- 25. Серебряный А Н Океанология 25 744 (1985)
- 26. Salusti E, Lascaratos A, Nittis K Ocean. Modelling 82 10 (1989)
- Serebryany A N, in *Fifth Intern. Symp. on Stratified Flows* Vol. 2 (Eds G A Lawrence, R Pieters, N Yonemitsu) (Vancouver: Univ. of British Columbia, 2000) p. 1035
- 28. Orr M H, Mignerey P C J. Geophys. Res. 108 3064 (2003)
- 29. Серебряный А Н, Пао Кс Докл. РАН (2005) (в печати)
- 30. Serebryany A N Dynamics Atm. Oceans 23 393 (1996)

PACS numbers: 43.25. + y, 43.40. + s, 62.60. + v

Волны с параметрически обращенным фронтом: применение в нелинейной акустоскопии и диагностике

В.Л. Преображенский

1. Введение

Под обращением волнового фронта (ОВФ) обычно понимают волновой процесс, развивающийся во временной последовательности, обратной по отношению к произвольно заданной первичной волне. Интерес к явлению ОВФ в акустике обусловлен способностью волн с обращенным фронтом автоматически фокусироваться на объекты, рассеивающие первичную волну, и компенсировать фазовые искажения при распространении волн в неоднородных рефрактивных средах. В последние годы интенсивно обсуждаются разнообразные приложения этих свойств обращенных волн в ультразвуковой диагностике, терапии, хирургии, дефектоскопии и подводной коммуникации.

Всесторонние исследования физических принципов и механизмов ОВФ ультразвука, которые начались более двадцати лет назад, были в значительной мере стимулированы результатами по ОВФ света, полученными в нелинейной оптике. С начала 1980-х годов в течение ряда лет основное внимание исследователей было сосредоточено на поиске адекватных подходов к решению задачи генерации ультразвуковых волн с обращенным фронтом в различных конденсированных средах. Результаты этих исследований систематизированы в обзорах [1, 2].

К концу восьмидесятых-началу девяностых годов прошлого века определились наиболее перспективные направления в технике акустического ОВФ, к которым относятся фазовое сопряжение ультразвуковых волн в параметрически активных твердых телах (пьезоэлектриках и магнетиках) [3-6] и обращение во времени акустических сигналов в многоканальных приемо-излучающих электронных системах [7, 8]. Интенсивно развиваются методы ОВФ на основе обращения времени в волноводных и резонаторных системах с множественными отражениями [9, 10]. С точки зрения применений в области ультразвуковых частот от нескольких единиц до нескольких десятков мегагерц, актуальной для приложений в медицине и дефектоскопии, эффективным методом ОВФ является запороговое параметрическое фазовое сопряжение магнитоупругих волн в магнитострикционной керамике [2, 4, 11]. Достаточно сильная связь упругой и магнитной подсистем в керамических материалах на основе ферритов шпинелей позволяет эффективно модулировать в них скорость звука с помощью высокочастотного магнитного поля. При этом глубина модуляции может существенно превышать порог параметрической неустойчивости длинноволновых фононов при комнатных температурах. В условиях запороговой накачки параметрически активный элемент представляет собой источник стимулированного излучения фазо-сопряженных фононных пар, обеспечивающий гигантское (свыше 80 дБ) усиление обращенной ультразвуковой волны по отношению к падающей. Керамическая технология позволяет изготовлять активные элементы с размерами и формой, варьируемыми в широких пределах в соответствии с требованиями конкретных приложений.

В приложении 1 к электронной версии доклада, размещенной на сайте $Y\Phi H$, приведена анимация процесса запорогового усиления в активной среде, полученная с помощью численного моделирования, выполненного в работе [12].

Возможности использования магнитоакустической техники ОВФ для автофокусировки ультразвука в жидкостях и твердых телах и самонацеливания ультразвуковых пучков на неподвижные и движущиеся рассеивающие объекты в жидкости были продемонстрированы в серии экспериментов (см. обзор [2]). В качестве иллюстрации в приложении 2 к электронной версии доклада представлены полученные в работе [13] результаты стробоскопической визуализации процесса самонацеливания ультразвука на воздушные пузыри, всплывающие в воде. Применение параметрического ОВФ для компенсации фазовых аберраций в линейной акустоскопии продемонстрировано в работах [14, 15].

Сочетание обращения фронта с гигантским усилением представляет особый интерес для исследований и применений явления ОВФ в нелинейной акустике. В то время как экспериментальные и прикладные исследования в области линейной акустики волн с обращенным фронтом активно развиваются уже с конца восьмидесятых-начала девяностых годов XX века (см. [2, 16]), нелинейная ОВФ-акустика начала формироваться как перспективное направление физической акустики сравнительно недавно. Начало исследованиям в области нелинейной ОВФ-акустики было положено в работах [17, 18], где впервые экспериментально и теоретически были исследованы нелинейные искажения профиля волн с параметрически обращенным фронтом и ретрофокусировка обращенных волн в однородной нелинейной среде. Результаты исследований свойств нелинейных ультразвуковых пучков с обращенным фронтом и перспективы использования этих свойств в акустоскопии частично отражены в обзоре [19].

Подобно ОВФ в оптике, обращение фронта в акустике представляет собой одно из проявлений инвариантности волнового поля по отношению к обращению времени. В условиях развитой нелинейности обратимость волнового процесса при ОВФ, как правило, оказывается нарушенной, что обусловливает специфические особенности явлений ОВФ в нелинейной акустике. В настоящем докладе рассматриваются физические механизмы ретрофокусировки ультразвуковых пучков с ОВФ в нелинейных и неоднородных акустических средах. Приводятся результаты исследований ретрофокусировки в условиях гигантского параметрического усиления обращенной волны и селективного фазового сопряжения отдельных гармоник первичной нелинейной волны [20-23]. Приложения эффектов нелинейной ретрофокусировки иллюстрируются на примере компенсации фазовых искажений в нелинейной акустоскопии [24, 25]. Обсуждаются возможности ультразвуковой диагностики нелинейных включений с использованием автоконфокальных систем на основе ОВФ [26]. Рассматриваются физические принципы ультразвуковой велосимметрии на основе взаимодействия фазосопряженных волн в присутствии движущихся рассеивателей [27]. Демонстрируются примеры использования ОВФ ультразвука для диагностики потоков в жидкости [27, 28].

2. Нелинейное распространение ультразвуковых пучков с обращенным волновым фронтом и обращение времени

Как уже отмечалось, специфика проблемы ОВФ в нелинейной акустике связана с нарушением обратимости процессов распространения прямой и обращенной волн. Нелинейность среды, не нарушающая сама по себе инвариантности поля по отношению к обращению времени, может, однако, приводить к существенному ускорению необратимых диссипативных процессов. Такая ситуация имеет место в типичном для акустики случае формирования ударных искажений профиля волны при каскадной генерации гармоник в нелинейной среде [18, 29]. Усиление в процессе генерации волн с обращенным фронтом, излучаемых в нелинейную среду, заведомо сопряжено с нарушением обратимости волнового процесса. Наконец, полоса частот в реальных акустических системах обращения фронта, как правило, существенно ограничена, что приводит к неполноте воспроизведения спектра нелинейных волн при ОВФ. Тем не менее уже первые экспериментальные и теоретические исследования в области нелинейной ОВФ-акустики [18, 24, 25] показали, что, в отличие от нелинейной оптики, в бездисперсных нелинейных акустических средах частичное нарушение инвариантности поля по отношению к обращению времени не препятствует возможности наблюдения и использования таких эффектов, как ОВФ-автофокусировка и компенсация фазовых искажений при неоднородной рефракции.

3. Ретрофокусировка нелинейных ОВФ-пучков в неоднородной среде

На рисунке 1 представлены типичные результаты наблюдения ретрофокусировки нелинейной обращенной волны, прошедшей через аберрирующий слой [20]. Рисунок 1а иллюстрирует разрушение фокального распределения амплитуды звука аберрирующим слоем. Рисунок 1б демонстрирует восстановление распределения акустического поля в фокальной плоскости с помощью параметрического ОВФ. Фокальное распределение амплитуд отдельных гармоник нелинейной обращенной волны, прошедшей через аберрирующий слой, иллюстрируется на рис. 1в. Как показано в работах [24, 30], приведенные экспериментальные результаты объясняются пространственно-временной синхронизацией фаз гармоник при их каскадной генерации в бездисперсной среде. Концепция синхронизации фаз гармоник получила дальнейшее развитие в исследованиях процессов селективного фазового сопряжения отдельных гармоник нелинейной волны [22, 23, 25]. При этом экспериментально и теоретически было показано, что частичное воспроизведение спектра нелинейной волны при узкополосном фазовом сопряжении второй гармоники первичной волны не препятствует ретрофокусировке обращенной волны с конечной амплитудой в неоднородной нелинейной среде.



Рис. 1. Фокальное распределение давлений в падающей и обращенной волнах в фокальной плоскости (x — расстояние от оси): (а) падающая волна в отсутствие (кривая l) и при наличии (кривая 2) аберрирующего слоя; (б) нормированное среднедействующее значение давления; кривая l — для падающей волны в отсутствие аберрирующего слоя и кривая 2 — для обращенной волны при наличии этого слоя; (в) амплитуды первых четырех гармоник обращенной волны при наличии аберрирующего слоя (частота основной гармоники 10 МГп) [20].

4. Принципы нелинейной ОВФ-акустоскопии и диагностики

Исследования нелинейных явлений при обращении волнового фронта стимулируются современной тенденцией к использованию методов нелинейной акустики не только в естественных областях применения ультразвука высокой интенсивности (литотрипсия, гипертермия, ультразвуковая технология), но и в таких традиционных областях линейной акустики, как ультразвуковая диагностика и неразрушающий контроль. Одно из быстро развивающихся направлений современной акустоскопии, получившее общее название "harmonic imaging", основано на анализе гармоник, генерируемых волнами конечной амплитуды в исследуемых акустических средах. Методы "harmonic imaging" можно разделить на две основные группы. В первой группе нелинейность исследуемой среды используется для формирования зондирующего акустического пучка. Следует отметить, что использование генерации второй гармоники в акустоскопии было предложено почти тридцать лет назад для повышения разрешения акустического микроскопа [31]. Сейчас гармонический анализ находит все более широкое применение в ультразвуковой диагностике [32-34]. При нелинейном распространении сфокусированных ультразвуковых пучков фокальное распределение второй и высших гармоник нелинейной волны не только существенно уже, чем соответствующее распределение основной гармоники, но и имеет более низкий уровень боковых максимумов. Кроме того, развитие процесса генерации гармоник по мере распространения волны в глубь среды позволяет при анализе отклика понизить уровень помех, обусловленных отражениями исходной волны от границ исследуемой области. Все это в целом дает возможность существенно повысить разрешающую способность ультразвуковой диагностической аппаратуры.

Во второй группе методов "harmonic imaging" нелинейный отклик на акустическое воздействие используется как средство получения информации о нелинейных параметрах исследуемой среды и их вариации при возникновении распределенных или локальных структурных изменений (см. [35-39]). Появление микротрещин в твердом теле сопровождается возникновением так называемой контактной нелинейности, что приводит к аномальному усилению нелинейного акустического отклика и повышению эффективности взаимодействия волн различных частот [36, 37]. Особенности нелинейных свойств твердых тел находят применение в неразрушающем контроле материалов. Обсуждаются возможности диагностики патологических изменений в биологических тканях на основе анализа сопутствующих изменений их нелинейных акустических свойств [40].

Возможность гигантского усиления обращенной волны в запороговом параметрическом режиме позволила естественно распространить технику ОВФ в область нелинейной акустоскопии. Сочетание техники ОВФ с методами "harmonic imaging" продемонстрировано в работах [24, 25]. На рисунке 2 представлены результаты использования параметрического ОВФ для компенсации фазовых искажений в акустическом микроскопе при получении изображения объекта на второй гармонике обращенной волны. Внесение аберрирующего слоя в конфокальной схеме микроскопа "на проход" полностью разрушало изображение объекта, тогда как применение ОВФ позволяло не только восстановить изображение на основной частоте зондирующего пучка, но и получить изображение с повышенным разрешением на второй гармонике. На рисунке 3 представлены изображения объекта, полученные в акустическом микроскопе в условиях селективного фазового сопряжения второй гармоники зондирующего пучка [25]. Приведены изображения объекта, полученные в отсутствие и при наличии аберрирующего слоя на основной гармонике падающей волны, а также основной и второй гармониках обращенной волны. Применение селективного ОВФ отдельной гармоники падающей волны позволяет не только компенсировать фазовые аберрации, но и дает возможность значительно повысить частоту анализа в низшем порядке нелинейности. Селективное фазовое сопряжение гармоник позволяет также осуществлять автофокусировку ультразвука на локализованные объекты, характеризующиеся сильной нелинейностью, что может быть использовано для их диагностики.



Рис. 2. Восстановление акустических изображений объекта, искаженных аберрирующим слоем, с помощью обращения фазы основной гармоники падающей волны: (а) схема эксперимента (О — объект, *I* — приемо-излучающий преобразователь, 2 — магнитоакустический ОВФ-усилитель, 3 — аберрирующий слой); (б, г) изображения, полученные в конфокальной схеме (КС) микроскопа на частотах основной и второй гармоник падающей волны; (в, д) восстановленные изображения (ОВФ) [25].



Рис. 3. Акустические изображения объекта на частоте падающей волны 5 МГц в конфокальной системе в отсутствие (а) и при наличии (б) аберрирующего слоя. (в, г) Изображения при наличии аберрирующего слоя, полученные на частотах 10 и 20 МГц с помощью фазового сопряжения второй гармоники падающей волны [25].



Рис. 4. Акустоскопия включения с помощью второй гармоники обращенной волны: (а) геометрия задачи (I — приемо-излучающий преобразователь, 2 — ОВФ-усилитель, β и β_0 — нелинейные параметры включения и окружающей акустической среды); (б) зависимость превышения уровня сигнала второй гармоники над фоном при изменении положения сферического включения диаметром 3 мм относительно фокуса (параметры задачи: $\omega/2\pi = 10$ МГц, ($\beta - \beta_0$)/ $\beta_0 = 0, 1, d = 30$ мм, апертура преобразователя 15 мм) [26].

Автоматическая конфокальность акустических систем, обеспечиваемая принципом ОВФ, в сочетании с возможностью компенсации фазовых аберраций представляет интерес, в частности, для нелинейной диагностики включений, детектирование которых методами линейной акустоскопии затруднено. Особенность процесса генерации второй гармоники в конфокальных системах, обусловленная скачком фазы нелинейных источников в фокальной плоскости, позволяет осуществлять локальную диагностику распределения нелинейного параметра с помощью второй гармоники зондирующей волны [41, 42]. В работе [26] рассмотрена возможность получения изображения локального включения на второй гармонике сфокусированной обращенной волны. На рисунке 4 приведены геометрия рассматриваемой системы и результаты расчета зависимости амплитуды сигнала второй гармоники на приемо-излучающей антенне от положения включения в фокальной области. Расчет показывает, что даже при сравнительно малом размере включения относительное превышение сигнала второй гармоники над фоном имеет тот же порядок величины, что и относительное отклонение нелинейных параметров включения и окружающей акустической среды.

5. Применение ОВФ в велосимметрии

и диагностике потоков

В работах [27, 43] продемонстрирована возможность использования самонацеливания ультразвуковых волн с обращенным фронтом на рассеивающий объект для определения скорости движения рассеивателя. В экспериментах [44, 45] по генерации ультразвука низкой комбинационной частоты встречными фазосопряженными волнами близких частот, взаимодействующими в окрестности рассеивающего объекта, была обнаружена аномальная чувствительность фазы генерируемой волны к изменению положения рассеивателя. Движение рассеивателя сопровождалось аномальным доплеровским сдвигом частоты низкочастотной волны. В отличие от обычного доплеровского смещения, пропорционального несущей частоте волны, регистрируемый сдвиг пропорционален удвоенной частоте одной из взаимодействующих волн высокой частоты, распространяющейся в направлении приемника низкочастотного излучения. Эффект обусловлен сложением фаз сопряженных волн при формировании акустического излучения разностной частоты. В работах [27, 43] продемонстрирована возможность использования этого эффекта для измерения скоростей рассеивателя в широких пределах (от 0,05 до $300 \,\mathrm{MM}\,\mathrm{c}^{-1}$ на комбинационной частоте излучения 1 МГц). При этом измеряемый доплеровский сдвиг на порядок превышал значения, характерные для данной частоты излучения при заданной скорости движения рассеивателя.

Принцип обращения волнового фронта предполагает восстановление фазы волны на источнике излучения независимо от величины фазовых набегов на прямом и обратном пути распространения волн. Восстановление фазы реализуется как в однородных, так и в неоднородно рефрактивных средах. Наличие потоков в среде распространения нарушает инвариантность акустического поля по отношению к обращению времени, что приводит к сдвигу фазы обращенной волны на приемо-излучающей антенне. Ранее явление той же природы наблюдалось в виде накапливающихся искажений волнового фронта при многократном прохождении обращенных волн через вихрь в жидкости [46]. В работах [27, 28] с помощью анализа изменений фазы обращенной волны при сканировании сфокусированного пучка в области потока получены изображения распределения скорости потоков различной геометрии в воде. В экспериментах, наряду с анализом фазы основной гармоники обращенной волны, использовался анализ фаз второй гармоники и сигналов низкой комбинационной частоты, генерируемых при взаимодействии фазосопряженных волн близких частот [28]. На рисунке 5 приведены схема эксперимента работы [28] и результат визуализации потока, инжектированного в воду. Изображение получено с помощью анализа фазы волны низкой частоты 1 МГц, генерируемой при попутном взаимодействии второй гармоники обращенной волны с частотой 20 МГц, отраженной от излучающей антенны, и вспомогательного импульса с частотой 19 МГц. Использование второй гармоники вдвое увеличивало регистрируемый фазовый сдвиг, а акустическое гетеродинирование более чем на порядок повышало отношение сигнал/шум при цифровой обработке принятых сигналов.

6. Заключение

Представленные результаты показывают эффективность запорогового параметрического метода ОВФ ультразвука в приложениях нелинейной акустики. Продемонстрированная экспериментально и теоретически ОВФ-



Рис. 5. Диагностика потока в воде с помощью ОВФ: (а) схема эксперимента (T1, T2 — излучающий и приемный преобразователи, С — ОВФусилитель, М — отклоняющая пластина); (б) акустическое изображение распределения скорости в потоке [28].

ретрофокусировка ультразвука в неоднородно рефрактивных средах в условиях нарушения обратимости волновых процессов вследствие усиления обращенных волн и неполноты воспроизведения спектра нелинейных волн при ОВФ создает основу для разработки новых методов в нелинейной акустоскопии и диагностике. Физические принципы, лежащие в основе этих методов, отчасти проиллюстрированы на примерах "harmonic imaging", нелинейной ультразвуковой велосимметрии и диагностики потоков. Можно без преувеличения констатировать, что нелинейная акустика волн с обращенным фронтом становится в последнее время одним из наиболее актуальных направлений физической акустики и техники ультразвука. Необходимо отметить фундаментальный вклад Российской академии наук в это новое научное направление и в исследования явлений ОВФ в акустике в целом.

В заключение автор выражает благодарность Ф.В. Бункину за инициирование и систематическую поддержку работ в области акустического ОВФ и коллективу российско-французской Объединенной европейской лаборатории нелинейной магнитоакустики конденсированных сред (LEMAC) за плодотворное сотрудничество.

Публикация подготовлена в рамках программы фундаментальных исследований РАН "Когерентные акустические поля и сигналы", международных программ ECONET 08-154YE и INTERREG-IIIа-58 при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-02-19640-НЦНИЛ_а) и посольства Франции в Москве.

Список литературы

- 1. Бункин Ф В, Кравцов Ю А, Ляхов Г А *УФН* **149** 391 (1986)
- Брысев А П, Крутянский Л М, Преображенский В Л УФН 168 877 (1998)
- 3. Брысев А П и др. Акуст. журн. **34** 986 (1988)
- 4. Брысев А П и др. *Акуст. журн.* **34** 1120 (1988)
- 5. Ohno M Appl. Phys. Lett. 54 1979 (1989)
- 6. Ohno M et al. J. Acoust. Soc. Am. 106 1330 (1999)
- 7. Fink M, Prada C, Wu F, in Proc. of the IEEE Ultrasonics Symp., Montreal, PQ, 1989 Vol. 2, p. 681
- 8. Fink M IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics Frequency Control **39** 555 (1992)
- 9. Montaldo G et al. J. Acoust. Soc. Am. 110 2849 (2001)
- Sutin A, Sarvazyan A, in Proc. of the World Congress on Ultrasonics, Paris, France, 2003 Vol. 2, p. 863
- 11. Brysev A P, Krutyansky L M, Preobrazhensky V L *Phys. Vibrations* **9** (1) 52 (2001)

- 12. Bou Matar O, Preobrazhensky V, Pernod P J. Acoust. Soc. Am. 118 2880 (2005)
- 13. Брысев А П и др. *Письма в ЖЭТФ* **61** 454 (1995)
- 14. Yamamoto K et al. J. Acoust. Soc. Am. 106 1339 (1999)
- 15. Brysev A et al. Appl. Phys. Lett. 76 3133 (2000)
- 16. Fink M et al. Rep. Prog. Phys. 63 1933 (2000)
- 17. Брысев А П и др. Акуст. журн. 44 738 (1998)
- Brysev A P et al., in Nonlinear Acoustics at the Turn of the Millennium: ISNA 15, 15th Intern. Symp. on Nonlinear Acoustics, Göttingen Germany, 1-4 September 1999 (AIP Conf. Proc., Vol. 524, Eds W Lauterborn, T Kurz) (Melville, NY: AIP, 2000) p. 183
- 19. Брысев А П и др. Акуст. журн. **50** 725 (2004)
- 20. Брысев А П и др. *Письма в ЖЭТФ* 73 434 (2001)
- 21. Cunningham K B et al. J. Acoust. Soc. Am. 109 2668 (2001)
- 22. Brysev A P et al. Phys. Wave Phenom. 11 10 (2003)
- 23. Preobrazhensky V L, Pernod P Phys. Wave Phenom. 11 63 (2003)
- Pyl'nov Yu, Pernod P, Preobrazhensky V Appl. Phys. Lett. 78 553 (2001)
- 25. Krutyansky L et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics Frequency* Control **49** 409 (2002)
- 26. Preobrazhensky S V, Preobrazhensky V L, Pernod P Phys. Wave Phenom. 13 24 (2005)
- Пыльнов Ю В, Перно Ф, Преображенский В Л Акуст. журн. 51 105 (2005)
- Pyl'nov Yu et al., in Proc. of the IEEE Ultrason. Symp., Rotterdam, 2005, Abstracts, p. 535
- 29. Hallaj I M et al. Ultrasonics 38 885 (2000)
- Preobrazhensky V, Pernod P, in Proc. of the 17th Intern. Congress on Acoustics, Rome, Italy, September 2-7, 2001 Vol. 201 Physical Acoustics Pt. A (Eds A Alippi et al.) (Roma: ICA, 2002) p. 26
- 31. Kompfner R, Lemons R A Appl. Phys. Lett. 28 295 (1976)
- 32. Ward B, Baker A C, Humphrey V F J. Acoust. Soc. Am. 101 143 (1997)
- 33. Averkiou M A, Roundhill D N, Powers J E, in *Proc. of the IEEE Ultrasonics Symp.*, 1997 Vol. 2, p. 1561
- 34. Averkiou M A, in *Proc. of the IEEE Ultrasonics Symp.*, 2000 Vol. 2, p. 1563
- 35. Руденко О В Неразрушающий контроль 29 583 (1993)
- 36. Solodov I Yu Ultrasonics 36 383 (1998)
- 37. Zeng Y, Maev R G, Solodov I Yu Can. J. Phys. 77 927 (1999)
- Van Den Abeele K E-A, Johnson P A, Sutin A Res. Nondestr. Eval. 12 17 (2000)
- 39. Van Den Abeele K E-A et al. Res. Nondestr. Eval. 12 31 (2000)
- 40. Vignon F et al., in Proc. of the IEEE Ultrason. Symp., Rotterdam, 2005, Abstracts, p. 360
- 41. Lucas B G, Muir T G J. Acoust. Soc. Am. 74 1522 (1983)
- 42. Kim B C , Saito S J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 10 143 (1989)
- 43. Pyl'nov Yu, Preobrazhensky V, in Proc. of the IEEE Ultrasonics Symp., Montreal, 2004 Vol. 3, p. 1612
- 44. Pylnov Y, Pernod P, Preobrazhensky V Acta Acust. Acust. 89 942 (2003)
- 45. Pyl'nov Yu, Pernod P, Preobrazhensky V, in *Proc. of the IEEE Ultrasonics. Symp., 2001* Vol. 1, p. 397
- 46. Roux P,Fink M, in *Proc. of the 4th French Congr. on Acoustics* Vol.1 (Marseille: Teknea 1997) p. 951