высоты неровностей находились в пределах от 2 мм до 5 мм. Таким образом, разность набега фазы в воде и в слое, например, на дистанции 3 мм составляла более 4π . Акустический импеданс слоя обеспечивал достаточно хорошее акустическое согласование с водой. Учитывая сравнительно небольшую толщину слоя, можно считать, что искажения, вносимые в акустический пучок, носили, в основном, фазовый характер, а вклад амплитудных потерь был несущественным.

Способность слоя вносить в проходящую волну искажения, заметные на заданном расстоянии, была исследована при его размещении в положении, обозначенном на рис.1 как (1). Удаление плоской по-

верхности от фокуса составляло 20 мм. В этих условиях было измерено поле, создаваемое излучателем в фокальной плоскости. Характерный вид полученной кривой представлен на рис.2. Для сравнения там же приведено фокальное распределение поля в отсутствие слоя. Видно, что наличие слоя сильно изменяет типичное для сферического пучка распределение, разрушая фокусировку. Многократное повторение таких измерений при параллельном смещении слоя с сохранением расстояния до источника дало сходные по виду результаты деструкции фокуса, отличающиеся расположением, формой и количеством максимумов. Тем самым было подтверждено удовлетворительное качество слоя как среды, вносящей фазовые aberrации.

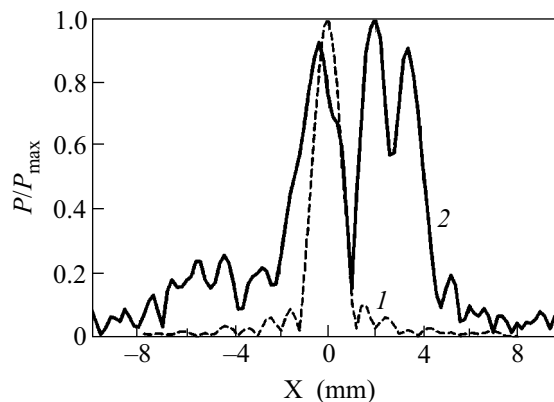


Рис.2. Фокальное распределение нормированной амплитуды давления в падающей волне: 1 – в отсутствие фазового слоя, 2 – при помещении слоя в положение (1). *X* – расстояние от оси пучка

Для экспериментов с обращенной волной фазовый слой был перемещен симметрично относительно фокуса из позиции (1) в позицию (2). В этой геометрии aberrации вносились в падающую волну после прохождения ею области фокуса. Поскольку при этом происходила сильная стохастическая дефокусировка, необходимо было исключить потери, связанные с непопаданием части рассеянного пучка в апертуру ОВФ-усилителя. С этой целью между слоем и усилителем помещалась металлическая трубка *T* с внутренним диаметром 36 мм и длиной 101 мм, играющая роль акустического волновода. В противном случае, как было обнаружено в соответствующих экспериментах, воспроизведение пространственной структуры поля падающего пучка нарушалось.

Результаты измерений поля обращенного пучка вдоль оси приведены на рис.3. Пунктиром условно обозначено положение слоя. Область сканирования начиналась непосредственно от слоя и имела протя-

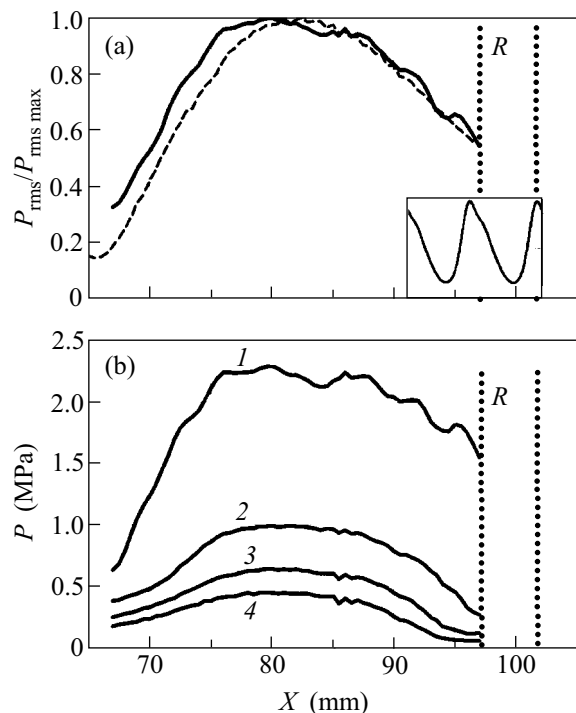


Рис.3. Распределение звукового давления вдоль оси пучка: (a) – нормированное среднее значение, (b) – амплитуды первых четырех гармоник. Сплошные кривые – обращенная волна, штриховая линия – падающая волна. Пунктиром условно показано положение фазового слоя R ; 1–4 – номер гармоники, Z – расстояние от излучателя. Внизу справа на (a) изображена форма обращенной волны на оси пучка в точке $Z = 97$ мм

женность 30 мм. Для сравнения штриховой линией показано распределение давления в падающей волне. Временной профиль обращенной волны в начальной точке сканирования изображен на рис.3а внизу справа. Видно, что на левой границе слоя обращенная волна имеет явно выраженный нелинейный характер: амплитуда второй гармоники составляет 18%, третьей – 8% и четвертой – 4% от амплитуды первой гармоники. Продольный профиль обращенного пучка, в целом, хорошо воспроизводит профиль падающего.

На рис.4 приведены поперечные распределения действующего значения (a) и амплитуд гармоник (b) давления в обращенном пучке, измеренные в фокальной плоскости источника. Распределение поля в падающем пучке показано штриховой линией. Временной профиль обращенной волны в фокусе изображен на рис.4а вверху справа. Отношение амплитуд основной гармоники обращенной и падающей волны в фокусе составило около 10, при этом в обращенной волне пиковый перепад давления, то есть разница между

положительным и отрицательным пиками волнового профиля, составил 6.95 МПа. Несмотря на увеличение относительного уровня боковых максимумов, поле нелинейной обращенной волны демонстрирует высокое качество ОВФ-фокусировки ультразвукового пучка как по положению, так и по ширине главного максимума. Проведенные в настоящей работе эксперименты по ОВФ с усилением позволяют судить о качестве воспроизведения акустического поля при максимальной, достигнутой на сегодня, амплитуде давления обращенной волны. Видно, что автоматическая ОВФ-фокусировка усиленных обращенных волн с компенсацией фазовых aberrаций, вызванных неоднородностями среды распространения, возможна даже при существенных нелинейных искажениях волновой формы.

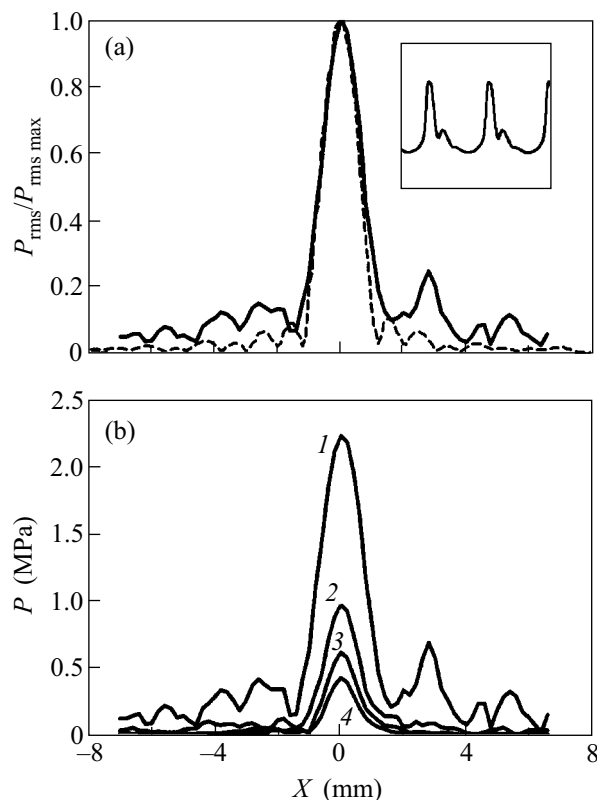


Рис.4. Фокальное распределение поля звукового давления: (a) – нормированное среднее значение, (b) – амплитуды первых четырех гармоник. Сплошные кривые – обращенная волна, штриховая линия – падающая волна. 1–4 – номер гармоники, X – расстояние от оси пучка. Вверху справа изображена форма обращенной волны в точке $X = 0$

Следует отметить, что приведенные экспериментальные результаты указывают на существенное отличие свойств нелинейных волновых пучков с обра-

щенным фронтом в акустике и оптике. Так, исследование распространения оптических пучков с обращенным фронтом в однородной среде с кубической нелинейностью [17] показало возможность компенсации нелинейных искажений только при коэффициенте преобразования ОВФ-зеркала, близком к единице, что соответствует достаточно общему требованию сохранения инвариантности относительно обращения времени уравнений распространения волн в нелинейных и диспергирующих средах. В типичном для акустики случае бездисперсного распространения нелинейность проявляется, в первую очередь, в виде каскадной генерации гармоник. При этом фазы всех гармоник нелинейной волны описываются общим уравнением эйконала как в случае однородной, так и неоднородной сред [18]. Анализ показывает, что такая корреляция фаз может приводить к компенсации фазовых искажений и пространственной локализации гармоник обращенной волны в области фокуса исходной волны [15] даже в условиях нарушения, в строгом смысле, инвариантности по отношению к обращению времени. Как следствие, обращение фронта основной гармоники с усилением позволяет осуществлять в бездисперсной неоднородной среде эффективную ОВФ-фокусировку нелинейной волны. Указанная особенность ОВФ акустических пучков может найти разнообразные практические применения в нелинейных системах построения акустических изображений и в физике мощного ультразвука.

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры акустики МГУ О. А. Сапожникову, Ю. А. Пищальникову и Т. В. Синило за помощь при калибровке измерительного гидрофона и ультразвукового излучателя. Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

1. Б. Я. Зельдович, Н. Ф. Пилипецкий, В. В. Шкунов, *Обращение волнового фронта*, М.: Наука, 1985.
2. А. П. Брысев, Ф. В. Бункин, Д. В. Власов и др., *Акуст. журн.* **36**, 166 (1990).
3. А. П. Брысев, Ф. В. Бункин, Л. М. Крутянский и др., *Письма в ЖЭТФ* **61**, 454 (1995).
4. M. Tanter, J.-L. Tomas, and M. Fink, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 2511 (1998).
5. H. C. Song, W. A. Kuperman, and W. S. Hodgkiss, *J. Acoust. Soc. Am.* **103**, 3234 (1998).
6. K. Yamamoto, M. Ohno, A. Kokubo et al., *J. Acoust. Soc. Am.* **106**, 1339 (1999).
7. А. П. Брысев, Ф. В. Бункин, Д. В. Власов и др., *Акуст. журн.* **34**, 986 (1988).
8. M. Ohno and K. Takagi, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 3483 (1996).
9. M. Fink, *Physics Today* **50**, 34 (1997).
10. А. П. Брысев, Л. М. Крутянский, В. Л. Преображенский, *УФН* **168**, 878 (1998).
11. L. M. Krutyanskiy, V. L. Preobrazhensky, Yu. V. Pyl'nov et al., *Phys. Lett.* **A164**, 196 (1992).
12. A. P. Brysev, F. V. Bunkin, A. D. Stakhovskiy et al., *BRAS Physics/Suppl. Phys. Of Vibrations* **59**, 40 (1995).
13. A. Brysev, L. Krutyanskiy, P. Pernod, and V. Preobrazhensky, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 3133 (2000).
14. A. Brysev, L. Krutyanskiy, V. Preobrazhensky et al., *Nonlinear acoustics at the Turn of the Millennium: ISNA 15*, Eds. W. Lauterborn and T. Kurtz, AIP CP524, 2000, p. 183.
15. P. Pernod, V. L. Preobrazhensky, and Yu. V. Pyl'nov, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 553 (2001).
16. А. П. Брысев, Ф. В. Бункин, Л. М. Крутянский и др., *Акуст. журн.* **43**, 244 (1997).
17. Л. А. Большов, Д. В. Власов, М. А. Дыхне и др., *Письма в ЖЭТФ* **31**, 311 (1980).
18. О. В. Руденко, А. К. Сухорукова, *Акуст. журн.* **37**, 392 (1991).