

УДК 534.222.2

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ФОКУСИРОВКИ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ОБРАЩЕНИИ ФРОНТА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПУЧКОВ В ФЕРРИТОВОМ ЦИЛИНДРЕ С РЕЛЬЕФНОЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2000 г. А. П. Брысев, Л. М. Крутянский

Научный центр волновых исследований института общей физики РАН

117942 Москва, ул. Вавилова, 38

E-mail: brysev@orc.ru, krut@orc.ru

Поступила в редакцию 11.06.99 г.

Представлены результаты прямых измерений распределения акустического давления ультразвукового пучка с обращенным фронтом в фокусе собирающей линзы для двух видов параметрического обращаемого элемента: с плоской и профилированной рабочими поверхностями. Показано, что профилирование заметно повышает качество фокусировки ультразвукового пучка, излучаемого из твердотельного обращаемого элемента в воду.

В настоящее время прогресс в использовании явления обращения волнового фронта (ОВФ) ультразвука во многом связывают [1] с такими приложениями, как акустическая микроскопия [2, 3] и ультразвуковая гипертермия [4]. В этих, а также и многих других практически интересных случаях используются сфокусированные ультразвуковые пучки, распространяющиеся в жидкой или жидкоподобной среде. Отметим, что, например, в гипертермии качественная фокусировка должна обеспечиваться для высокоинтенсивных, а, значит, и нелинейных ультразвуковых пучков. Очевидно, что возможности практического использования обращаемых систем в такого рода приложениях во многом определяются тем качеством обращения волнового фронта сфокусированных ультразвуковых пучков, которое обеспечивают эти системы.

Одними из наиболее перспективных являются ОВФ-устройства параметрического типа, работающие за порогом абсолютной параметрической неустойчивости акустических колебаний. Они, как известно [1, 5], способны в реальном времени генерировать обращенные пучки, интенсивность которых на много порядков превосходит интенсивность падающего пучка. Первые исследования качества ОВФ ультразвука в параметрических системах, использующих в качестве активной среды поликристаллические ферриты, были выполнены в работах [6, 7]. В них было показано, что для цилиндрических обращаемых элементов с плоскими торцами, нагруженных на жидкую среду, характерна значительная неравномерность угловой зависимости эффективности ОВФ-преобразования. Это может приводить к ухудшению качества ОВФ пучков с широким пространствен-

ным спектром за счет неодинакового преобразования различных пространственных компонент спектра падающего пучка. Было также установлено, что наилучшие результаты по выравниванию угловой зависимости эффективности ОВФ-преобразования достигаются при использовании эффекта ОВФ-компенсации фазовых искажений, вносимых неоднородностями, находящимися непосредственно на входе в обращаемую среду. В этом случае удалось, не внося дополнительных потерь, расширить угловой диапазон ОВФ-преобразования плоских волн, падающих из воды на обращаемый элемент, до величины $\pm 16^\circ$ (по уровню -3 дБ).

В то же время, оценка качества ОВФ по виду угловой зависимости эффективности ОВФ-преобразования, не всегда удобна на практике. Поэтому прямое исследование ОВФ-фокусировки для тех или иных конкретных условий представляется достаточно актуальным.

В настоящей работе представлены результаты прямых измерений распределения акустического давления ультразвукового пучка с обращенным фронтом в фокусе собирающей линзы для двух видов параметрического обращаемого элемента: с плоской и профилированной рабочими поверхностями. Показано, что профилирование заметно повышает качество фокусировки ультразвукового пучка, излучаемого из твердотельного обращаемого элемента в воду.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Ультразвуковой импульс с длительностью 20 мкс и несущей частотой $f = 6.23$ МГц излучался в воду фокусирующим преобразователем l с диаметром 15 мм и фокусным расстоянием 39 мм. Интенсивность падающего пучка была невелика,

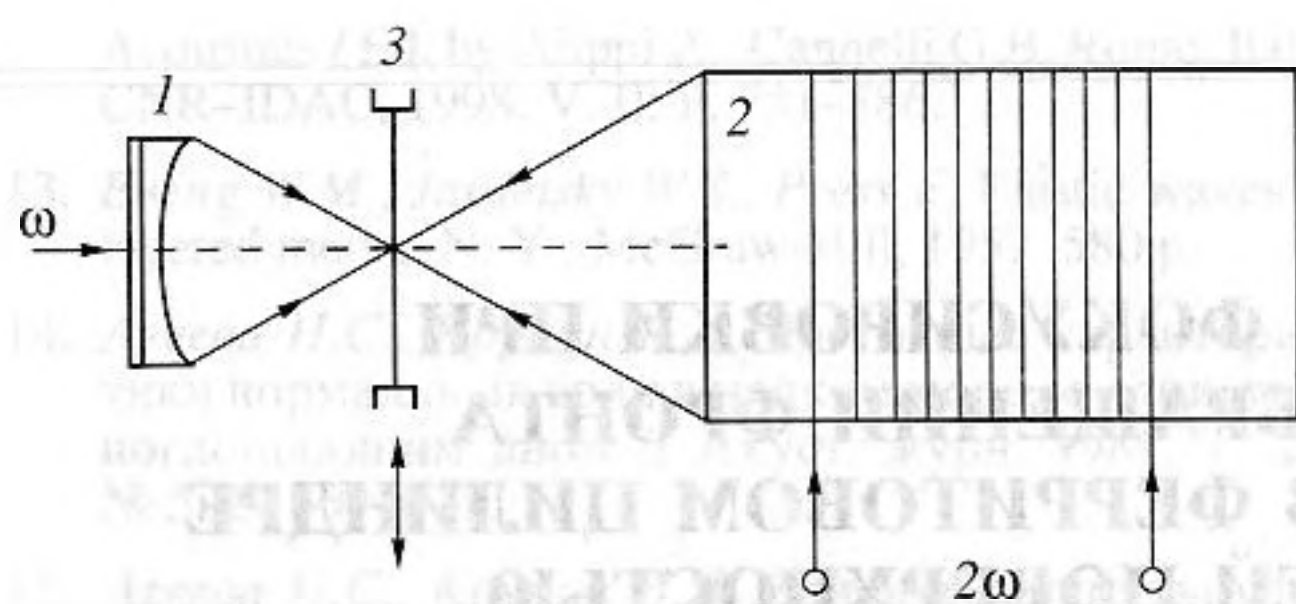


Рис. 1. Упрощенная схема эксперимента. 1 – фокусирующий ультразвуковой преобразователь; 2 – отражающий элемент из магнитострикционного феррита с катушкой параметрической накачки; 3 – сканируемый в фокальной плоскости PVDF гидрофон. Тонкими линиями со стрелками показаны ход прямого и отраженного ультразвуковых пучков.

так что его распространение было чисто линейным. На расстоянии 132 мм от преобразователя находился помещенный в катушку индуктивности цилиндрический ОВФ-элемент 2 из никель-кобальтового феррита диаметром 36 мм и длиной 150 мм. Указанное расстояние было выбрано так, чтобы падающий пучок в геометрическом приближении целиком попадал в апертуру отражающего элемента. В экспериментах использовались два ферритовых образца: один – с плоскопараллельными торцами, у второго поверхность, нагруженная на жидкость, имела специальный профиль в виде нарезанных вплотную концентрических канавок шириной 2.5 мм и глубиной 0.6 мм (радиус кривизны сечения канавки – 1.59 мм).

Когда ультразвуковой импульс попадал внутрь отражающего элемента, на катушку подавался импульс параметрической накачки частоты $2f = 12.46$ МГц и длительностью 100 мкс, что приводило к генерации обращенного и усиленного ультразвукового импульса (более подробное описание работы использованной нами параметрической ОВФ-системы см., например, в [1, 5, 7]). Обращенный пучок, распространяясь в воде в обратном направлении, фокусировался практически там же, где и падающий.

Измерения поперечного распределения амплитуды звукового давления проводились в плоскости фокуса с помощью мембранного PVDF гидрофона 3, подключенного через широкополосный усилитель к цифровому осциллографу Tektronix TDS340A. Для анализа выбирался короткий (~1 мкс) интервал вблизи максимума огибающей обращенного импульса и на нем вычислялась величина перепада между максимальным и минимальным давлением. Для повышения точности использовалось усреднение по 64 выборкам. Positionирование гидрофона осуществлялось сканирующей системой с шагом 0.2 мм. Вследствие малых (<3 дБ) потерь на пропускание, гидрофон

являлся практически прозрачным для акустических волн в рабочем диапазоне частот. В совокупности с малым размером чувствительного элемента гидрофона (~0.5 мм), это обеспечивало практически невозмущающие измерения параметров как падающей, так и обращенной волн, со сравнительно высоким пространственным разрешением. Отсутствие вносимых в падающую волну возмущений принципиально важно для экспериментов по исследованию качества ОВФ в реальном времени¹. Угловая равномерность приема определялась достаточно широкой диаграммой направленности гидрофона (30° по уровню –3 дБ).

На рис. 2 приведены результаты измерений. Амплитуда (двойной размах) давления в фокусе обращенного пучка для обоих образцов достигала значения ~1.5 МПа. При этом форма волны имела вид, показанный на рис. 2 вверху справа. Точками на рисунке показано нормированное поперечное распределение амплитуды давления в падающей волне. Отличие распределения падающего поля от теоретической зависимости вида $J_1(\alpha r)/\alpha r$ объясняется как неидеальностью фокусирующего преобразователя, так и конечными размерами регистрирующей части гидрофона, приводящими к эффекту усреднения поля. Вместе с тем, размер главного фокального пятна близок к теоретическому значению для данной линзы: $1.22F\lambda/d \approx 0.77$ мм, где λ – длина акустической волны; d и F – соответственно апертура и фокусное расстояние. Штриховая линия соответствует обращенной волне, генерируемой образцом с плоской рабочей поверхностью. Несовпадение кривых явно проявляется при больших смещениях от акустической оси ($r \approx 1-3$ мм) и демонстрирует искажения, имеющие место в данном ОВФ-преобразовании.

Нормированное распределение обращенной волны, создаваемой образцом с профилированной поверхностью, представлено на рис. 2 сплошной линией. Как видно, наблюдается заметное улучшение качества воспроизведения исходного поля: по сравнению с предыдущим случаем в обращенной волне произошло существенное подавление боковых максимумов при незначительном уширении центрального пятна.

Причины наблюдаемого улучшения качества могут быть объяснены следующим образом. Плоская граница раздела жидкости и твердого тела за счет полного отражения одних компонент спектра падающего пучка и сильно неравномерного по амплитуде преломления других компонент играет роль сложного набора узкополосных фильтров, в целом существенно уменьшающего эффективную угловую апертуру отражающего элемента [6, 7]. Вследствие этого, в обращенном

¹ Ранее для этих целей нами использовалось лазерное зондирование акустического поля.

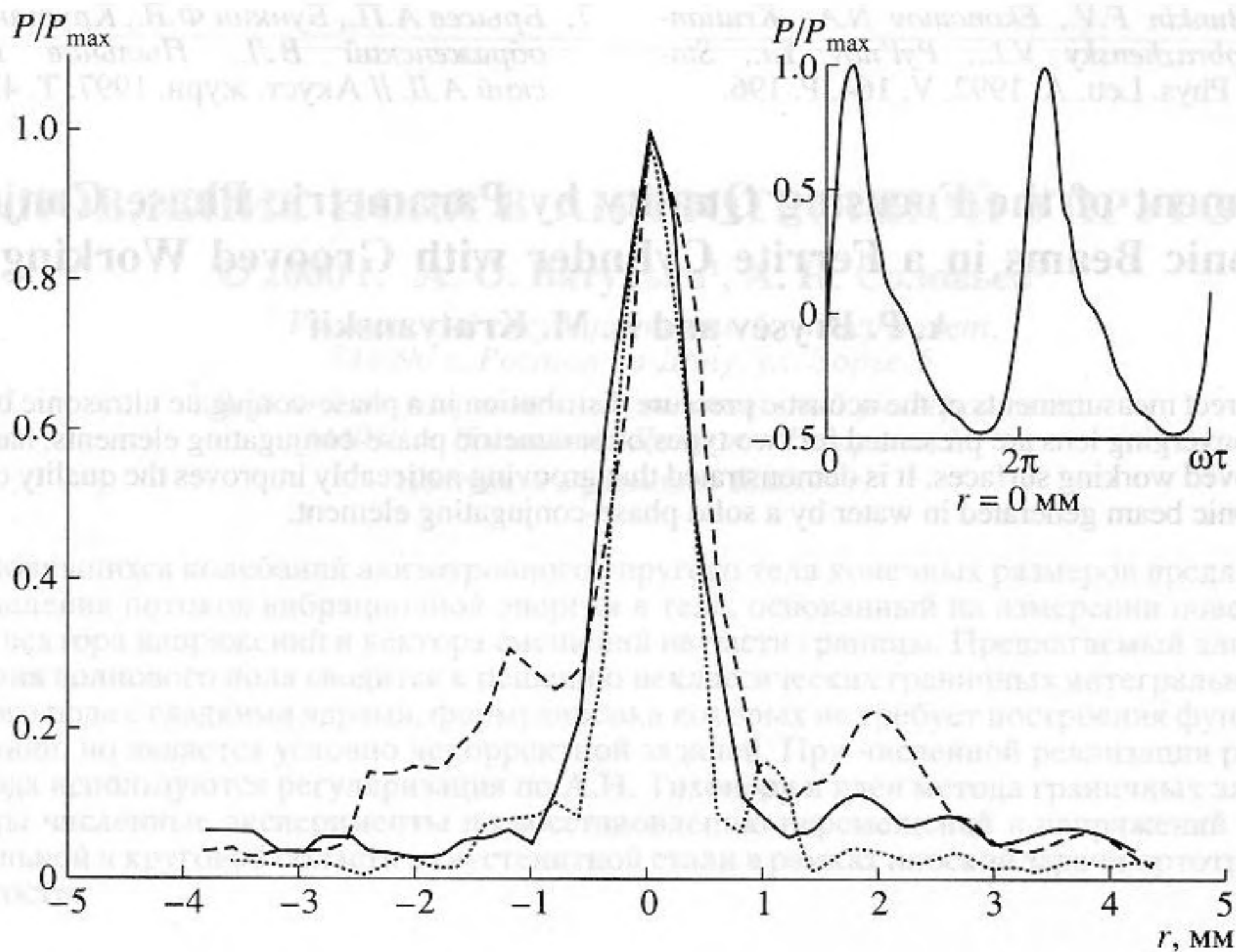


Рис. 2. Нормированное распределение акустического давления в фокальной плоскости. Точки – падающий пучок, штриховая и сплошная линии – обращенный пучок соответственно для случаев плоской и профилированной поверхностей обрабатываемого элемента. В правом верхнем углу рис. 2 приведена сходная для обоих случаев форма обращенной волны в фокусе.

пучке возникают искажения дифракционного типа – паразитные боковые максимумы. Рельеф, расположенный на границе жидкой и твердотельной среды, унифицирует условия прохождения для всех спектральных компонент, падающих на ОВФ-элемент. Тем самым, преобразуя пространственный спектр падающего пучка, он расширяет и сглаживает угловую зависимость коэффициента прохождения акустических волн через границу раздела. В таких условиях в ОВФ-преобразовании участвует большее число компонент падающей волны, причем примерно с одинаковым весом, что и обеспечивает повышение качества ОВФ. Восстановление исходной пространственной структуры падающего пучка при прохождении тех же неоднородностей обращенной волной обеспечивается фазосопряженностью ее фронта.

Вопрос о влиянии нелинейности среды распространения на качество параметрического ОВФ фокусированных ультразвуковых пучков требует, очевидно, специального исследования и будет рассмотрен нами в последующих публикациях.

Таким образом, вывод, сделанный в работе [7], о более высоком качестве ОВФ ультразвука, реализуемом обрабатываемыми элементами с профилированной рабочей поверхностью, получил экспериментальное подтверждение для случая сфоку-

сированных обращенных ультразвуковых пучков высокой интенсивности.

В заключение авторы выражают благодарность академику Ф.В. Бункину за всемерную поддержку нашей работы, а также к. т. н. А.Д. Стаховскому и оптику-механику высшей квалификации Н.Н. Рыжову за помощь при подготовке экспериментов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 99-02-18111, 98-02-16761 и 96-15-96525).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брысев А.П., Крутянский Л.М., Преображенский В.Л. // УФН. 1998. Т. 168. № 8. С. 877.
2. Ohno M. // Jap. J. of Appl. Phys. 1990. V. 29. Suppl. 29-1. P. 299.
3. Yamamoto K., Kokubo A., Ohno M., Sakai K., Takagi K. // Proc. of World Congress on Ultrasonics / Ed. K. Takagi. Yokohama: University of Tokyo, 1997. P. 1LP1, 22.
4. Tanter M., Thomas J.-L., Fink M. // Proc. of the 4th French Congr. on Acoustics. Vol. 1 / Ed. G. Canevet. Marseille: Teknea, 1997. P. 149.
5. Брысев А.П., Бункин Ф.В., Крутянский В.Л., Стаховский А.Д. // Известия РАН. 1996. Сер. физ. Т. 60. № 12. С. 117.

6. Brysev A.P., Bunkin F.V., Ekonomov N.A., Krutiansky L.M., Preobrazhensky V.L., Pyl'nov Yu., Stakhovsky A.D. // Phys. Lett. A. 1992. V. 164. P. 196.

7. Брысев А.П., Бункин Ф.В., Крутянский В.Л., Преображенский В.Л., Пыльнов Ю.В., Стаховский А.Д. // Акуст. журн. 1997. Т. 43. С. 244.

Improvement of the Focusing Quality by Parametric Phase Conjugation of Ultrasonic Beams in a Ferrite Cylinder with Grooved Working Surface

A. P. Brysev and L. M. Krutyanskiĭ

Results of direct measurements of the acoustic pressure distribution in a phase-conjugate ultrasonic beam in the focus of a converging lens are presented for two types of parametric phase-conjugating elements, namely, with flat and grooved working surfaces. It is demonstrated that grooving noticeably improves the quality of focusing of an ultrasonic beam generated in water by a solid phase-conjugating element.