

УДК 534.8

ПРОВЕРКА СООТНОШЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В РАДИОАСТРОНОМИИ, ПРИ КОРРЕЛЯЦИОННОМ ПРИЕМЕ ТЕПЛООВОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2024 г. А. А. Аносов^{a,b}, Н. В. Грановский^{a,*}, А. В. Ерофеев^{a,b},
А. Д. Мансфельд^c, Р. В. Беляев^c, А. С. Казанский^a

^aФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет), ул. Трубецкая 8, стр. 21, Москва, 19991 Россия

^bИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая 11/7, Москва, 125009 Россия

^cИнститут прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: granovsky_nikita@mail.ru

Поступила в редакцию 21.05.2024 г.

После доработки 07.08.2024 г.

Принята к публикации 29.10.2024 г.

Осуществлен корреляционный прием теплового акустического излучения парой датчиков. В эксперименте использовали приемники с разной полосой пропускания, меняли размер нагретых источников и расстояние от источников до приемников, а также сдвигали источники в поперечном направлении перпендикулярно акустической оси системы. Для каждого случая с помощью соотношений, используемых в радиоастрономии, были рассчитаны корреляционные функции теплового акустического излучения. Показано, что полученные в экспериментах и рассчитанные кросскорреляционные функции близки с учетом погрешности измерений.

Ключевые слова: кросскорреляционная функция, тепловое акустическое излучение, акустостеркая температура

DOI: 10.31857/S0320791924060013, **EDN:** JUFDNB

ВВЕДЕНИЕ

В ходе различных медицинских процедур, таких как гипертермия, термоабляция, контроль адресной доставки лекарств в термолипосомальной оболочке и так далее, важно осуществлять безболезненные неинвазивные измерения глубинной температуры человеческого тела. Существует несколько методов для этой цели: магнитно-резонансная термометрия [1], регистрация теплового излучения в СВЧ-диапазоне [2], измерения скорости звука, которая меняется при изменении температуры тканей [3], пассивная акустическая термометрия [4]. Возможно, магнитно-резонансная термометрия позволит решить проблему восстановления пространственного распределения глубинной температуры тела человека, однако этот метод требует дорогого оборудования, обученного персонала и специально подготовленных помещений. Поэтому приветствуется разработка альтернативных методов, при условии надлежащей точности. В частности, мы рассматриваем возможности пассивной акустической термометрии [5–8].

Пассивная акустическая термометрия — это метод измерения теплового акустического излучения объекта для определения его внутренней температуры. При необходимости восстановить распределение температуры можно использовать корреляционный или некорреляционный прием. Согласно теореме Ван Циттерта—Цернике [9] тепловое излучение, зарегистрированное на двух приемниках, будет коррелировать в пространстве и во времени, так как приемное устройство имеет ограниченную полосу пропускания. Преимуществом корреляционного приема над некорреляционным является то, что он обеспечивает лучшее пространственное разрешение. Предел разрешения при некорреляционном приеме в дальней зоне обратно пропорционален размеру приемника, а при корреляционном приеме — расстоянию между крайними датчиками в приемной решетке [10]. Р. Хессемер и Л. Перпер [11] предложили использовать корреляционный прием теплового акустического излучения для измерения внутренней температуры биологических объектов. Первые экспериментальные результаты были получены группой В.И. Пасечника [12].

В рамках исследований [13–17] использовалась пара датчиков для анализа временных кросскорреляционных функций теплового акустического излучения. Использование активно-пассивной термоакустической томографии рассмотрено в работах [13, 14]. В ходе работы [15] были изучены корреляционные сигналы при суммарных задержках, которые соответствуют не разности, а сумме расстояний между нагретым объектом и преобразователями. Корреляция возникала из-за того, что сигналы, излучаемые одним преобразователем, отражались от поверхности нагретого объекта и принимались другим преобразователем, и наоборот. В исследовании [16] была обнаружена корреляция на фокусируемых антеннах. Экспериментально исследованы вопросы корреляции тепловых фононов упругих волн в работе [18]. В работе [19] было произведено измерение корреляции теплового акустического излучения линейной решеткой, включающей в себя три датчика, были получены кросскорреляционные функции для каждой пары датчиков.

В работе [20] был рассмотрен способ восстановления распределения температуры при корреляционном приеме. Для этого было предложено складывать с определенными весами кросскорреляционные функции, полученные с помощью линейной решетки датчиков. Этот способ является частным вариантом метода, используемого в радиоастрономии, где две разнесенные антенны работают как пространственный фильтр с узкой полосой пропускания на частоте, которая определяется расстоянием между антеннами и длиной волны [10].

Отметим, что при корреляционном приеме теплового акустического излучения систематической экспериментальной проверки соотношений [10], используемых в радиоастрономии, не проводилось. В работах [12, 17, 20] меняли положение источника – его сдвигали на половину пространственного периода кросскорреляционной функции, в результате чего две кросскорреляционные функции, полученные до и после сдвига источника, менялись в противофазе. В работе [20] сравнивали между собой кросскорреляционные функции, полученные с помощью приемников с разными полосами пропускания. Однако сравнение экспериментальных результатов и теоретических расчетов при изменении размеров источников, при разных расстояниях от источника до приемников ранее не проводилось.

В настоящей работе осуществлен корреляционный прием теплового акустического излучения парой датчиков, рассчитаны кросскорреляционные функции и проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных при изменении полосы пропускания приемников, при изменении размеров источников, при разных расстояниях от источника до приемников. Результат получен благодаря коллаборации групп ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и ИПФ РАН.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема для корреляционного приема теплового акустического излучения представлена на рис. 1. Акустические датчики квадратного сечения со стороной $a = 20.0 \pm 0.2$ мм, расстояние между центрами которых $D = 22.0 \pm 0.3$ мм, находились в аквариуме, заполненном водой при комнатной температуре 19.6 ± 0.3 °С. Оси датчиков лежали в горизонтальной плоскости и пересекались на расстоянии $z = 515 \pm 3$ мм или 800 ± 3 мм от приемников. В качестве источников теплового акустического излучения использовали расположенные вертикально тефлоновые цилиндры длиной 142 ± 1 мм и диаметрами $\Delta x = 5.5, 7.6, 11.2, 15.8 \pm 0.1$ мм. Цилиндры были предварительно нагреты до температуры 55 ± 0.3 °С, после чего помещались в аквариум. Температуру воды и начальную температуру цилиндров контролировали цифровыми термометрами DS18S20P (Maxim Integrated, Сан-Хосе, США) с точностью 0.3 К. Время одного измерения составляло 2.5 с, измерения повторяли четыре раза.

Чтобы избежать “паразитных”, не акустических корреляций, мы проводили измерения теплового акустического излучения дважды, с источником и без него. В результате брали разницу между полученными корреляционными функциями.

Для измерений был использован многоканальный акустотермограф [21, 22], разработанный в ИПФ РАН группой под руководством А.Д. Мансфельда (пороговая чувствительность при времени интегрирования 10 с – 0.25 К). Принимаемые акустические сигналы преобразовывались в электрические, усиливались и подавались на четырнадцатизрядный АЦП ADM 414х65М (Insys, Москва, Россия) с частотой дискретизации 15 МГц на один канал. Разработанные программы проводили дальнейшую обработку данных.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Согласно [10, 20] кросскорреляционную функцию теплового акустического излучения

$$K(\tau) = \overline{p_1(t)p_2(t+\tau)} - \overline{p_1(t)}\overline{p_2(t)},$$

где t – время, τ – временной сдвиг, p_1, p_2 – давления, измеренные датчиками R1 и R2, черта сверху означает усреднение по времени, $\overline{p_1(t)} = \overline{p_2(t)} = 0$, для схемы, показанной на рис. 1, можно представить выражением:

$$\begin{aligned} K(\tau) = & \frac{2a\Delta x}{\lambda z} T_0 \text{sinc}^2\left(\frac{2\pi a x_0}{\lambda z}\right) \times \\ & \times \text{sinc}\left[\pi \frac{\Delta f}{f_0} \left(\frac{D x_0}{\lambda z} - f_0 \tau\right)\right] \times \\ & \times \text{sinc}\left(\frac{\pi D \Delta x}{\lambda z}\right) \cos\left[2\pi \left(\frac{D x_0}{\lambda z} - f_0 \tau\right)\right], \end{aligned} \quad (1)$$

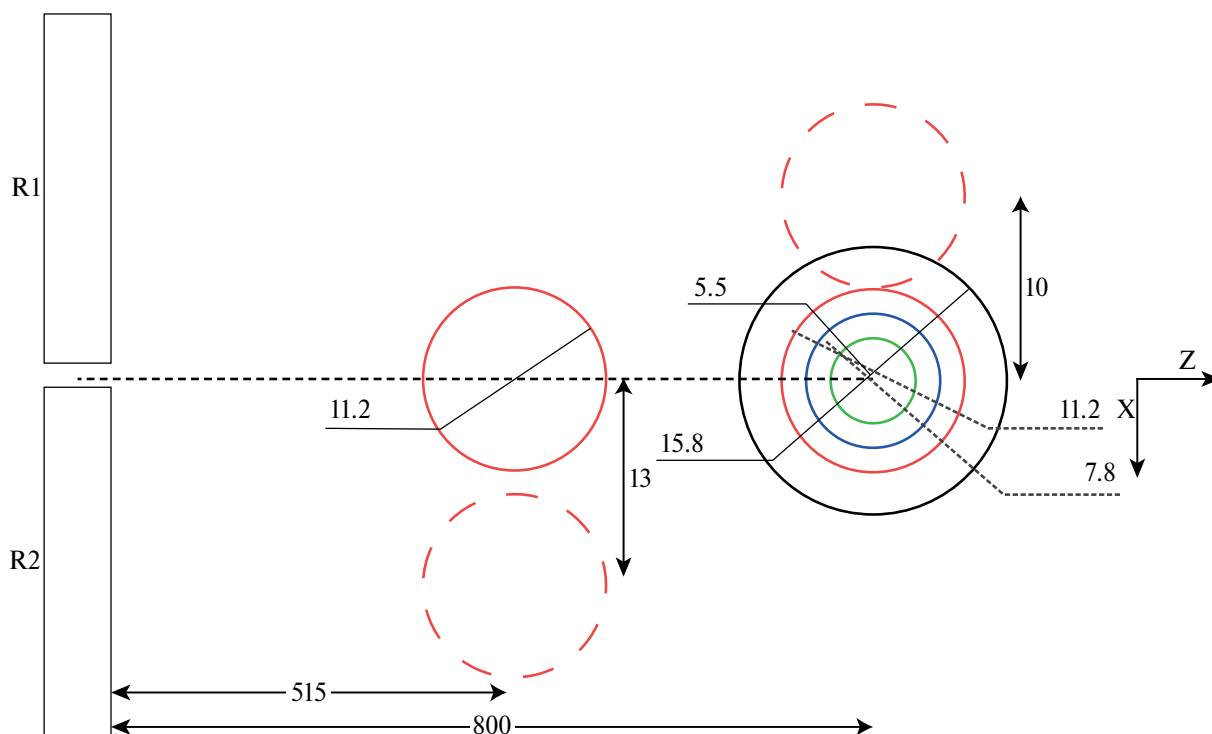


Рис. 1. Схема корреляционного приема теплового акустического излучения парой датчиков R1 и R2. Показано расположение нагретых источников разного диаметра 5.5, 7.6, 11.2 и 15.8 мм, находившихся на расстояниях 515 и 800 мм от приемников. Все размеры указаны в миллиметрах.

где Δf — полоса пропускания датчика, λ и f_0 — средняя длина волны и частота принимаемого сигнала, D — расстояние между датчиками, $2a$ — размер датчика, z — расстояние от датчиков до источника сигнала, T_0 , x_0 , Δx — температура, положение центра, поперечный размер источника, $\text{sinc } y = \frac{\sin y}{y}$. Здесь предполагается, что температура источника T_0 постоянна и апертуры датчиков на расстоянии z совпадают. Множитель $\text{sinc} \left[\pi \frac{\Delta f}{f_0} \left(\frac{Dx_0}{\lambda z} - f_0 \tau \right) \right]$ определяется конечной полосой Δf пропускания приемника, множитель $\text{sinc} \left(\frac{\pi D \Delta x}{\lambda z} \right)$ — конечным размером Δx источника, множитель $\text{sinc}^2 \left(\frac{2\pi a x_0}{\lambda z} \right)$ — диаграммой направленности датчика, множитель $\cos \left[2\pi \left(\frac{Dx_0}{\lambda z} - f_0 \tau \right) \right]$ определяет осциллирующий характер коррелированного сигнала, $\frac{\lambda z}{2a}$ — характерный размер диаграммы направленности. Отметим, что вертикальный размер источника 142 мм превышает характерный поперечный размер апертуры датчика на расстоянии 800 мм — $\frac{\lambda z}{a} = 92$ мм, поэтому выражение (1) не зависит от вертикальной координаты.

Согласно (1), максимальное значение кросс-корреляционной функции в точке $\tau = Dx_0/cz$, где $c = 1500$ м/с — скорость звука в воде, при $x_0 = 0$ определяется выражением

$$K(\tau = Dx_0/cz, x_0 = 0) = T_0 \frac{2a}{\pi D} \sin \left(\frac{\pi D \Delta x}{\lambda z} \right). \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В эксперименте использовали две пары датчиков. По полученным автокорреляционным функциям датчиков были рассчитаны их спектры. Эти спектры определяются свойствами датчика как приемника акустического излучения, а также — частотными свойствами усилителя сигналов. Чтобы исключить шумы усилителя, мы строили разности спектров, полученных, когда измерения были проведены с источником и без источника. Разности спектров для датчиков R1 и R2 (R3 и R4) представлены на рис. 2а (рис. 2б). Показанные спектры несимметричны — среднюю частоту f_0 амплитудно-частотной характеристики датчика рассчитывали по формуле $f_0 = \int_{0 \text{ МГц}}^{3 \text{ МГц}} f A(f) df / \int_{0 \text{ МГц}}^{3 \text{ МГц}} A(f) df$, где $A(f)$ — представленные на рис. 2 спектры датчиков. Формула (1) справедлива для прямоугольного спектра — полосу пропускания Δf датчика рассчитывали исходя из равенства площадей под

экспериментальным и приближенным прямоугольным спектрами: $A(f_0)\Delta f = \int_{0 \text{ МГц}}^3 \text{МГц} A(f)df$.

Были получены следующие спектральные характеристики $f_0 \pm \Delta f/2$: 1.31 ± 0.51 (R1), 1.28 ± 0.56 (R2), 1.74 ± 0.76 (R3), 1.79 ± 0.82 (R4) МГц. В экспериментах использовались пара датчиков R1 и R2 и пара датчиков R3 и R4. Как видно из рис. 2, спектры датчиков не идентичны, поэтому были рассчитаны средние значения спектральных характеристик: 1.29 ± 0.54 (R1 и R2), 1.77 ± 0.79 (R3 и R4) МГц.

Для проверки выражения (1) мы использовали разные приемники (с разной полосой

пропускания), источники разных размеров, расположенных на разных расстояниях от приемников, а также сдвигали источники по оси x , т.е. в направлении, перпендикулярном акустической оси. Измеренные и рассчитанные по формуле (1) кросскорреляционные функции представлены на рис. 3.

На рис. 3а, 3б показаны кросскорреляционные функции приемников R1 и R2, на рис. 3в — корреляционные функции приемников R3 и R4. Для расчета кросскорреляционных функций использовались размеры, указанные в разделе Материалы и методы, а также полосы пропускания, определенные по спектрам датчиков (см. выше). Выражение (1) приближали к экспериментальным данным методом наименьших квадратов в диапазоне

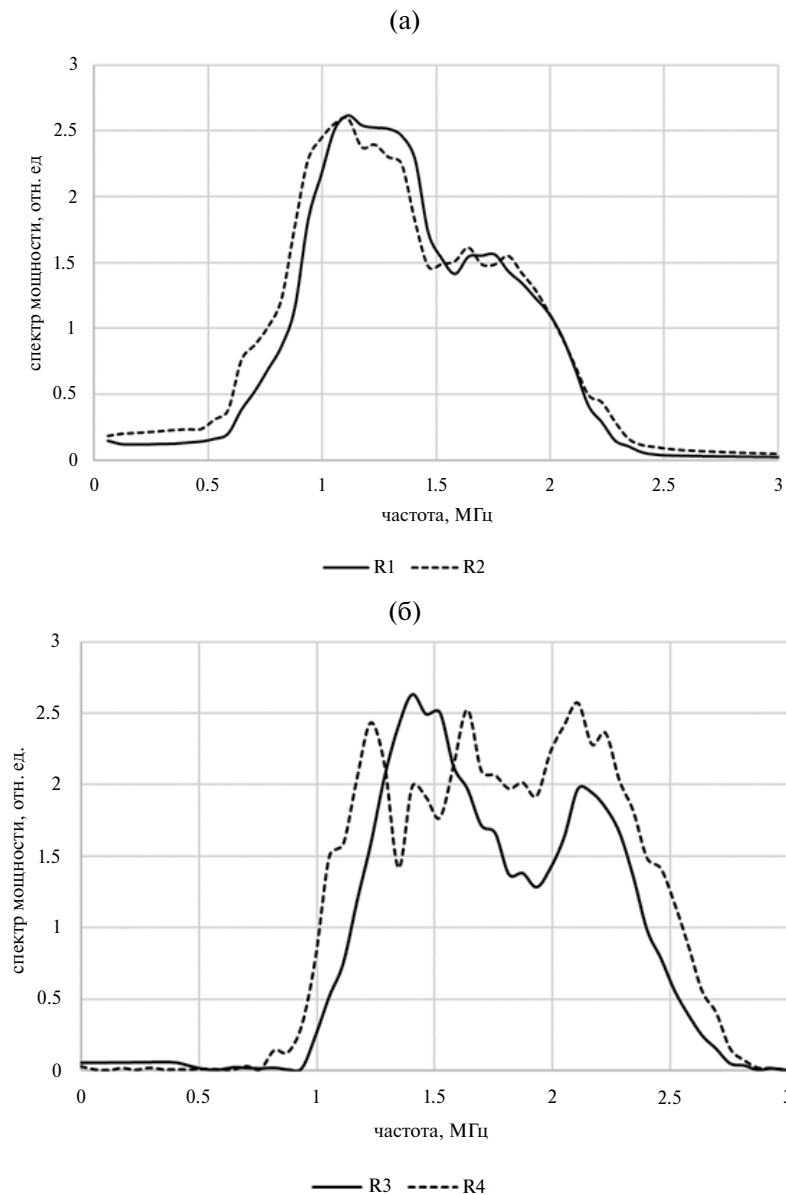


Рис. 2. Спектры датчиков (а) — R1 и R2 и (б) — R3 и R4.

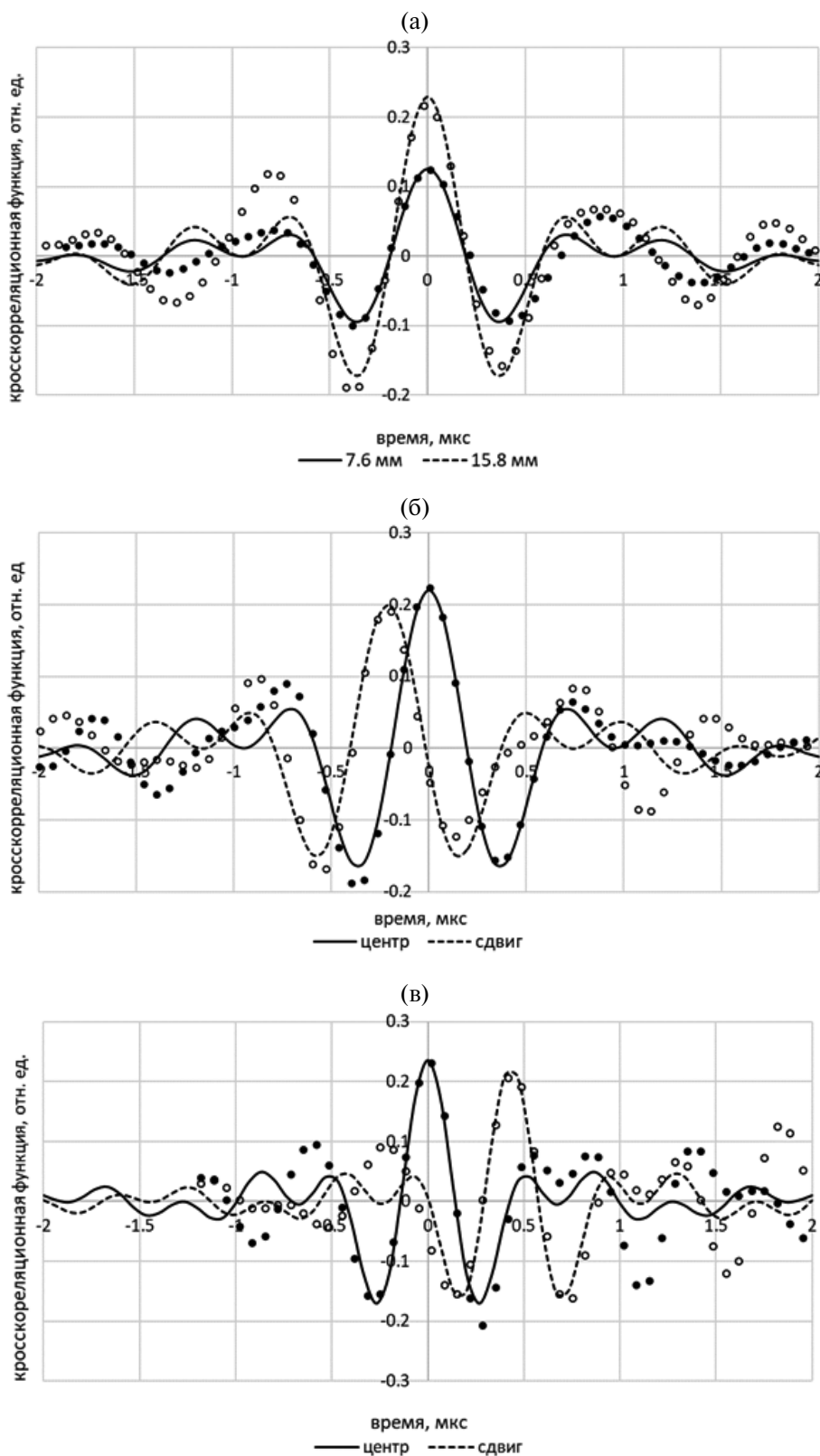


Рис. 3. Экспериментальные (маркеры) и расчетные (линии) кросскорреляционные функции теплового акустического излучения при разных положениях нагретых источников: (а) — для источников $\varnothing 7.6$ и 15.8 мм на акустической оси системы на расстоянии 800 мм от приемников; (б) — источник $\varnothing 11.2$ мм на расстоянии 800 мм на акустической оси системы (центр) и сдвинутый в отрицательном направлении оси x на 10 ± 2 мм; (в) — источник $\varnothing 11.2$ мм на расстоянии 515 мм на акустической оси системы и сдвинутый в положительном направлении оси x на 13 ± 2 мм.

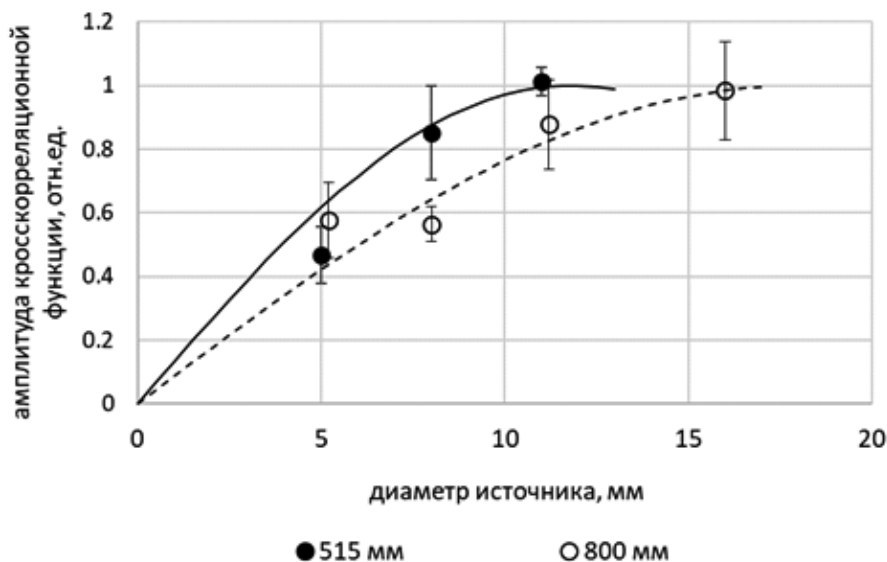


Рис. 4. Экспериментальные (маркеры) и рассчитанные (линии) зависимости амплитуд кросскорреляционных функций от диаметров источников при двух расстояниях между источниками и приемниками 515 (сплошная линия) и 800 (пунктир) мм. Показана стандартная ошибка.

$\left[\frac{Dx_0}{cz} - \frac{3}{4f_0}, \frac{Dx_0}{cz} + \frac{3}{4f_0} \right]$. Этот диапазон с центром в точке максимума кросскорреляционной функции составляет 1.2 мкс.

На рис. 3а показаны кросскорреляционные функции для источников разных размеров (7.6 и 15.8 мм), которые были расположены на акустической оси системы на расстоянии 800 мм от приемников. В этом случае при аппроксимации подбирали единственный параметр — амплитуду кросскорреляционной функции (см. выражение (2)). Как и следовало ожидать, максимум кросскорреляционной функции выше для более широкого источника.

На рис. 3б и 3в показаны кросскорреляционные функции для источника диаметром 11.2 мм, который располагали на расстояниях 800 (рис. 3б) и 515 (рис. 3в) мм от приемников и на 10 ± 2 мм в отрицательном направлении оси x (рис. 3б) и на 13 ± 2 мм в положительном направлении оси x (рис. 3в). В этом случае при аппроксимации подбирали два параметра — амплитуду кросскорреляционной функции и сдвиг x_0 источника. В результате оптимальные приближения соответствовали сдвигам источника в пространстве на 15 и -11 мм, что в целом соответствует указанным экспериментальным данным. При этом временные кросскорреляционные функции сдвигались на -0.2 (рис. 3б) и на 0.4 (рис. 3в) мкс.

Измеренные и рассчитанные по формуле (2) зависимости максимальных значений (амплитуд) кросскорреляционных функций от диаметра Δx

источника для $z = 515$ и 800 мм представлены на рис. 4. Из графика видно, что экспериментальные и рассчитанные значения близки с учетом погрешности измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены корреляционные измерения теплового акустического излучения с помощью двух пар приемников. При этом изменяли следующие параметры экспериментальной схемы: полосу пропускания приемников, размер и положение источников, а также расстояние от источников до приемников. Согласно формулам, используемым в радиоастрономии [10], рассчитаны кросскорреляционные функции теплового акустического излучения. Показано, что экспериментальные и расчетные значения параметров кросскорреляционных функций близки с учетом погрешности измерений.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда No 23-22-00175, <https://rscf.ru/project/23-22-00175/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rieke V.* MR thermometry // *Interventional Magnetic Resonance Imaging*. 2011. P. 271–288.
2. *Hand J.W. et al.* Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modelling // *Physics in Medicine & Biology*. 2001. V. 46. № 7. P. 1885.
3. *Maass-Moreno R., Damianou C.A.* Noninvasive temperature estimation in tissue via ultrasound echo-

- shifts. Part I. Analytical model // J. Acoust. Soc. Am. 1996. V. 100. № 4. P. 2514–2521.
4. Bowen T. Passive remote temperature sensor system: пат. 4246784 США. 1981.
5. Аносов А.А., Беляев Р.В., Вилков В.А., Дворникова М.В., Дворникова В.В., Казанский А.С., Курятникова Н.А., Мансфельд А.Д. Акустотермометрический контроль кисти человека при гипертермии и гипотермии // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 1. С. 109–114.
6. Anosov A.A., Subochev P.V., Mansfeld A.D., Sharakshane A.A. Physical and computer-based modeling in internal temperature reconstruction by the method of passive acoustic thermometry // Ultrasonics. 2018. V. 82. 336–344.
7. Аносов А.А., Беляев Р.В., Вилков В.А., Казанский А.С., Курятникова Н.А., Мансфельд А.Д. Акустотермометрические данные о кровотоке и теплопродукции в предплечье при физической нагрузке // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 4. С. 539–544.
8. Аносов А.А., Пасечник В.И., Исрефилов М.Г. Восстановление двумерного распределения внутренней температуры модельного объекта методом пассивной термоакустической томографии // Акуст. журн. 1999. Т. 45(1). С. 20–24.
9. Zernike F. The concept of degree of coherence and its application to optical problems // Physica. 1938. V. 5. № 8. P. 785–795.
10. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. С. 19–22.
11. Hessemer Jr R.A., Perper L.J. Correlation thermography: пат. 4416552 США. 1983.
12. Аносов А.А., Антонов М.А., Пасечник В.И. Измерение корреляционных свойств теплового акустического излучения // Акуст. журн. 2000. Т. 46. С. 28–34.
13. 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. 298–298.
14. Yurchenko S.A., Dmitriev K.V. Reconstructing a Dynamic Change in an Object's Temperature by Means of Acoustic Thermotomography // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2022. V. 86. № 1. P. 88–93.
15. Миргородский В.И., Герасимов В.В., Пешин С.В. Экспериментальные исследования особенностей пассивной корреляционной томографии источников некогерентного акустического излучения мегагерцевого диапазона // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 5. С. 702–709.
16. Вилков В.А., Кротов Е.В., Мансфельд А.Д., Рейман А.М. Применение фокусируемых антенн для задач акустотермометрии // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 1. С. 81–89.
17. Аносов А.А., Барабаненков Ю.Н., Сельский А.Г. Корреляционный прием теплового акустического излучения // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 6. С. 725–730.
18. Weaver R.L., Lobkis O.I. Elastic wave thermal fluctuations, ultrasonic waveforms by correlation of thermal phonons // J. Acoust. Soc. Am. 2003. V. 113. № 5. P. 2611–2621.
19. Аносов А.А., Грановский Н.В., Ерофеев А.В., Беляев Р.В., Санин А.Г., Мансфельд А.Д. Корреляционные измерения теплового акустического излучения решеткой датчиков. // Акуст. журн. 2024. Т. 70. № 1. С. 21–28.
20. Аносов А.А., Барабаненков Ю.Н., Казанский А.С., Лесс Ю.А., Шаракианэ А.С. Обратная задача акустотермографии при корреляционном приеме теплового акустического излучения // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 1. С. 98–103.
21. Мансфельд А.Д. Акустотермометрия. Состояние и перспективы // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 4–5. С. 546–556.
22. Аносов А.А. Одномерная обратная задача пассивной акустической термометрии с использованием уравнения теплопроводности: компьютерное и физическое моделирование // Акуст. журн. 2022. Т. 68. № 5. С. 562–570.
23. Аносов А.А., Шаракианэ А.А., Казанский А.С., Мансфельд А.Д., Санин А.Г., Шаракианэ А.С. Аппаратная функция широкополосного акустотермометрического датчика // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 5. С. 616–623.

Verification of relations obtained in radio astronomy for correlation reception of thermal acoustic radiation

A. A. Anosov^{a,b}, N. V. Granovskii^{a,*}, A. V. Erofeev^{a,b}, A. D. Mansfel'd^c,
R. V. Belyaev^c, A. S. Kazansky^a

^a*Sechenov First Moscow State Medical University of the Russian Ministry of Health
(Sechenov University), Trubetskaya St. 8, Bldg. 21, Moscow, 19991 Russia*

^b*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics
of the Russian Academy of Sciences, Mokhovaya St. 11/7, Moscow, 125009 Russia*

^c*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Ulyanova St. 46, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

*e-mail: granovsky_nikita@mail.ru

In this work, correlation reception of thermal acoustic radiation by a pair of sensors was carried out. The experiment used receivers with different bandwidths, changed the size of the heated sources and the distance from the sources to the receivers, and also shifted the sources in the transverse direction perpendicular to the acoustic axis of the system. For each case, using the relations used in radio astronomy, the correlation functions of thermal acoustic radiation were calculated. It is shown that the cross-correlation functions obtained in experiments and calculated are close, taking into account the measurement error.

Ключевые слова: cross correlation function, thermal acoustic radiation, acoustic brightness temperature