АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2003, том 49, № 6, с. 799–805

УДК 534

ПЛЕНОЧНЫЙ ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ФОКУСИРОВАННЫЙ ГИДРОФОН ДЛЯ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2003 г. А. Н. Жаринов, А. А. Карабутов, В. В. Кожушко, И. М. Пеливанов, В. С. Соломатин, Т. Д. Хохлова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Международный лазерный центр
119992 Москва, Ленинские горы
E-mail: aak@sasha.phys.msu.su

Поступила в редакцию 02.12.2002 г.

Впервые экспериментально и теоретически исследованы особенности регистрации широкополосных акустических сигналов сфокусированным пленочным приемником. Приемник имел вид узкой полоски ПВДФ, расположенной по направляющей цилидра в радиальной плоскости. Разработан программный пакет, позволяющий рассчитывать импульсные функции отклика в зависимости от пространственного положения точечного источника сферических волн. Экспериментальные исследования проводились с лазерными термооптическими источниками импульсов сферических акустических волн, для возбуждения которых использовался импульсный Nd : YAG лазер с диодной накачкой. Продемонстрировано, что численно рассчитанные и измеренные временные формы зарегистрированных приемником сигналов хорошо соответствуют друг другу в области, расположенной вблизи фокуса приемника. Для данной области экспериментально определена карта пространственной чувствительности приемника. Абсолютное значение чувствительности приемника при источнике, расположенном в фокусе приемника, составило 8 мкВ/Па.

Лазерная оптико-акустическая (ОА) томография является одним из наиболее перспективных новых методов в диагностике биотканей. Наиболее очевидным и, насколько сейчас представляется, наиболее важным ее применением является диагностика рака молочной железы на ранних стадиях [1, 2]. В этом случае необходима визуализация поглощающего свет объекта, имеющего размер несколько миллиметров и расположенного на глубине несколько сантиметров в рассеивающей свет среде. В макете такой системы [2] использовался Nd : YAG лазер с модуляцией добротности в качестве источника пробного излучения, оптоволоконная система доставки и 32-канальная пьезоантенна на основе ПВДФ-пленки толщиной 110 мкм. Пьезоэлементы имели размер 3 × 12.7 мм и располагались на дуге окружности радиусом 60 мм с шагом 4 мм. Эксперименты, проведенные на модельных фантомах, ex-vivo и in-vivo показали высокую контрастность получаемого изображения и достаточно высокое разрешение (~1 мм) в плоскости изображения [2]. Разрешение в перпендикулярном плоскости изображения направлении, однако, определялось длиной пьезоэлемента и глубиной расположения объекта и составляло 15–20 мм, что трудно признать удовлетворительным.

В настоящей работе рассматривается не плоский, а фокусированный пленочный приемник, что позволит повысить разрешающую способность в направлении, перпендикулярном плоскости изображения. Приемник представлял собой узкую прямоугольную полоску ПВДФ-пленки, закрепленную на образующей цилиндрической поверхности (см. рис. 1). Выбор его геометрических размеров – радиуса кривизны R_0, длины элемента l, ширины h и толщины d – определяется в первую очередь условиями задачи томографии.

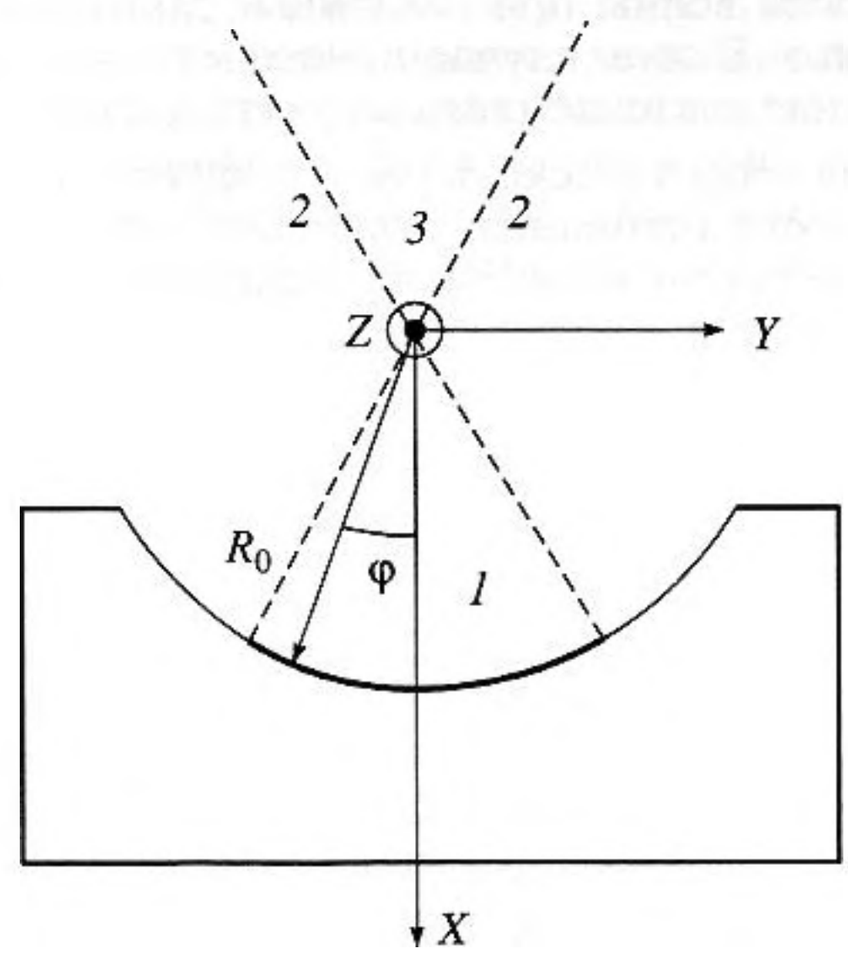

Рис. 1. Принципиальная схема пьезоприемника.

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование импульсной переходной характеристики описанного выше широкополосного цилиндрического приемника и построение "пространственной карты" чувствительности для точек, расположенных вблизи его фокуса. Решение данной задачи необходимо для определения параметров и разработки оптимальной конструкции широкополосной многоэлементной антенны для лазерной ОА-томографии биологических объектов.

В задачах оптико-акустической томографии используются временны́е формы ультразвуковых сигналов, поэтому целесообразно анализировать импульсные переходные, а не спектральные характеристики пьезоприемников. Расчет отклика демпфированного приемника конечных размеров на короткий импульс сферической волны представляет собой сложную задачу, которая может быть решена только численно. Поэтому представляется важной разработка упрощенных методов расчета, которые тем не менее давали бы близкие к точным результаты.

В работе рассматриваются две импульсные переходные характеристики пьезоприемника. Первая из них, которую мы будем в дальнейшем называть "импульсная переходная характеристика", есть отклик плоского пьезоприемника на плоскую волну, распространяющуюся нормально к его поверхности и имеющую вид δ-импульса. Она учитывает конечность полосы пропускания приемника, связанную с его конструктивными особенностями. Другая переходная характеристика, которую мы будем называть "функцией отклика точечного источника", есть отклик пьезоэлемента конечной апертуры (вообще говоря, с криволинейной поверхностью) на δ-импульс сферической волны при различных положениях источника. В этом случае конечность полосы пропускания пьезоэлемента не учитывается.

Для теоретического расчета функций отклика точечного источника у приемника с произвольной апертурой может быть использован интеграл Рэлея [3–5]:

$$h(r,t) = \int_S \frac{\delta\left(t - \frac{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1|}{c}\right)}{2\pi|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1|} dS, \qquad (1)$$

здесь S – поверхность приемника, $\mathbf{r}_0$ – радиус-вектор источника, $\mathbf{r}_1$ – радиус-вектор, проведенный к элементу поверхности S.

Физический смысл (1) заключается в том, что величина отклика в некоторый момент времени пропорциональна площади, заметаемой по поверхности апертуры приемника сферической волной за бесконечно малый промежуток времени. Аналитически интеграл (1) может быть вычислен, если поверхность приемника представляет собой, например, плоский многоугольник. Однако в большинстве случаев нахождение функции отклика точечного источника требует численных расчетов. Случай плоских ограниченных апертур исследован достаточно подробно (см., например, [3–5]). В [5] предлагаются алгоритмы, позволяющие оптимизировать скорость вычислений.

Представим поверхность пьезоэлемента как совокупность конечного числа элементов – малых плоских апертур. При численном расчете интеграла Рэлея их площадь напрямую связана с временем дискретизации так, что в пределах этого малого промежутка времени фронт акустической волны проходит по поверхности приемника расстояние, много меньшее, чем расстояние от источника до приемника. Поэтому заметаемую элементарную поверхность можно приближенно считать плоской, и тогда подход, рассматриваемый в работах [3, 5], применим к расчету функции отклика точечного источника фокусированного приемника. Функция отклика определялась для положений источников вблизи фокуса приемника. Эта область является наиболее интересной, так как в ней должна наблюдаться максимальная чувствительность. Угол между линией, соединяющей источник и участок апертуры, и нормалью к данному участку не превышает 12 градусов, что значительно меньше критического угла для плоской продольной волны, падающей из жидкости на поверхность оргстекла [6] (акустические импедансы ПВДФ-пленки и оргстекла являются близкими). Таким образом, изменение коэффициента прохождения волны для всех рассматриваемых точек будет не более 3% от максимума. Преобразованием продольной волны в сдвиговую на границе раздела также можно пренебречь ввиду малости углов падения. Предлагаемый подход, хотя и является приближенным, но позволяет установить основные закономерности сфокусированной регистрации акустических импульсов для источников, расположенных вблизи фокуса приемника.

Расчет функции отклика точечного источника проводился в цилиндрической системе координат (ось Z совпадает с осью цилиндра, на котором расположен приемник, с началом координат в фокусе приемника – точке пересечения плоскости симметрии и оси Z) (рис. 1). Тогда радиус-вектор точечного источника и радиус-вектор элемента поверхности приемника записываются как (r_0, φ_0, z_0) и (R_0, φ, z) соответственно. Здесь R_0 – радиус кривизны цилиндрической поверхности, φ изменяется в пределах угла раскрыва $\mp\varphi_0 = \pm(l/2R_0)$, Z изменяется в пределах ширины пленки $\mp h/2$. В

данных обозначениях интеграл Рэлея принимает вид:

$$h(t, r_0, \varphi_0, z_0) = \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} d\varphi \int_{-h/2}^{h/2} dz R_0 \times$$

$$\times \frac{\delta\left(t - \frac{\sqrt{r_0^2 + R_0^2 + (z - z_0)^2 - 2R_0 r_0 \cos(\varphi - \varphi_0)}}{c}\right)}{2\pi\sqrt{r_0^2 + R_0^2 + (z - z_0)^2 - 2R_0^2 r_0 \cos(\varphi - \varphi_0)}}, \quad (2)$$

где c – фазовая скорость звука в среде. Функция отклика точечного источника отлична от нуля только на интервале времени $[t_{\min} = R_{\min}/c,\ t_{\max} = R_{\max}/c]$, где $R_{\min}$ и $R_{\max}$ – расстояния от источника до ближайшего и наиболее удаленного элементов апертуры.

Теоретически рассчитанные функции отклика точечного источника цилиндрически фокусированного пьезоприемника приведены на рис. 2. Для источника, находящегося в фокусе приемника, отклик будет иметь вид δ-функции, поскольку частотная полоса приемника в расчетах функции отклика полагалась неограниченной. Для источника, расположенного ближе фокуса (кривая *1*, пространственная область "1"), сферическая волна сначала достигает элементарного участка поверхности пьезоэлемента, нормаль к которой проходит через источник, а потом – краев. Поэтому функция отклика точечного источника имеет резкий передний фронт (см. рис. 2), соответствующий моменту "касания" пьезоэлемента волной, затем спадающий участок в соответствии с уменьшением площади, заметаемой по поверхности приемника сферической волной, и резкие срезы, появляющиеся в моменты пересечения сферической волной краев пьезоэлемента. Для источника, расположенного за фокусом (кривая *3* на рис. 2, область "3" на рис. 1), картина обратная – фронты соответствуют временам прихода волны на края пьезоэлемента; отклик нарастает во времени, и резкий срез появляется в момент окончания прохода волны.

Для источника, лежащего вне угла раскрыва приемника (области "2" на рис. 1), функция отклика точечного источника будет достаточно протяженной, причем волна может достигнуть приемника как раньше (сплошная кривая *2* на рис. 2), так и позже (пунктирная кривая *2* на рис. 2) волны, идущей из фокуса. Передний фронт соответствует моменту пересечения волной ближайшего края пьезоэлемента, срез – дальнего. Относительные уровни переднего и заднего фронтов зависят от положения источника выше или ниже уровня фокуса. Поскольку волна в этом случае как бы бежит вдоль пьезоэлемента, величина отклика будет меньше, чем для источников, расположенных в областях "1" и "3". Это вполне естественно для остро фокусированного приемника и отвечает задаче оптико-акустической томографии с высоким пространственным разрешением.

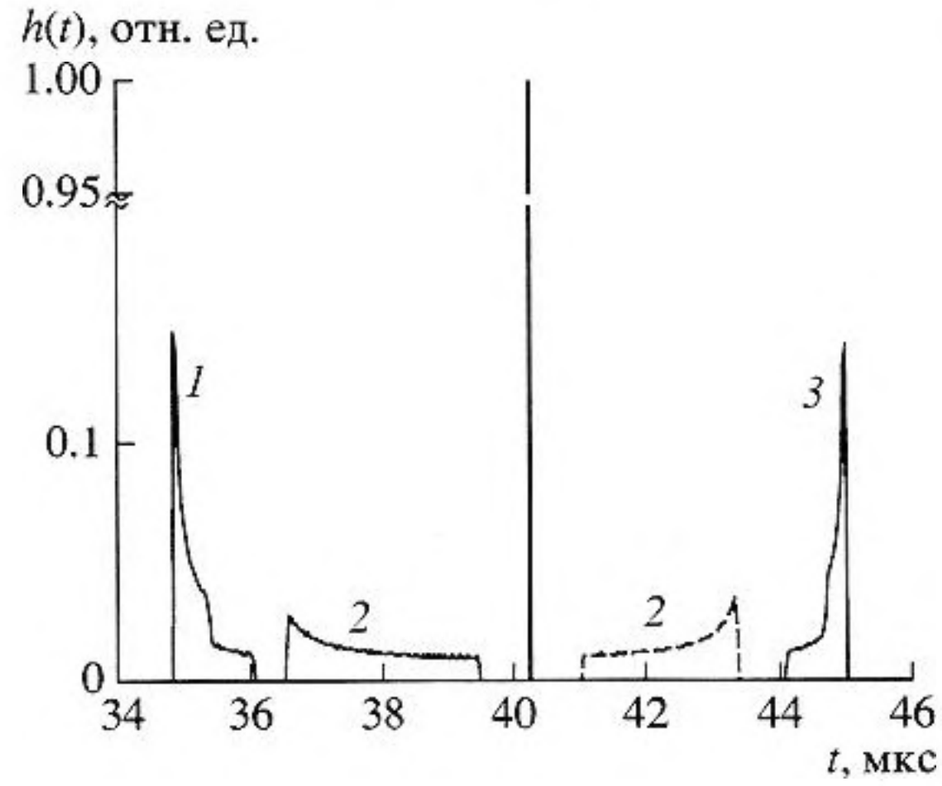

Рис. 2. Импульсные функции откликов точечного источника, расположенного в различных пространственных областях (цифры над кривыми), указанных на рис. 1. Центральный пик соответствует отклику от источника, находящегося в фокусе приемника с углом раскрыва 60°.

Для экспериментальных исследований функций отклика точечного источника использовалась установка, включавшая импульсный Nd : : YAG лазер с диодной накачкой (LCS-DTL-324Q, LaserCompact Co Ltd, Россия) с длительностью импульса $\tau_L = 8$ нс и частотой повторения импульсов 500 Гц. Его излучение по волокну доставлялось к источнику ОА-сигнала, в качестве которого использовалась пленка из черного полиэтилена толщиной 20 мкм, помещенная в иммерсионную жидкость – дистиллированную воду. Поскольку акустический импеданс полиэтилена близок к импедансу воды, систему можно было считать акустически однородной. Лазерный пучок на поверхности пленки имел диаметр порядка 1 мм, а энергия лазерного импульса составляла 70–80 мкДж. Электрический сигнал усиливался предусилителем и регистрировался с помощью осциллографа Tektronix TDS220 с усреднением по 128 реализациям, обеспечивая динамический диапазон измерений >40 дБ.

В нашем случае полоска пьезоэлемента имела длину $l = 60$ мм, ширину $h = 1$ мм и толщину $d = 110$ мкм, радиус кривизны $R_0 = 60$ мм. В качестве материала подложки использовалось оргстекло ввиду близости его акустического импеданса к импедансу ПВДФ-пленки. Толщина оргстекла составляла 80 мм, что обеспечивало временнóе окно измерений более 60 мкс. Рассчитанный частотный диапазон приемника составлял 50 кГц–3.5 МГц (по уровню $1/e$). Перемещение ОА-ис-

точника в плоскости пьезоприемника проводилось по двум координатам с помощью микрометрических винтов (декартовы координаты X, Y (рис. 1)).

Рассмотренные выше импульсные отклики пьезоэлемента получены в предположении бесконечной полосы приема пьезоэлемента и δ-образного импульса. В экспериментальных исследованиях полоса приема была конечна, а возбуждаемый импульс не имел вид короткого однополярного всплеска. Поэтому для сравнения откликов, полученных в эксперименте, с сигналами, рассчитанными теоретически, бралась свертка функции отклика точечного источника (2) с формой возбуждаемого ОА-сигнала сферической волны и импульсной переходной характеристикой плоского пьезоэлемента. Как отмечалось выше, при вычислении интеграла Рэлея мы вводили время дискретизации так, чтобы в пределах этого промежутка Δt фронт акустической волны проходил по поверхности приемника расстояние, много меньшее, чем расстояние от источника до приемника. Поэтому заметаемая за Δt элементарная поверхность приближенно рассматривалась как плоская. Таким образом полагалось, что сферическая волна от точечного источника в каждый момент времени падает на плоскую ограниченную поверхность приемника. Так как все исследования, проводимые в настоящей работе, относятся к области, расположенной вблизи фокуса приемника, зависимость коэффициента прохождения волны от угла падения на приемник и эффекты преобразования мод исключались из нашего рассмотрения.

Относительная комплексная спектральная чувствительность пленочного приемника на частоте f, работающего в режиме холостого хода [7], пропорциональна разности смещений частиц на границах пьезоэлемента:

$$S(f) = A\int_0^d \frac{\partial \xi}{\partial x}dx, \tag{3}$$

где ξ – смещение частиц среды, d – толщина ПВДФ-пленки, A – константа, зависящая от продольного пьезомодуля и диэлектрической проницаемости пленки.

Импульсная переходная характеристика плоского приемника есть обратное преобразование Фурье от функции $S(f)$. Для ее численного расчета был использован модифицированный матричный метод [8]. В основе метода лежат условия непрерывности давления и колебательной скорости частиц отдельных гармоник на границах раздела сред многослойной структуры, что позволяет находить частотные спектры давления и колебательной скорости в любом слое. В конструкции приемника ПВДФ-пленка располагалась между полупространствами воды и оргстекла. При этом его относительная комплексная спектральная чувствительность выражается аналитически:

$$S(f) = A\frac{i2z_2c_2/(2\pi f)(2z_2 - i2z_2\sin(2\pi fd/c_2) - 2z_3\cos(2\pi fd/c_2))}{(z_1+z_2)(z_2+z_3)\exp(i2\pi fd/c_2) + (z_1-z_2)(z_2-z_3)\exp(-i2\pi fd/c_2)}, \tag{4}$$

где z_1, z_2 и z_3 – акустические импедансы воды, ПВДФ-пленки и оргстекла соответственно; c_2 – скорость звука в ПВДФ-пленке. Поскольку длительность лазерного импульса была мала по сравнению с временем пробега звука по области тепловыделения, форма возбуждаемого ОА-сигнала зависит только от геометрии области тепловыделения [9, 10]. В нашем случае форма ОА-сигнала на приемнике определялась распределением энергии по пятну лазерного луча и в первом приближении могла считаться производной гауссова импульса, ограниченного в спектре частотой f_{max} = 4 МГц (по уровню $1/e$).

В ходе эксперимента были получены зависимости сигналов (см. рис. 3), регистрируемых приемником для различных положений ОА источника в плоскости (XY). На рис. 3а приведены временны́е формы рассчитанного и экспериментально измеренного сигналов, полученных для источника, помещенного в фокус приемника. В этом случае длительность функции отклика будет минимальной из всех возможных (см. рис. 2), так как ко всем элементам апертуры приемника фронт сферической волны придет в один и тот же момент времени; ее влияние на форму регистрируемого сигнала будет минимальным. Теоретически рассчитанные, так же как и экспериментальные ОА-сигналы нормировались на амплитуду импульса, соответствующего положению источника в фокусе. ОА-сигнал состоит из фазы сжатия и более длительной фазы растяжения, что объясняется особенностями импульсной переходной характеристики приемника. Как видно, экспериментально полученные временны́е формы сигналов хорошо совпадают с рассчитанными теоретически. Измеренная для данного положения источника абсолютная низкочастотная чувствительность пьезоприемника составила 8 мкВ/Па.

На рис. 3б приведены расчетная и экспериментальная формы сигнала фокусированного пьезоприемника для источника, находящегося в области "1" (рис. 1). Функции отклика точечного

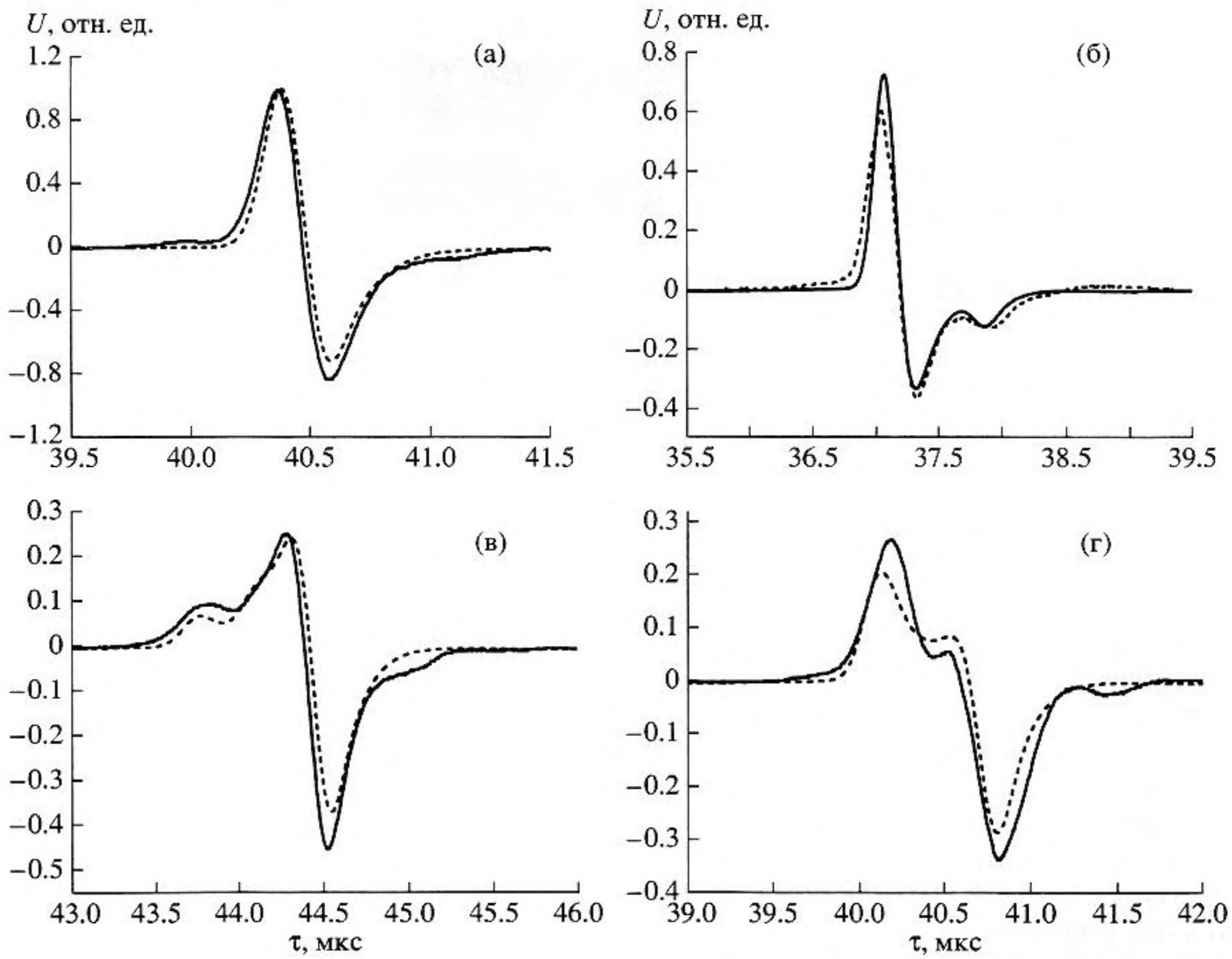

Рис. 3. Экспериментальные (сплошные линии) и теоретически рассчитанные (пунктирные линии) временны́е формы оптико-акустических сигналов, зарегистрированных приемником, для положения источника сферической волны в различных пространственных областях: а – в фокусе приемника, б – в области "1", в – в области "3", г – в области "2".

источника определяют временны́е формы результирующих сигналов. Поэтому амплитуда фазы сжатия превышает амплитуду фазы разрежения. Для источника, расположенного в области "3", максимум функции отклика наблюдается в момент прихода фронта волны к наиболее удаленному элементу апертуры, нормаль к которому проходит через источник. Сначала акустический сигнал достигает крайних точек апертуры, а нормальная компонента появляется в последний момент, что дает выраженный минимум в результирующем сигнале, т.е. амплитуда фазы разрежения (рис. 3в) превышает амплитуду фазы сжатия.

При положении источника в области "2" ОА-сигнал расплывается по отрезку времени, ограниченному t_{min} и t_{max} (рис. 3г). В областях "1" и "3" амплитуда сигнала́ выше, чем от точек, имеющих такое же значение X в "2", так как на симметричные по отношению к нормали элементы апертуры фронт волны приходит одновременно. Положение источника на оси X дает максимум результирующего сигнала для данной координаты X. При этом в каждой из областей смещение от оси симметрии X увеличивает время пробега по апертуре, что, естественно, уменьшает относительный отклик. Перемещение источника вдоль оси Z сохраняет зонные зависимости с той лишь разницей, что в расчет включается время пробега по пленке вдоль оси Z, и снижает относительный уровень отклика.

Для определения области пространственной чувствительности приемника проводились следующие измерения. С помощью микрометрических винтов ОА-источник смещался вдоль осей Y и X с шагом 0.4 и 3 мм соответственно. Зарегистрированные приемником акустические сигналы интегрировались, определялись их максимальные значения, которые затем наносились на карту. Данная процедура объясняется тем, что именно интеграл от ОА-импульса в дальней дифракционной зоне несет информацию о распределении тепловых источников в среде, т.е. о пространственном распределении поглощающих неоднородностей [10]. Операция, описанная выше, позволяет

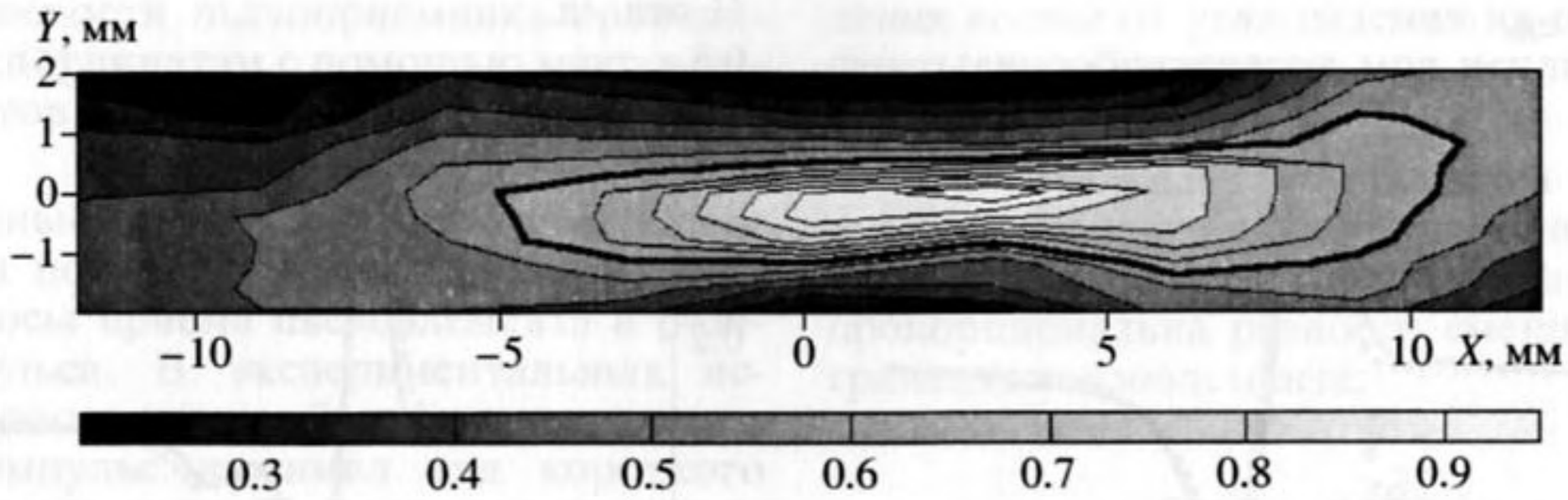

Рис. 4. Экспериментально полученная карта пространственной чуствительности приемника. Жирная линия ограничивает область, в которой амплитуда интеграла оптико-акустического сигнала составляет более чем 0.5 от максимального значения.

определить пространственную область чувствительности приемника и оценить возможность восстановления положения и размеров реальных источников. На рис. 4 представлена область 4 × × 24 мм, в центре которой находится фокус приемника. Полученные экспериментальные результаты подтверждают предварительные теоретические оценки, т.е. пространственная чувствительность приемника быстро изменяется вдоль Y и достаточно медленно вдоль X. Область, в которой амплитуда интеграла уменьшается в два раза (на рис. 4 она выделена жирной линией), ограничена грушевидной зоной, расположенной основанием к антенне.

Таким образом, в работе проведены теоретические и экспериментальные исследования широкополосного фокусированного пленочного ПВДФ-приемника. Теоретически рассчитаны импульсные функции откликов точечного источника цилиндрически фокусированного приемника для различных положений источника в плоскости регистрации. Проведены измерения временных форм откликов приемника на ОА-сигналы от импульсного источника сферической волны, частотный спектр которого был ограничен полосой с f_{max} = 4 МГц (по уровню $1/e$). Полученное значение абсолютной чувствительности приемника для источника, расположенного в его фокусе, составило 8 мкВ/Па. По данным экспериментальных исследований построена карта пространственной чувствительности приемника. Показано, что зона чувствительности предложенной конструкции приемника локализована в области перетяжки 2 × 15 мм (по уровню 0.5). Соответствие расчетных и измеренных откликов фокусированного пьезоэлемента позволяет говорить о применимости использованной приближенной модели для решения поставленной задачи. Совокупность полученных теоретических и экспериментальных результатов будет использована при проектировании многоэлементной антенны для решения задачи оптико-акустической томографии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 01-02-16539, 02-02-08008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kruger R.A., Reinecke D.R., Kruger G.A.* Thermoacoustic computed tomography // Medical Physics. 1999. V. 26(9). P. 1832–1837.
2. *Andreev V.G., Karabutov A.A., Solomatin S.V., Savateeva E.V., Aleynikov V.L., Zhulina Y.V., Fleming R.D., Oraevsky A.A.* Opto-acoustic tomography of breast cancer with arc-array transducer // Proc. SPIE. 2000. V. 3916. P. 36–47.
3. *Stepanishen P.R.* Acoustic transients from planar axisymmetric vibrators using the impulse function // J. Acoust. Soc. Amer. 1981. V. 70. P. 1176–1181.
4. *Andreev V.G., Karabutov A.A., Ponomaryov A.E., Oraevsky A.A.* Detection of optoacoustic transients with a rectangular transducer of finite dimension // Proc. SPIE. 2002. V. 4618. P. 153–162.
5. *Jensen J.A.* A new calculation procedure for spatial impulse responses in ultrasound // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105(6). P. 3266–3274.
6. *Каневский И.Н.* Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн. М.: Наука, 1977. 336 с.
7. *Кайно Г.* Акустические волны. Устройства визуализации и аналоговой обработки сигналов. М.: Мир, 1990. 656 с.
8. *Карабутов А.А., Кожушко В.В., Пеливанов И.М., Митюрич Г.С.* Интерференция встречных продольных акустических волн в изотропной поглощающей пластинке и периодической структуре с дефектами // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 890–896.
9. *Лямшев Л.М.* Лазерное термооптическое возбуждение звука. М.: Наука, 1989. 240 с.
10. *Гусев В.Э., Карабутов А.А.* Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.

Wideband Focused Film Transducer for Optoacoustic Tomography

A. N. Zharinov, A. A. Karabutov, V. V. Kozhushko, I. M. Pelivanov, V. S. Solomatin, and T. D. Khokhlova

The response of a focused film transducer to wideband acoustic signals is studied both theoretically and experimentally. The transducer has the form of a narrow PVDF strip placed on a concave cylindrical surface. A software package is developed for calculating the impulse transient response functions depending on the position of the point source of spherical waves. The experiments are performed using laser thermooptical sources of acoustic spherical wave pulses excited by a pulsed diode-pumped Nd:YAG laser. The theoretical and measured temporal profiles of signals recorded by the transducer are shown to be in good agreement for the source positioned near the transducer's focus. For this region, the transducer sensitivity map is constructed. For the case of the source positioned at the focus of the transducer, the absolute value of the transducer sensitivity is 8 μV/Pa.