

Регулируемая анизотропная подсветка в корреляционных томографических системах

В. А. Буров,* К. В. Дмитриев, О. Д. Румянцева

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Обсуждаются принципиальные трудности, возникающие при организации анизотропной регулируемой подсветки для исследуемого объекта в корреляционных термоакустических томографических схемах с кольцевой антенной решеткой. Однако в схемах с фокусирующими конструктивными элементами подсветку такого типа создать реально. Для фокусирующих схем оценивается выходное отношение сигнал/помеха.

PACS: 43.35.+d, 43.60.+d, 43.80.+p УДК: 534.8 : 519.24

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

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. Входными данными для решения этой проблемы 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 коэффициенте поглощения $\alpha(\mathbf{r})$.

В [1] для медицинской диагностики и контроля степени нагрева биоткани предложено измерение интенсивности термоакустического излучения. Интенсиметрический подход к решению задачи акустической термотомографии активно разрабатывается до настоящего времени [2]. С другой стороны, существует корреляционный подход [3–9]. Теоретические аспекты термоакустической корреляционной томографии подробно рассматривались в [4, 6], а в [4, 9] экспериментально проиллюстрированы основные положения. Показано, что процесс акустического термотомографирования тесно связан с понятием температуры фонового акустического излучения (фоновой температуры, для краткости) $T_{bg}(\mathbf{r})$ — 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. Другими словами, под $T_{bg}(\mathbf{r})$ подразумевается температура, которую имело бы акустически абсолютно черное тело, помещенное в точку \mathbf{r} и достигшее состояния термодинамического равновесия с окружающим акустическим излучением.

В [8, 9] корреляционное направление развивается на случай фокусирующих корреляционных схем, в которых предлагается использование приемных преобразователей и излучающих преобразователей (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 «подсветки» эквивалентен, в сущности, фоновому термоакустическому излучению для рассматриваемого элемента разрешения; однако употреблением термина «подсветка» подчеркивается возможность регулировать уровень активной компоненты фонового излучения, падающей на исследуемый объект снаружи. Эта активная компонента может иметь тепловое происхождение или специально генерироваться источниками случайных полей.

Согласно [9], искомые значения $T(\mathbf{r})$, $c(\mathbf{r})$ и $\alpha(\mathbf{r})$ 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. Второй и третий наборы данных измеряются при добавлении к исходному изотропному фоновому излучению дополнительной части подсветки, которая является, в то же время, анизотропной. Анизотропия проявляется в том, что эта дополнительная подсветка должна подсвечивать толь-

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

ко один приемник в текущей паре приемников, но при этом не подсвечивать другой. Принцип создания дополнительной анизотропной подсветки для фиксированной пары приемников, безотносительно к конкретной корреляционной томографической схеме, заключается в следующем. 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 «надфоново» (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 [4, 8]. Надфоново 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 «неподсвеченный» анизотропным надфоновым излучением, должны попадать только собственное излучение, исходное фоновое излучение и рассеянное излучение от элемента разрешения, но не попадать непосредственно прямое надфоново поле дополнительной анизотропной подсветки. Таким образом, неподсвеченный приемник должен регистрировать только ту компоненту дополнительной надфоновой подсветки, которая рассеялась на 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 $(i, k; \mathbf{r})$ представляет собой практическую проблему. В полной термотомографической схеме с кольцевой антенной решеткой используется большое количество преобразователей [6], и создание дополнительной анизотропной подсветки здесь сталкивается с принципиальными трудностями. Это связано с тем, что получение адекватной картины пространственного распределения восстанавливаемых параметров в кольцевой корреляционной схеме обработки возможно только при использовании всех пар приемников, включая приемники, расположенные как на максимальном расстоянии друг от друга, так и на минимальном. В последнем случае одна из трудностей связана

с тем, что невозможно с помощью одного излучателя создать надфоново подсветку только для единственного противоположащего к нему приемника, так как при этом будут подсвечены и другие соседние приемники, что обсуждается ниже.

Можно предложить создавать подсвечивание (на фоне неоднородной 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 исследования, фиксированным приемным преобразователем (который в дальнейшем требуется дополнительно подсвечить) 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. Второй вариант фазировки может основываться на обращении волнового фронта. После излучения короткого импульса принимается весь прошедший через объект сигнал, и далее осуществляется полное обращение волнового фронта в широкой полосе частот. Этот отраженный во времени сигнал используется как обрабатывающий фильтр при формировании излучения, направленного на заданный приемник. Тем самым, одним из методов подсветки фазировка осуществляется на определенном приемнике: для него объект будет подсвечен сильно, а для всех остальных приемников — значительно слабее, лишь боковыми лепестками.

Однако упомянутые варианты не гарантируют практического решения проблемы в кольцевой схеме корреляционной томографии, поскольку такую дополнительную несимметричную подсветку необходимо создавать для всех пар приемных преобразователей на кольце (в том числе, и для приемников, находящихся друг от друга на малом взаимном расстоянии $\cong \lambda_0/2$), сигналы с которых формируют выборочную матрицу когерентности. При этом асимметрия должна относиться к конкретному элементу разрешения. Здесь главная трудность заключается в следующем. От рассматриваемого элемента разрешения 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 то, что нужно, т. е. полезный вклад. Однако на тот же самый приемник будет попадать мешающее поле дополнитель-

ной 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 неподсвечен. Мешающие поля на теоретически неподсвеченном приемнике будут коррелировать с прямым полем дополнительной анизотропной подсветки на подсвеченном приемнике и за счет этого привносить ложный вклад в оценку пространственной плотности мощности для термоакустических источников в рассматриваемом элементе разрешения. Поскольку рассматривается пара приемников на расстоянии $\cong \lambda_0/2$, отделить полезный вклад от мешающего за счет временного сдвига нельзя, так как разность хода между полезными и мешающими полями значительно меньше, чем λ_0 (для объектов с размерами около десятков λ_0). Тем самым, разность времен распространения до приемников будет меньше времени автокорреляции теплового излучения, и использование декорреляции излучения за счет соответствующего времени задержки невозможно. Тогда следовало бы создать действительную анизотропию дополнительной подсветки с точностью, при которой прямой сигнал дополнительной анизотропной подсветки на одном приемнике будет коррелировать только лишь с той

составляющей этого поля, которая рассеялась на рассматриваемом элементе разрешения и регистрируется на другом приемнике. В этом проблематичность реализации дополнительной анизотропной подсветки излучением короткого импульса или обращением волнового фронта.

В то же время, в корреляционных схемах с фокусирующими отражателями, создание дополнительной анизотропной подсветки оказывается реальным [8, 9], поскольку пары приемников, сигналы с которых коррелируются, оказываются разнесенными в пространстве на расстояния, существенно превосходящие λ_0 . Ввиду этого, целесообразно оценить отношение сигнал/помеха (по мощности) $S_{\text{out}}/N_{\text{out}}$ на выходе фокусирующей корреляционной схемы, исходя из его взаимосвязи с соответствующим отношением $S_{\text{in}}/N_{\text{in}}$ на входе: $S_{\text{out}}/N_{\text{out}} \cong F_t F_K (S_{\text{in}}/N_{\text{in}})^2$. Здесь $F_t \cong 2\Delta f T_0$ определяется шириной рабочей полосы частот Δf и временем накопления T_0 ; значение F_K равно количеству пар приемников, сигналы с которых коррелируются для данного фиксированного элемента разрешения. Величину $S_{\text{in}}/N_{\text{in}}$ можно оценить по аналогии с [6], однако с учетом фактора фокусировки. В случае $F_t \cong 10^8$ и $F_K = 4$ значение $S_{\text{out}}/N_{\text{out}} \cong 25$ в сочетании с пространственным разрешением $\cong 4\lambda_0$ обеспечивается при диагностируемом температурном контрасте $|T - T_{\text{bg}}| \cong 7^\circ$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-29-02097 офи_м), а также гранта Президента РФ по программе поддержки ведущих научных школ НШ-7062.2016.2.

- [1] Bowen T. U.S. Patent 4,246,784. Jan. 27. 1981.
 [2] Аносов А.А. и др. Акуст. журн. **55**, № 4–5. С. 436. (2009).
 [3] Jr. Hessemer R.A., Perper T., Bowen T. U.S. Patent 4,416,552. Nov. 22. 1983.
 [4] Бузов В.А. и др. Акуст. журн. **50**, № 3. С. 298. (2004).
 [5] Миргородский В.И., Герасимов В.В., Пешин С.В. Акуст. журн. **52**, № 5. С. 702. (2006).

- [6] Бузов В.А. и др. Акуст. журн. **53**, № 4. С. 580. (2007).
 [7] Аносов А.А. и др. Акуст. журн. **55**, № 1. С. 98. (2009).
 [8] Бузов В.А., Дмитриев К.В., Евтухов С.Н. Изв. РАН. Серия Физическая. **73**, № 4. С. 551. (2009).
 [9] Бузов В.А. и др. Изв. РАН. Серия Физическая. **79**, № 10. С. 1413. (2015).

Regulated anisotropic illumination in correlation tomographic systems

V. A. Burov^a, K. V. Dmitriev, O. D. Romyantseva

Department of Acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.
 E-mail: ^aburov@phys.msu.ru

Essential difficulties arising in organization of anisotropic regulated illumination for an investigated object in correlation thermoacoustic tomography schemes with a ring antenna array are discussed. However, the illumination of such a type is really created in schemes with focusing structural elements. Output signal-to-interference relation is estimated for the focusing schemes.

PACS: 43.35.+d, 43.60.+d, 43.80.+p

Keywords: acoustical thermotomography, anisotropic illumination, object temperature, sound velocity, absorption, focusing correlation schemes.

Сведения об авторах

1. Буров Валентин Андреевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: burov@phys.msu.ru.
2. Дмитриев Константин Вячеславович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: burov@phys.msu.ru.
3. Румянцева Ольга Дмитриевна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: burov@phys.msu.ru.