

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 534.2:517.9

СОЗДАНИЕ УПРАВЛЯЕМОЙ АНИЗОТРОПНОЙ
ПОДСВЕТКИ В КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СХЕМАХ
АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

© 2018 г. В. А. Буров^а, О. Д. Румянцева^{а, *}, К. В. Дмитриев^{а, **}

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет
119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы, Россия

*e-mail: burov@phys.msu.ru

**e-mail: kdmitrie@aesc.msu.ru

Поступила в редакцию 27.12.2017 г.

Рассматривается возможность создания управляемой анизотропной подсветки в акустических томографических устройствах с корреляционной обработкой экспериментальных данных. Обсуждаются принципиальные трудности организации анизотропной подсветки в схемах с кольцевой антенной решеткой. Показано, что в схемах с фокусирующими элементами подсветка оказывается реализуемой; оценивается выходное отношение сигнал/помеха.

Ключевые слова: акустическая термотомография, анизотропная подсветка, температура объекта, скорость звука, поглощение, фокусирующие корреляционные схемы

DOI: 10.1134/S0320791918040032

ВВЕДЕНИЕ

Под термином “акустическая термотомография” понимается процесс восстановления пространственного распределения температурных характеристик исследуемых объектов (в первую очередь биологических объектов) с целью того или иного вида диагностики. Эта проблема по своей постановке и методам ее решения относится к типичной обратной задаче некогерентного излучения. Входными данными для ее решения являются акустические поля, которые излучаются нагретыми областями томографируемого объекта, а также падают на объект извне и рассеиваются на нем за счет акустических неоднородностей скорости звука и коэффициента поглощения. Такие акустические поля, регистрируемые приемниками вне объекта, несут информацию о внутренней температуре объекта $T(\mathbf{r})$ и о чисто акустических характеристиках объекта — скорости звука $c(\mathbf{r})$ и амплитудном коэффициенте поглощения $\alpha(\mathbf{r})$.

В [1] обсуждались геофизические аспекты термоакустического излучения. Позднее в патентах [2, 3] с целью проведения медицинской диагностики и контроля степени нагрева биологической ткани при гипертермии и т.п. предложено определять мощность термоакустического излучения. В [2] такая цель достигается путем сравнительного измерения регистрируемой интенсивности и интенсивности излучения эталонного источника,

т.е. в рамках интенсимоетрического подхода. Интенсимоетрический подход к решению задачи акустической термотомографии активно разрабатывается вплоть до настоящего времени [4, 5]. Задача акустического термотомографирования на основе интенсимоетрии усложняется тем обстоятельством, что коэффициент поглощения α должен быть известен с достаточно хорошим разрешением — с тем же, что и искомое значение температуры. Это обусловлено тем, что мощность термоакустического излучения элементарного нагретого объема w пропорциональна произведению $2\alpha T w$. Однако коэффициент α биологических сред может меняться в достаточно широких пределах даже для ткани определенного органа, и поэтому встает дополнительная задача предварительной оценки значений α .

С другой стороны, существует корреляционный подход к решению рассматриваемой задачи [3, 6–14]. Так, в известном патенте [3] предлагается измерение излучения от элемента объема нагретой среды с помощью корреляционной схемы, включающей в себя два приемных гидрофона с пересекающимися зонами чувствительности, а также схему перемножения сигналов с гидрофонов при различной временной задержке и последующего усреднения результата перемножения. Однако в [3] не обращено внимание на важность пространственных параметров схемы измерения, обусловленную тем, что в большинстве ситуаций

усреднение по области нагретой среды с объемом, близким или превосходящим объем кубика со сторонами, равными длине волны, резко снижает и даже обнуляет полезный эффект. Теоретические аспекты термоакустической корреляционной томографии подробно рассматривались в [6, 7, 10, 14], а в [7, 13, 14] экспериментально проиллюстрированы основные положения. Показано, что процесс акустического термотомографирования тесно связан с понятием температуры фонового акустического излучения (для краткости, фоновой температуры) $T_{bg}(\mathbf{r})$. Это температура излучения, которое является внешним по отношению к рассматриваемому элементу разрешения с центром в точке \mathbf{r} , присутствует в данной точке \mathbf{r} и создается всеми полями, кроме поля, излучаемого рассматриваемым элементом разрешения. Фоновое излучение создается, во-первых, акустическими полями, падающими на исследуемый объект снаружи, и, во-вторых, собственным тепловым акустическим излучением объекта; при этом оба вида полей могут многократно рассеиваться внутри объекта на неоднородностях его акустических параметров — скорости звука и поглощения.

СОЗДАНИЕ РЕГУЛИРУЕМОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ПОДСВЕТКИ

В [8, 12–14] корреляционное направление, в котором данные формируются путем корреляции экспериментально регистрируемых сигналов с различных пар приемников, развивается на случай фокусирующих корреляционных схем. В таких схемах предлагается использование приемных преобразователей и излучающих преобразователей (последние нужны для создания поля акустической шумовой “подсветки”) совместно с зеркальными системами фокусировки. Подобные схемы оказываются наиболее перспективными для практической реализации. Под акустической “подсветкой” понимается излучение, падающее на рассматриваемый элемент разрешения исследуемого объекта снаружи и создающее фоновую температуру $T_{bg}(\mathbf{r})$, отличную в общем случае от равновесной фоновой температуры системы. Таким образом, термин “подсветка” эквивалентен, в сущности, фоновому термоакустическому излучению для рассматриваемого элемента разрешения; однако термином “подсветка” подчеркивается возможность регулирования уровня активной компоненты фонового излучения, падающей на исследуемый объект снаружи. Эта активная компонента может иметь тепловое происхождение или специально генерироваться источниками случайных полей.

Согласно [13], искомые пространственные распределения температуры $T(\mathbf{r})$, скорости звука

$c(\mathbf{r})$ и поглощения $\alpha(\mathbf{r})$ могут быть восстановлены на основе корреляционных данных, формируемых в режиме только разностных временных задержек. Для этого необходимо иметь три набора таких данных, соответствующих трем разным условиям проведения эксперимента. Первый набор измеряется в условиях изотропного фонового излучения для всех элементов разрешения, т.е. когда температура всех излучающих объектов, находящихся в рабочей зоне томографической схемы, будет близкой к средней температуре исследуемого объекта ($\approx 37^\circ\text{C}$ для биологических тканей). Второй и третий наборы данных измеряются при добавлении к исходному изотропному фоновому излучению дополнительной части подсветки, которая является анизотропной. Анизотропия проявляется в том, что эта дополнительная подсветка должна подсвечивать только один приемник в текущей паре приемников, сигналы с которых коррелируются, но при этом не подсвечивать другой.

Принцип создания дополнительной анизотропной подсветки для фиксированной пары приемников, безотносительно к конкретной корреляционной томографической схеме, заключается в следующем [7]. В исходном положении системы падающее на объект снаружи акустическое тепловое излучение совместно с собственным акустическим излучением объекта создают начальное пространственное распределение температуры фонового излучения. Далее включается дополнительная анизотропная подсветка, создающая “надфоное” (т.е. дополнительное по отношению к исходному фоновому излучению) излучение, которое обязательно некоррелировано с исходным фоновым излучением. Дополнительная анизотропная подсветка создается для каждой пары приемников и каждого фиксированного элемента разрешения, и она должна удовлетворять следующим условиям [7, 12] (рис. 1). Надфоное излучение подсветки проходит через рассматриваемый элемент разрешения (это первое условие) и попадает на один из приемников данной пары (второе условие), который в контексте дополнительной анизотропной подсветки будет называться “дополнительно подсвеченным”, или просто “подсвеченным”. Одновременно на этот приемник попадает излучение непосредственно от элемента разрешения, т.е. его собственное излучение и исходное фоновое излучение, присутствующее в данном элементе, а также рассеянные этим элементом компоненты собственного поля, исходного фонового поля и дополнительной анизотропной подсветки. При этом на другой приемник пары, дополнительно “не подсвеченный” анизотропным надфоновым излучением, должны попадать только собственное излучение, исходное фоновое излучение и все виды рассеянного излучения от элемента разрешения, но не попадать непосредственно прямое надфоное поле

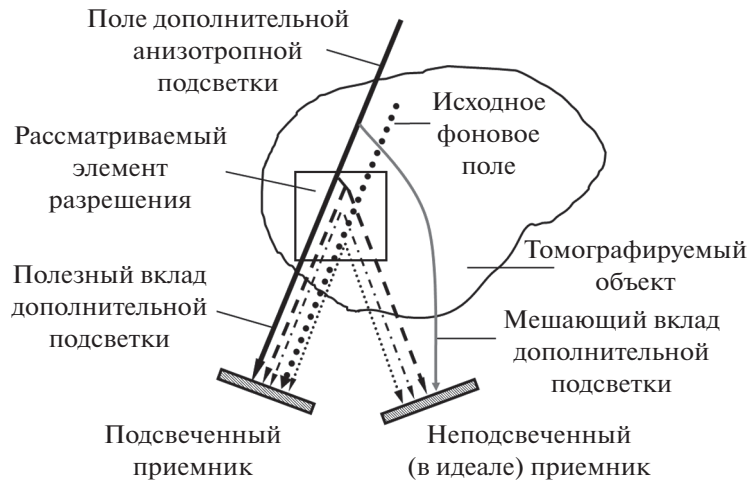


Рис. 1. Полезные и мешающие поля от элемента разрешения на подсвеченном приемнике и неподсвеченном (в идеале) приемнике при создании дополнительной анизотропной подсветки. Полное поле каждого типа состоит из исходного поля и рассеянного поля: собственное тепловое поле, которое излучается рассматриваемым элементом разрешения и частично рассеивается на нем (штрихпунктирные линии); исходное фоновое поле для рассматриваемого элемента разрешения, которое далее попадает на подсвеченный приемник (линия, составленная из символов •), и рассеянная компонента этого поля (линии, составленные из точек); одновременно присутствует исходное фоновое поле, попадающее на неподсвеченный приемник, и его рассеянная компонента (не изображены); прямое поле дополнительной анизотропной подсветки, попадающее на подсвеченный приемник (полезный вклад – толстая сплошная линия) и на приемник, который теоретически должен быть неподсвеченным (мешающий вклад за счет неоднородностей среды и неидеальности создания дополнительной подсветки – тонкая сплошная серая линия); рассеянное поле дополнительной анизотропной подсветки (штриховые линии).

дополнительной анизотропной подсветки. Таким образом, неподсвеченный приемник должен регистрировать только ту компоненту дополнительной надфоновой подсветки, которая рассеялась на рассматриваемом элементе разрешения (третье условие).

Поскольку дополнительная анизотропная подсветка с перечисленными свойствами должна создаваться для текущих значений восстанавливаемой точки \mathbf{r} и пары приемников с индексами (i, k) , то обеспечение такой подсветки для всех сочетаний параметров $(i, k; \mathbf{r})$ представляет собой отдельную проблему, и встает вопрос о возможности практической реализации дополнительной (надфоновой) анизотропной подсветки в конкретных термотомографических системах. В случае полной термотомографической *схемы с кольцевой антенной решеткой* используется большое количество преобразователей [10], и создание дополнительной анизотропной подсветки здесь сталкивается с принципиальными трудностями. Для модельного эксперимента, в котором исследуемый объект представлял собой пластину с толщиной много меньше характерной средней длины волны λ_0 , создание анизотропии не вызывало сложностей [6, 7], но для объекта произвольной формы с достаточно большими волновыми размерами возникает ряд проблем. Это связано с тем, что получение адекватной картины пространственного распределения восстанавливаемых па-

раметров при кольцевой корреляционной схеме обработки возможно только за счет использования всех пар приемников, включая приемники, расположенные как на максимальном расстоянии друг от друга, так и на минимальном (в том числе соседние). В последнем случае одна из трудностей связана с тем, что невозможно с помощью одного излучателя создать надфоновую подсветку только для единственного противоположащего к нему приемника, так как при этом будут подсвечены и другие соседние приемники. Это обусловлено конечной шириной диаграммы направленности одиночного излучателя, а также, даже при узкой диаграмме направленности, рассеянием сигнала по мере его распространения в исследуемом объекте на неоднородностях скорости звука, что обсуждается ниже.

Можно предложить создавать подсвечивание (на фоне неоднородной рефракционно-поглощающей среды) одного конкретного приемного преобразователя с предельно высоким разрешением, когда расстояние между приемниками составляет около $\lambda_0/2$, за счет соответствующего фазирования сигнала от сектора противоположащих излучателей. Для этого в присутствии объекта исследователя фиксированным приемным преобразователем (который в дальнейшем требуется дополнительно подсветить) излучается короткий импульс. Информацией для первого варианта фазировки являются моменты прихода этого импульса или

форма всего сигнала для рассматриваемой группы противоположащих преобразователей. По ним вычисляются взаимные задержки для возбуждения шумовым сигналом группы преобразователей, противоположащих к конкретному подсвечиваемому приемнику. Тем самым, на все преобразователи излучающей группы надо подавать один и тот же шумовой сигнал с различными задержками. Такая фазировка создает фокусирование на определенном приемнике и слабое попадание излучения на остальные преобразователи. Вторым вариантом фазировки может основываться на обращении волнового фронта. После излучения короткого импульса принимается весь (во времени) прошедший через объект сигнал, и далее осуществляется полное обращение волнового фронта в широкой полосе частот, т.е. обращение всей временной структуры. Этот отраженный во времени сигнал используется как обращающий фильтр (через свертку шумового сигнала с данным фильтром) при формировании излучения, направленного на заданный приемник. Такой способ более строгий, но он сложнее и требует увеличения времени томографирования, на протяжении которого пациент должен быть в достаточной степени неподвижен. В результате применения одного из упомянутых методов получается матрица задержек или функций откликов фильтров для выбранного приемника и группы противоположащих излучателей, позволяющая сфазировать подсветку на определенном приемном преобразователе. Тогда для этого приемника объект будет “подсвечен” сильно, а для всех остальных — значительно слабее, лишь боковыми лепестками сфокусированного излучения.

Однако упомянутые варианты не гарантируют решения проблемы в кольцевой схеме корреляционной томографии, где физическая реализация подобного подхода сталкивается с рядом принципиальных трудностей. Дело в том, что такую дополнительную несимметричную подсветку необходимо создавать для всех пар приемных преобразователей на кольце, сигналы с которых формируют выборочную матрицу когерентности. В том числе несимметричная подсветка нужна и для близлежащих приемников, находящихся друг от друга на малом взаимном расстоянии $\cong \lambda_0/2$. При этом асимметрия должна относиться к конкретному элементу разрешения. Здесь главная трудность заключается в следующем. От рассматриваемого элемента разрешения (рис. 1) на приемник, который должен быть неподсвеченным, попадают: собственное излучение этого элемента разрешения, исходное фоновое, т.е. внешнее (для данного элемента) излучение и та часть исходного внешнего излучения и дополнительной анизотропной подсветки, которая рассеялась на этом элементе разрешения, — это нужные сигналы, т.е. полезный вклад. Однако на тот же самый прием-

ник будет попадать мешающее поле дополнительной анизотропной подсветки (что вызвано неидеальностью вышеупомянутых методов). Это то поле, которое первоначально было направлено непосредственно от подсвечивающих преобразователей на рассматриваемый элемент разрешения и далее на подсвечиваемый приемник, но рассеялось по пути на неоднородностях фазовой скорости и поглощения (неизбежно присутствующих в практических условиях) других элементов разрешения. Кроме того, мешающий вклад может дополнительно создаваться за счет прямого поля, предназначенного для дополнительной анизотропной подсветки конкретного приемника, но частично попадающего, в силу неидеальности создания такой подсветки, и на тот или иной соседний приемник, который теоретически должен быть не подсвечен. Мешающие поля на теоретически не подсвеченном приемнике будут коррелировать с прямым полем дополнительной анизотропной подсветки на подсвеченном приемнике и за счет этого привнесут ложный вклад в оценку пространственной плотности мощности для термоакустических источников в рассматриваемом элементе разрешения. Поскольку рассматривается пара приемников на расстоянии $\cong \lambda_0/2$ (это расстояние приводится для приемников вблизи поверхности объекта), отделить полезный вклад принимаемого поля от мешающего вклада невозможно за счет временного сдвига, так как разность хода между полезными и мешающими полями значительно меньше, чем λ_0 для реальных объектов с линейными размерами около десятков λ_0 . Тем самым, разность времен распространения до приемников будет меньше времени автокорреляции теплового излучения, т.е. в этом случае использование декорреляции излучения за счет соответствующего времени задержки невозможно. Тогда следовало бы создать действительную анизотропию дополнительной подсветки с такой точностью, которая обеспечивала бы корреляцию прямого сигнала дополнительной подсветки на одном приемнике с только лишь той составляющей этого поля, которая рассеялась на рассматриваемом элементе разрешения и регистрируется на другом приемнике. Гипотетически, отделить мешающий вклад от полезного на приемнике, который должен быть не подсвечен, можно было бы, если “исключить” рассматриваемый элемент разрешения из исследуемого объекта и измерить поле на этом приемнике. Тогда вычитание результата измерений из поля, регистрируемого на том же приемнике в присутствии данного элемента разрешения, дало бы только полезный вклад (причем даже без вклада от исходного внешнего излучения). Однако на практике временно исключить текущий элемент разрешения невозможно, и в этом при-

чина проблематичности реализации дополнительной анизотропной подсветки путем излучения короткого импульса или обращением волнового фронта.

В то же время в корреляционных схемах с фокусирующими отражателями (акустическими зеркалами) создание дополнительной анизотропной подсветки оказывается вполне реальным, причем без существенного увеличения времени измерений [8, 12, 13]. В томографической корреляционной системе с фокусирующими зеркалами [13] сканирование исследуемого объекта осуществляется одновременно по всем его элементам разрешения, которые расположены вдоль некоторой прямой линии, принадлежащей плоскости томографирования. Сигнал от фиксированного элемента разрешения сначала попадает на пару (или несколько пар) основных фокусирующих зеркал, которые создают действительные изображения данного элемента разрешения. Поскольку эти изображения оказываются лежащими внутри объекта, привлекаются вспомогательные зеркала, благодаря которым изображения “выводятся” в область вне объекта, где располагаются две группы приемников. Термоакустический сигнал от рассматриваемого элемента разрешения, попавший на одно основное зеркало фиксированной пары, принимается определенным приемником первой группы, а попавший на второе основное зеркало пары – приемником второй группы. Соответствующие два приемника называются сопряженными. То обстоятельство, что пары сопряженных приемников, сигналы с которых коррелируются, оказываются разнесенными в пространстве на расстояния, существенно превосходящие λ_0 , позволяет организовать регулируемую анизотропную подсветку. В свою очередь именно благодаря анизотропной подсветке можно обеспечить измерение трех упоминавшихся выше наборов экспериментальных данных, одновременное знание которых позволяет восстановить пространственные распределения температуры исследуемого объекта, скорости звука и поглощения в нем [13]. Ввиду этого целесообразно оценить выходное отношение сигнал/помеха для фокусирующей корреляционной схемы.

ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ПОМЕХА ФОКУСИРУЮЩЕЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Взаимосвязь между отношением сигнал/помеха (по мощности) на выходе фокусирующей корреляционной системы S_{out}/N_{out} и на входе этой системы S_{in}/N_{in} имеет вид

$$S_{out}/N_{out} \cong F_t F_K (S_{in}/N_{in})^2. \quad (1)$$

Фактор временного накопления $F_t \cong 2\Delta f \tau_0$ определяется, как обычно, шириной рабочей полосы частот Δf и временем накопления τ_0 . Фактор пространственного накопления F_K равен количеству пар сопряженных приемников, сигналы с которых коррелируются для данного фиксированного элемента разрешения. Соотношение (1) следует из общих выражений для флуктуаций на выходе элементарной корреляционной схемы, осуществляющей перемножение двух входных (в общем случае комплексных) сигналов [15 (§3.4.3)]. Величину S_{in}/N_{in} можно оценить по аналогии с рассуждениями, приведенными в [10] для кольцевой антенной решетки. Однако выражение для S_{in}/N_{in} будет отличаться от соответствующего выражения для кольцевой антенной решетки присутствием дополнительного сомножителя F'_{foc} , связанного с фактором фокусировки F_{foc} . Так, в случае сильного влияния шумов от поглощающих стенок, когда доля энергии, поглощаемой всей поверхностью стенок, примерно такая же, как доля за счет поглощения во всем объеме объекта, для фокусирующей корреляционной системы имеем:

$$\begin{aligned} \frac{S_{out}}{N_{out}} &\cong F_t F_K \times \\ &\times \left[\frac{1}{1 + \mu} \frac{w}{(L_{ab})^D} \frac{\alpha |T - T_{bg}|}{\alpha T_{bg}} \left(\frac{L_{ab}}{L_{aper}} \right)^{D-1} F'_{foc} \right]^2 \cong \quad (2) \\ &\cong F_t F_K \left[\frac{\alpha |T - T_{bg}|}{(1 + \mu) T_{bg}} \frac{w}{(L_{aper})^{D-1}} F'_{foc} \right]^2. \end{aligned}$$

Здесь w – площадь (при размерности пространства $D = 2$) или объем (при $D = 3$) элемента разрешения, имеющего амплитудный коэффициент поглощения α , собственную температуру T и, следовательно, акустояркий контраст $2\alpha |T - T_{bg}|$. Величины $\overline{T_{bg}}$ и $\overline{\alpha}$ оцениваются в рассматриваемом случае как усредненные значения фоновой температуры и коэффициента поглощения в объекте, причем $\overline{\alpha} L_{ab} \cong 1$, где L_{ab} – эффективная длина поглощения. Величине $L_{aper}/2$, которая в [10] равнялась диаметру кольцевой приемной апертуры, теперь сопоставляется расстояние от рассматриваемого элемента разрешения до основных фокусирующих зеркал, близкое к радиусу каждого основного зеркала R_{mir} : $L_{aper} \cong 2R_{mir}$. Коэффициент $\mu \geq 0$ определяется потерями в приемном тракте.

Введенный в (2) дополнительный сомножитель F'_{foc} оценивается из следующих соображений. Каждое основное фокусирующее зеркало и каждый приемник имеют соответственно характерный размер дуги в плоскости томографирования

l_{mir} и l_{rec} при $D = 2$ (площадь s_{mir} и s_{rec} при $D = 3$). Термоакустическое излучение от элемента разрешения фокусируется основным зеркалом, попадает в область фокальной перетяжки, имеющей поперечный размер l_{wst} при $D = 2$ (площадь поперечного сечения s_{wst} при $D = 3$), и далее регистрируется приемником. Тогда отношение $l_{\text{mir}}/l_{\text{rec}}$ при $D = 2$ ($s_{\text{mir}}/s_{\text{rec}}$ при $D = 3$) характеризует, во сколько раз можно увеличить мощность сигнала, регистрируемого на приемнике, за счет фокусировки. Одновременно отношение $l'_{\text{rec}}/l_{\text{wst}}$, где $l'_{\text{rec}} = \{l_{\text{rec}} \text{ при } l_{\text{rec}} < l_{\text{wst}}; l_{\text{wst}} \text{ при } l_{\text{rec}} \geq l_{\text{wst}}\}$ при $D = 2$ ($l_{\text{rec}}, l'_{\text{rec}}, l_{\text{wst}}$ заменяются соответственно на $s_{\text{rec}}, s'_{\text{rec}}, s_{\text{wst}}$ при $D = 3$), учитывает ту долю мощности сигнала, которая попадает из области фокальной перетяжки на приемник в случае несовпадения размеров приемника и перетяжки. Произведение обоих упомянутых отношений дает:

$$F'_{\text{foc}} \cong \frac{l_{\text{mir}} l'_{\text{rec}}}{l_{\text{rec}} l_{\text{wst}}} = \frac{l_{\text{mir}} l'_{\text{rec}}}{l_{\text{wst}} l_{\text{rec}}} \cong F_{\text{foc}} \frac{l'_{\text{rec}}}{l_{\text{rec}}},$$

где $F_{\text{foc}} \cong \frac{l_{\text{mir}}}{l_{\text{wst}}}$ при $D = 2$;

$$F'_{\text{foc}} \cong \frac{s_{\text{mir}} s'_{\text{rec}}}{s_{\text{rec}} s_{\text{wst}}} = \frac{s_{\text{mir}} s'_{\text{rec}}}{s_{\text{wst}} s_{\text{rec}}} \cong F_{\text{foc}} \frac{s'_{\text{rec}}}{s_{\text{rec}}},$$

где $F_{\text{foc}} \cong \frac{s_{\text{mir}}}{s_{\text{wst}}}$ при $D = 3$.

Для двумерной фокусирующей системы на зеркалах длина дуги основного фокусирующего зеркала с углом раскрытия в плоскости томографирования ψ_0 составляет $l_{\text{mir}} = R_{\text{mir}} \psi_0$. Тогда

$$F_{\text{foc}} \cong R_{\text{mir}} \psi_0 / l_{\text{wst}} \cong \frac{2R_{\text{mir}} \psi_0^2}{\pi \lambda_0},$$

поскольку величину l_{wst} можно оценить как диаметр пятна Эйри $l_{\text{wst}} \cong \frac{\pi \lambda_0}{2\psi_0}$. Площадь квадратного элемента разрешения со стороной l составляет $w \cong l^2$, и выражение (2) при $D = 2$ принимает вид

$$\frac{S_{\text{out}}}{N_{\text{out}}} \cong F_i F_K \left[\frac{1}{1 + \mu} \frac{\alpha |T - T_{\text{bg}}|}{\alpha T_{\text{bg}}} \frac{l^2}{L_{\text{ab}} L_{\text{aper}}} F'_{\text{foc}} \right]^2. \quad (3)$$

Отсюда при $L_{\text{ab}} \cong L_{\text{aper}} \cong 2R_{\text{mir}}$ и $l_{\text{rec}} \approx l_{\text{wst}}$ (т.е. $F'_{\text{foc}} \approx F_{\text{foc}}$) имеем

$$\frac{S_{\text{out}}}{N_{\text{out}}} \cong F_i F_K \left[\frac{1}{1 + \mu} \frac{\alpha |T - T_{\text{bg}}|}{\alpha T_{\text{bg}}} \frac{l^2 \psi_0^2}{2\pi \lambda_0 R_{\text{mir}}} \right]^2. \quad (4)$$

В случае $F_i \cong 10^8$, $F_K = 4$, $R_{\text{mir}} \cong 70\lambda_0$, $\psi_0 \cong \pi/6$, $\mu \rightarrow 0$ значение $S_{\text{out}}/N_{\text{out}} \cong 25$ в сочетании с пространственным разрешением $l \cong 4\lambda_0$ обеспечива-

ется при $\frac{\alpha |T - T_{\text{bg}}|}{\alpha T_{\text{bg}}} \cong 0.05$, т.е. при диагностируемом температурном контрасте $|T - T_{\text{bg}}| \cong 7^\circ$ (полагается $\alpha \cong \bar{\alpha}$, $T_{\text{bg}} \cong 300$ К).

В выражениях (2)–(4) не учитывалось ослабление сигнала за счет поглощения в исследуемом объекте с линейным размером L . Присутствие поглощения ослабляет мощность сигнала как $S_{\text{in}} \sim \exp\{-2(\alpha)L/2\} \cong \exp\{-2\alpha R_{\text{mir}}\}$, в то время как мощность шумовой помехи не изменяется, поскольку поглощающаяся помеха переизлучается. Здесь $L/2 \cong R_{\text{mir}}$ – среднее расстояние, которое проходит сигнал внутри объекта на пути от элемента разрешения до основных зеркал (путь от основных зеркал до вспомогательных и далее до приемников сигнал проходит по практически непоглощающей иммерсионной жидкости). Как следствие, поддающийся диагностике температурный контраст ухудшается в $\cong \exp(\alpha L) \cong \exp\{2\alpha R_{\text{mir}}\}$ раз. Так, при $L \cong 10...15$ см и поглощении $\cong 1$ дБ/см диагностируемый температурный контраст увеличивается в $\cong 3-6$ раз.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-02097 офи_м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабий В.И.* Перенос акустической энергии в поглощающей и излучающей среде // Сб. Морские гидрофизические исследования. 1974. № 2(65). С. 189–192.
2. *Bowen T.* Passive remote temperature sensor system // U.S. Patent 4,246,784. Jan. 27, 1981.
3. *Hessemer R.A., Jr., Perper T., Bowen T.* Correlation thermotomography // U.S. Patent 4,416,552. Nov. 22, 1983. 16 p.
4. *Аносов А.А., Беляев Р.В., Вилков В.А., Казанский А.С., Мансфельд А.Д., Шаракшанэ А.С.* Динамическая акустотермография // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 4–5. С. 436–444.
5. *Аносов А.А., Немченко О.Ю., Лесс Ю.А., Казанский А.С., Мансфельд А.Д.* Возможности акустотермометрии для контроля адресной доставки лекарств // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 4. С. 535–540.
6. *Буров В.А., Дариалашвили П.И., Румянцева О.Д.* Активно-пассивная термоакустическая томография // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 4. С. 474–484.
7. *Буров В.А., Дариалашвили П.И., Евтухов С.Н., Румянцева О.Д.* Экспериментальное моделирование процессов активно-пассивной термоакустической томографии // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 3. С. 298–310.
8. *Burov V.A., Darialashvili P.I., Evtukhov S.N., Rumyantseva O.D.* New informative possibilities of active-passive thermoacoustic tomography // Acoustical Imaging. Eds. Arnold W., Hirsekorn S. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. V. 27. P. 305–313.

9. *Миргородский В.И., Герасимов В.В., Пешин С.В.* Экспериментальные исследования особенностей пассивной корреляционной томографии источников некогерентного акустического излучения меггерцового диапазона // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52. № 5. С. 702–709.
10. *Буров В.А., Касаткина Е.Е., Марьин А.О., Румянцева О.Д.* Оценки максимального правдоподобия в корреляционной акустической термотомографии // *Акуст. журн.* 2007. Т. 53. № 4. С. 580–596.
11. *Аносов А.А., Барабаненков Ю.Н., Казанский А.С., Лесс Ю.А., Шаракшанэ А.С.* Обратная задача акустотермографии при корреляционном приеме теплового акустического излучения // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 1. С. 98–103.
12. *Буров В.А., Дмитриев К.В., Евтухов С.Н.* Активно-пассивные термотомографические системы с фокусировкой акустических полей // *Известия РАН. Серия Физическая.* 2009. Т. 73. № 4. С. 551–557.
13. *Буров В.А., Дмитриев К.В., Логинов С.В., Румянцева О.Д.* Экспериментальное обнаружение термоакустических источников методом фокусирующей корреляционной томографии // *Известия РАН. Серия Физическая.* 2015. Т. 79. № 10. С. 1413–1419.
14. *Буров В.А., Румянцева О.Д.* Обратные волновые задачи акустической томографии. Ч. I: Обратные задачи излучения в акустике. М.: ЛЕНАНД, 2017. 384 с.
15. *Бендат Дж., Пирсол А.* Применение корреляционного и спектрального анализа. Пер. с англ., под ред. Коваленко И.Н. М.: Мир, 1983. 312 с.