

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РЕШЕТКОЙ ДАТЧИКОВ

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

^aФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России, ул. Трубецкая 8, стр. 2, Москва, 119991 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 24.01.2023 г.

После доработки 27.04.2023 г.

Принята к публикации 22.06.2023 г.

Для корреляционного измерения теплового акустического излучения использована решетка, состоящая из трех датчиков. Впервые получены все кросс-корреляционные функции для каждой пары датчиков. Измерения проведены при двух положениях источника (нагретого узкого тefлонового цилиндра), расстояние между которыми было равно половине пространственного периода кросс-корреляционной функции соседних датчиков. Измеренные корреляционные функции находились в противофазе, что соответствует рассчитанным корреляционным функциям теплового акустического излучения. Для перехода от корреляционных функций к температурному распределению суммированы пространственные кросс-корреляционные функции для соседних и для крайних датчиков в решетке. Корреляционный прием позволяет существенно повысить пространственное разрешение метода.

Ключевые слова: кросс-корреляционная функция, тепловое акустическое излучение, восстановление температуры

DOI: 10.31857/S0320791924010039 **EDN:** ZPLETY

ВВЕДЕНИЕ

В ряде медицинских процедур — при гипертермии и термоабляции, в диагностике, в том числе, в ранней диагностике, при контроле адресной доставки лекарств в термолипосомальной оболочке и т.д. — необходимо осуществлять безболезненные неинвазивные измерения глубинной температуры тела человека. Для этого существует ряд методов: магнитно-резонансная термометрия [1], регистрация теплового излучения в СВЧ-диапазоне [2], методы измерения скорости звука, которая меняется с изменением температуры тканей [3], пассивная акустическая термометрия [4]. Предлагаемые методы имеют свои преимущества и недостатки. Например, в идеале 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 более дешевого метода при условии надлежащей точности. В частности, предлагается пассивная акустическая

термометрия, основанная на регистрации собственного теплового акустического излучения организма человека в мегагерцовом диапазоне, которая позволяет обеспечить миллиметровое разрешение [5, 6].

В пассивной акустической термометрии можно использовать корреляционный [7] или некорреляционный [8] прием теплового излучения. Согласно теореме Ван Циттерта–Цернике [9], измеренное на двух приемниках тепловое излучение (которое принято считать дельта-коррелированным в пространстве и во времени) будет коррелировать. Это связано с тем, что приемное устройство имеет конечную полосу пропускания, в результате чего возникает временная корреляция регистрируемого теплового сигнала. Преимущество корреляционного приема по сравнению с некорреляционным — в лучшем пространственном разрешении. Предел разрешения при некорреляционном приеме обратно пропорционален размеру приемника, при корреляционном приеме — расстоянию между крайними датчиками в приемной решетке [10].

Впервые пространственная корреляционная функция теплового акустического излучения с помощью двух плоских пьезопреобразователей была измерена в работе [11]. Нагретый источник перемещали параллельно датчикам. В работах [12–16] с помощью пары датчиков были получены временные кросс-корреляционные функции теплового акустического излучения. В работах [12, 13] было проведено экспериментальное моделирование процессов активно-пассивной термоакустической томографии. В работе [14] были исследованы корреляционные сигналы, полученные при суммарных задержках. В работе [15] корреляция получена на фокусируемых антеннах. В работе [17] были экспериментально рассмотрены вопросы корреляции тепловых фононов упругих волн. Отметим, что корреляционный прием акустических излучений разрабатывается и для идентификации источников в звуковом диапазоне [18].

В настоящей статье осуществлен корреляционный прием теплового акустического излучения решеткой, состоящей из трех датчиков, впервые получены все три кросс-корреляционные функции для каждой пары датчиков. Результат получен благодаря коллаборации групп ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и ИПФ РАН.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СХЕМА

Схема для корреляционного приема теплового акустического излучения представлена на рис. 1. Датчики $R1$, $R2$, $R3$ теплового акустического излучения – диаметром $2a = 14.0 \pm 0.2$ мм, расстояние между центрами которых $D = 16.0 \pm 0.3$ мм,

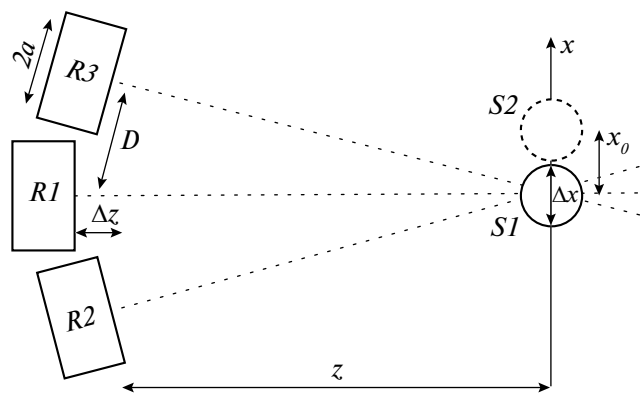


Рис. 1. Схема корреляционного приема теплового акустического излучения решеткой из трех датчиков $R1$, $R2$, $R3$; $1, 2, 3$ – оси датчиков; $S1$, $S2$ – положения источника, $2a$ – диаметр датчика, D – расстояние между центрами датчиков, z – расстояние от приемников до источника, Δz – сдвиг приемника в направлении акустической оси системы, x – ось, вдоль которой перемещали источник, Δx – диаметр источника, x_0 – сдвиг источника.

находились в аквариуме, заполненном водой при комнатной температуре $21.0 \pm 0.3^\circ\text{C}$. Оси датчиков $1, 2, 3$ лежали в горизонтальной плоскости и пересекались на расстоянии $z = 550 \pm 3$ мм от приемников. В качестве источника теплового акустического излучения использовали нагретый до температуры $50.0 \pm 0.3^\circ\text{C}$ тефлоновый цилиндр длиной 142 ± 1 мм и диаметром $\Delta x = 10.8 \pm 0.1$ мм, расположенный вертикально в точке пересечения акустических осей. Температуру воды и начальную температуру цилиндра контролировали цифровыми термометрами DS18S20P (Maxim Integrated, Сан-Хосе, США) с точностью 0.3 К.

Отметим, что расстояния от источника $S1$, находящегося в точке пересечения акустических осей, до приемников не были одинаковыми. Это связано со сдвигом Δz приемников в направлении акустической оси системы, который трудно контролировать, но который значительно меняет вид кросс-корреляционной функции. Например, сдвиг приемников на 0.4 мм (около половины длины волны) вызывает сдвиг корреляционной функции на полпериода.

Чтобы избежать “паразитных”, не акустических корреляций, мы проводили измерения теплового акустического излучения дважды: когда между нагретым источником и приемниками находился отражатель и когда его не было. В результате брали разницу между корреляционными функциями, полученными без отражателя и с отражателем. Измерения проводили при двух положениях вертикального источника: в точке пересечения акустических осей и при сдвиге в направлении, перпендикулярном акустической оси центрального датчика на расстояние $x_0 = 11.0 \pm 0.5$ мм. Это расстояние приблизительно равно половине пространственного периода кросс-корреляционной функции соседних датчиков. Поэтому измеренные при двух положениях источника корреляционные функции должны быть в противофазе. Это также позволяло убедиться, что измерялись акустические, а не “паразитные” сигналы. Время одного измерения – 4 с (за это время температура тефлонового цилиндра менялась незначительно), измерения повторяли пять раз.

Для измерений теплового акустического излучения был использован многоканальный акустотермограф [19, 20], разработанный в ИПФ РАН группой под руководством А.Д. Мансфельда (полоса пропускания 1.3 – 2.4 МГц, пороговая чувствительность при времени интегрирования 10 с – 0.2 К). Принимаемые акустические сигналы преобразовывались в электрические, усиливались и подавались на 14-разрядный 4-канальный АЦП ADM 414 $\times$ 65M (Insys, Москва, Россия) с частотой дискретизации 15 МГц на один канал. Разработанные программы проводили дальнейшую обработку данных.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Согласно [10], кросс-корреляционную 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 первым и вторым датчиками, черта сверху означает усреднение по времени, $\overline{p_1(t)} = \overline{p_2(t)} = 0$, для схемы, показанной на рис. 1, можно представить выражением:

$$K(\tau) \sim T_0 \frac{\sin \left[\pi \frac{\Delta f}{f} \left(\frac{D}{\lambda} \frac{x_0}{z} - f\tau - \frac{\Delta z}{\lambda} \right) \right]}{\pi \frac{\Delta f}{f} \left(\frac{D}{\lambda} \frac{x_0}{z} - f\tau - \frac{\Delta z}{\lambda} \right)} \times \frac{\sin \left(\pi \frac{D}{\lambda} \frac{\Delta x}{z} \right)}{\pi \frac{D}{\lambda} \frac{\Delta x}{z}} \cos \left[2\pi \left(\frac{D}{\lambda} \frac{x_0}{z} - f\tau - \frac{\Delta z}{\lambda} \right) \right], \quad (1)$$

где Δf – полоса пропускания датчика, λ и f – средние длина волны и частота принимаемого сигнала, D – расстояние между датчиками, z – расстояние от датчиков до источника сигнала, Δz – сдвиг приемника по направлению акустической оси, $T_0, x_0, \Delta x$ – температура, положение центра, поперечный размер источника. Здесь предполагается, что температура источника T_0 постоянна и апертуры датчиков на расстоянии z совпадают. Множитель

$$\frac{\sin \left[\pi \frac{\Delta f}{f} \left(\frac{D}{\lambda} \frac{x_0}{z} - f\tau - \frac{\Delta z}{\lambda} \right) \right]}{\pi \frac{\Delta f}{f} \left(\frac{D}{\lambda} \frac{x_0}{z} - f\tau - \frac{\Delta z}{\lambda} \right)}$$

определяется конеч-

ной полосой Δf пропускания приемника, мно-

житель $\frac{\sin \left(\pi \frac{D}{\lambda} \frac{\Delta x}{z} \right)}{\pi \frac{D}{\lambda} \frac{\Delta x}{z}}$ – конечным размером Δx

источника, множитель $\cos \left[2\pi \left(\frac{D}{\lambda} \frac{x_0}{z} - f\tau - \frac{\Delta z}{\lambda} \right) \right]$

определяет осциллирующий характер коррелированного сигнала. Выражение (1) справедливо,

если $\frac{\Delta x}{z} \ll 1$ и $\frac{x_0}{z} \ll 1$. В наших экспериментах $\frac{\Delta x}{z} = 0.020 \pm 0.001$, $\frac{x_0}{z} = 0.020 \pm 0.001$. Отметим,

что вертикальный размер источника превышает поперечный размер апертуры датчика, поэтому выражение (1) не зависит от координаты y . При ширине источника, равной пространственному периоду корреляционной функции $\Delta x = \frac{\lambda z}{D}$,

корреляционный сигнал равен нулю. При прочих

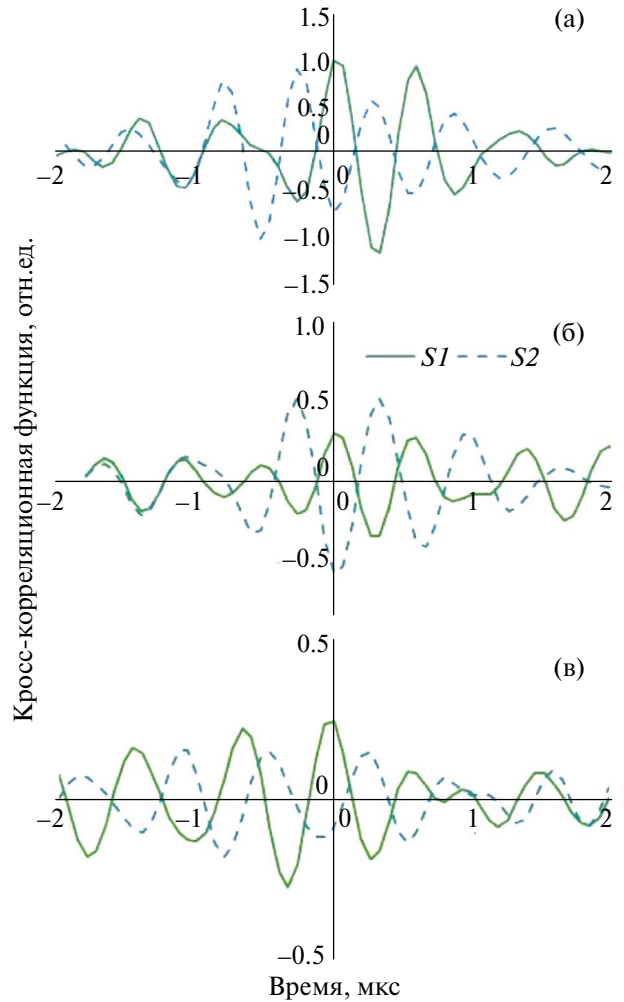


Рис. 2. Кросс-корреляционные функции теплового акустического излучения, полученные на датчиках: (а) – R1, R2; (б) – R1, R3; (в) – R2, R3 при разных положениях источника S1 и S2 (нумерацию датчиков и положений источника см. на рис. 1).

равных условиях корреляционный сигнал максимален, когда ширина источника равна половине пространственного периода корреляционной

функции. В наших экспериментах $\sin \left(\pi \frac{D}{\lambda} \frac{\Delta x}{z} \right) = 0.97 \pm 0.02$ – для соседних датчиков и 0.44 ± 0.04 – для крайних.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измеренные кросс-корреляционные функции представлены на рис. 2 с учетом сдвига вдоль акустической оси.

Сдвиг источника из центрального положения, на пересечении акустических осей датчиков (S1 на рис. 1), в сторону, на расстояние x_0 (S2 на

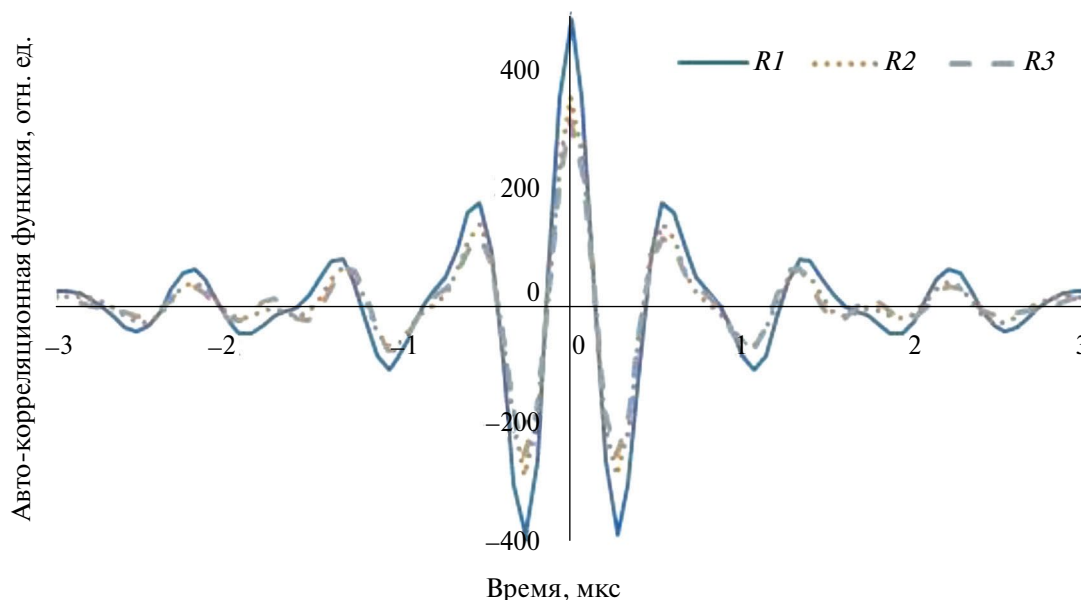


Рис. 3. Автокорреляционные функции теплового акустического излучения датчиков $R1$, $R2$, $R3$ (нумерацию см. на рис. 1).

рис. 1), соответствует сдвигу по фазе на $2\pi \frac{D x_0}{\lambda z}$.

В целом результат ожидаемый: у соседних пар датчиков, расстояние между которыми $D = 16$ мм, сдвиг источника был подобран так, чтобы сдвиг кросс-корреляционных функций во времени

был близок к $(2\pi \frac{D x_0}{\lambda z} = 0.85\pi)$. При этом визуально кросс-корреляционные функции выглядят, как находящиеся в противофазе (рис. 2а, 2б). У пары крайних датчиков, расстояние между которыми $D = 32$ мм, сдвиг по фазе составил $\sim 3\pi/2$

$(2\pi \frac{D x_0}{\lambda z} = 1.7\pi)$. При этом визуально кросс-корреляционные функции выглядят сдвинутыми приблизительно на четверть периода (рис. 2в).

Получены также автокорреляционные функции датчиков (см. рис. 3). В качестве примера для датчика $R2$ рассчитан спектр (см. рис. 4). Спектр по автокорреляционной функции (назовем его интегральным спектром) определяется свойствами датчика как приемника акустического излучения, а также частотными свойствами усилителя сигналов. Чтобы получить спектр, который определяется исключительно акустическими свойствами датчика, необходимо взять разность интегральных спектров, полученных для случаев, когда измерения проведены с нагретым источником и без источника. Акустический спектр можно также получить из кросс-корреляционной

функции датчиков (если предполагать, что спектры датчиков практически одинаковы). Из рис. 4 видно, что акустический спектр ($\sim 1.3\text{--}2.3$ МГц) сужен по сравнению с интегральным спектром ($\sim 1.3\text{--}2.4$ МГц). Это отчетливо проявляется на высоких частотах, где верхние границы спектров различаются на ~ 0.1 МГц.

Примеры расчетов кросс-корреляционных функций по формуле (1) представлены на рис. 5. В расчетах мы использовали параметры схемы расположения датчиков, приведенные выше, а также характеристики полосы пропускания датчиков, полученные по спектрам. Видно, что в целом результаты расчетов соответствуют экспериментальным данным.

В работе [21] для локализации источника нагрева было предложено складывать кросс-корреляционные функции. Переход от временного сдвига τ к координате x осуществлялся согласно выражению (1):

$$x = \frac{cz}{D} \tau, \quad (2)$$

где $c = 1500$ м/с — скорость звука в воде. Таким образом, если временные кросс-корреляционные функции любой пары датчиков характеризовались одной частотой — средней частотой приема, то при переходе (2) к пространственному распределению пространственная частота корреляционной функции для датчиков $R2$ и $R3$ (крайних в решетке) увеличивалась вдвое. Это соответствует замечанию, сделанному в работе [10], что пара приемников определяет пространственную

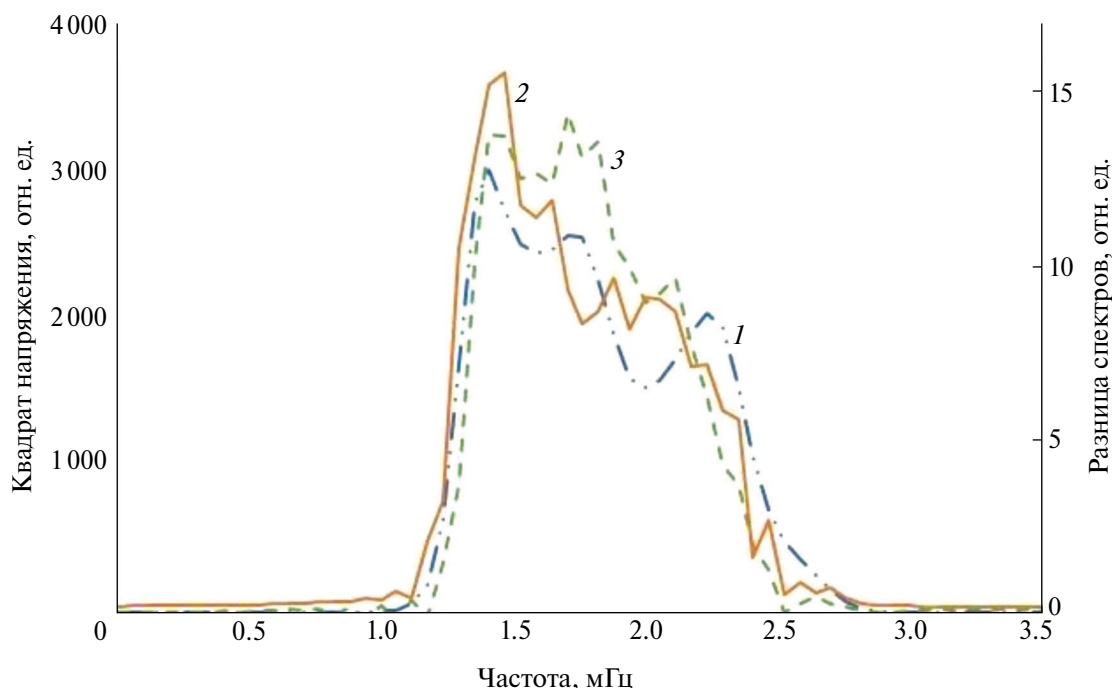


Рис. 4. Спектр, полученный из автокорреляционной функции датчика *R2* (1), из кросс-корреляционной функции *R1* и *R2* (2); разность спектров датчика *R2* с источником и без (3).

гармонику исследуемого изображения, которая зависит от расстояния между приемниками. На рис. 6 для примера показана сумма экспериментальных данных и расчетов, проведенных по формуле (1). Суммировали кросс-корреляционные функции для соседних датчиков *R1* и *R3* и для крайних в решетке датчиков *R2* и *R3*, когда источник находится в положении *S1*. Если в решетке достаточно датчиков, то в результате такого суммирования можно определить положение нагретого объекта с точностью лучшей, чем та, которую может дать один датчик. Для сравнения на рис. 6 показана аппаратная функция широкополосного датчика диаметром 14 мм, полосой пропускания 1.3–2.3 МГц на расстоянии 550 мм от приемника [22].

Рассматриваемый подход делает возможным локализацию нагретой области, т.к. сигналы из областей, где аппаратные функции датчиков не пересекаются, не коррелируют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено корреляционное измерение теплового акустического излучения решеткой, состоящей из трех датчиков. Впервые получены все три кросс-корреляционные функции для каждой пары датчиков. Чтобы исключить возможные “паразитные”, неакустические корреляции, рассчитывали разницу между корреляционными функциями,

полученными с нагретым источником и без. Для проверки проводили измерения при двух положениях источника, расстояние между которыми было равно половине пространственного периода кросс-корреляционной функции. Измеренные корреляционные функции находились в противофазе, что подтверждало правильность измерений. Были рассчитаны кросс-корреляционные функции теплового акустического излучения, в целом соответствующие экспериментальным данным. Для локализации источника нагрева была построена сумма пространственных кросс-корреляционных функций для соседних и для крайних датчиков в решетке. При этом из-за разного расстояния между датчиками пространственная частота корреляционной функции для крайних датчиков была в два раза больше, чем для соседних. В результате такого суммирования можно определить положение нагретого объекта.

На основе измеренных авто- и кросс-корреляционных функций были построены спектры приема акустических сигналов без учета шумов усилителя.

Предполагаются дальнейшие исследования корреляционного приема теплового акустического излучения решеткой, состоящей из большего числа приемников.

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

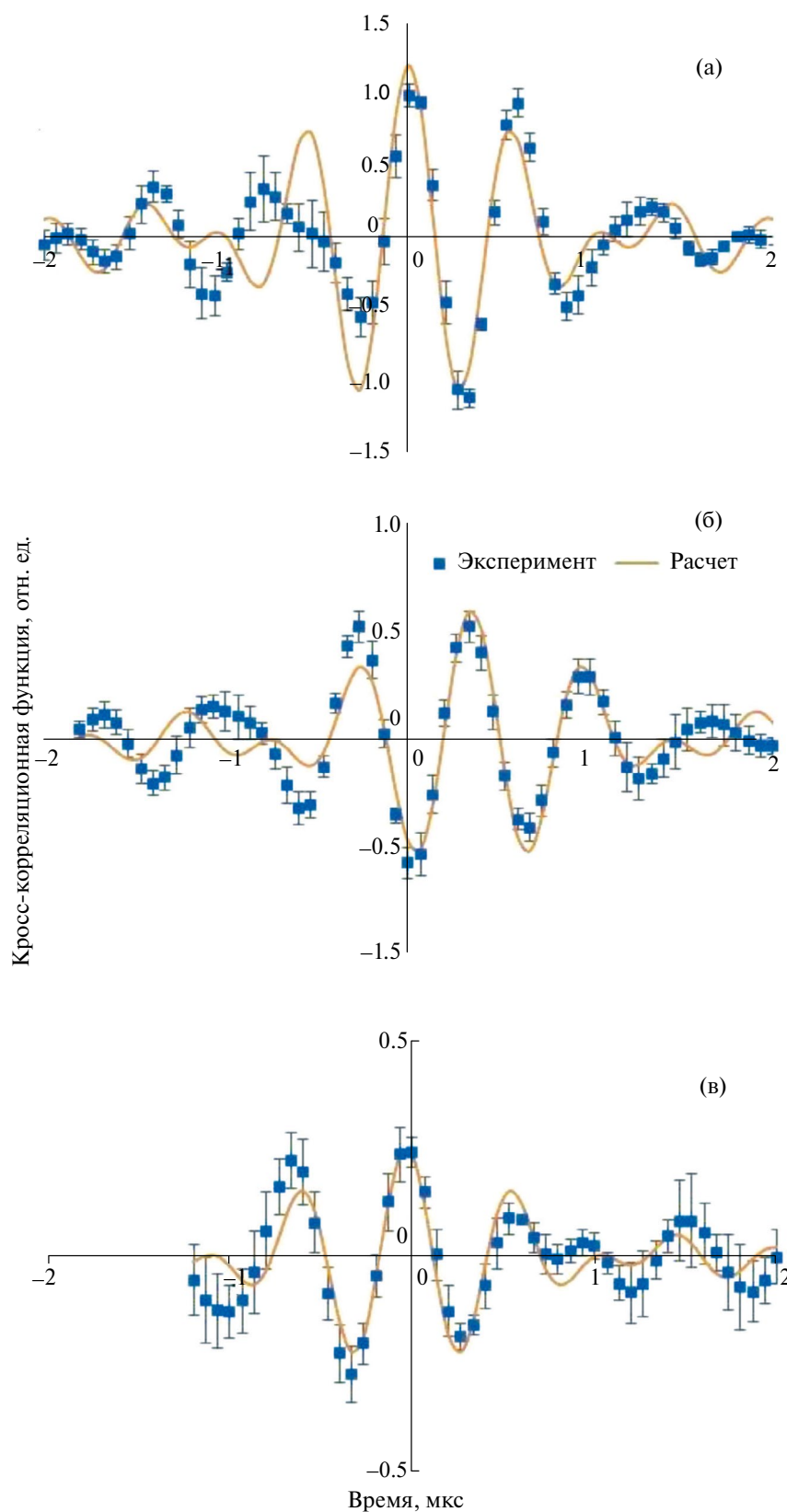


Рис. 5. Рассчитанные и измеренные кросс-корреляционные функции теплового акустического излучения, полученные: (а) — для датчиков $R1$, $R2$, источник в центре ($S1$); (б) — для $R1$, $R3$, источник сдвинут на 11 мм ($S2$); (в) — для $R2$, $R3$, источник в центре ($S1$).

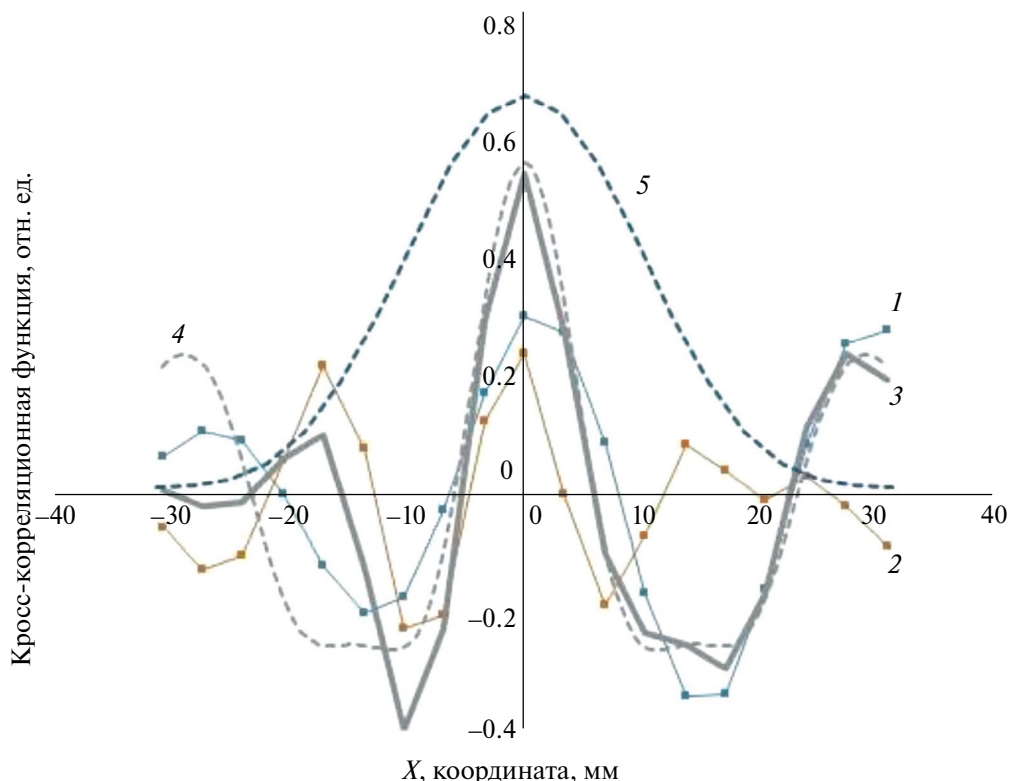


Рис. 6. Измеренные пространственные кросс-корреляционные функции, полученные для соседних и крайних датчиков $R1$ и $R3$ (1), $R2$ и $R3$ (2) и их сумма (3). Рассчитанная сумма кросс-корреляционных функций (4). Показана также рассчитанная аппаратная функция датчика (5). Источник в положении $S1$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rieke V.* MR thermometry // *Interventional Magnetic Resonance Imaging*. 2011. P. 271–288.
2. *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.
3. *Hand J.W., Van Leeuwen G.M.J., Mizushima S., Van de Kamer J.B., Maruyama K., Sugiura T., Azzopardi D.V. and Edwards A.D.* 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.
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. *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.
7. *Hessmer Jr R.A., Perper L.J.* Correlation thermography: пат. 4416552 США. 1983.
8. *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.
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. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. С. 19–22.
11. *Аносов А.А., Антонов М.А., Пасечник В.И.* Измерение корреляционных свойств теплового акустического излучения // *Акуст. журн.* 2000. Т. 46. С. 28–34.
12. *Буров В.А., Дариалашвили П.И., Евтухов С.Н., Румянцев О.Д.* Экспериментальное моделирование процессов активно-пассивной термоакустической томографии // *Акуст. журн.* 2004. Т. 50. № 3. С. 298–298.

13. *Yurchenko S.A., Dmitriev K.V.* Reconstructing a Dynamic Change in an Object's Temperature by Means of Acoustic Thermotomography // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2022. V. 86. № 1. P. 88–93.
14. *Миргородский В.И., Герасимов В.В., Пешин С.В.* Экспериментальные исследования особенностей пассивной корреляционной томографии источников некогерентного акустического излучения меггерцевого диапазона // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52. № 5. С. 702–709.
15. *Вилков В.А., Кротов Е.В., Мансфельд А.Д., Рейман А.М.* Применение фокусируемых антенн для задач акустостеростной термометрии // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. № 1. С. 81–89.
16. *Аносов А.А., Барабаненков Ю.Н., Сельский А.Г.* Корреляционный прием теплового акустического излучения // *Акуст. журн.* 2003. Т. 49. № 6. С. 725–730.
17. *Weaver R.L., Lobkis O.I.* Elastic wave thermal fluctuations, ultrasonic waveforms by correlation of thermal phonons // *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. Т. 113. № 5. С. 2611–2621.
18. *Демьянов М.А.* Корреляционный метод идентификации акустических источников с помощью микрофонных измерений // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68. № 6. С. 638–646.
19. *Мансфельд А.Д.* Акустотермометрия. Состояние и перспективы // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 4–5. С. 546–556.
20. *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.
21. *Аносов А.А., Барабаненков Ю.Н., Казанский А.С., Лесс Ю.А., Шаракишанэ А.С.* Обратная задача акустотермографии при корреляционном приеме теплового акустического излучения // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 1. С. 98–103.
22. *Аносов А.А., Шаракишанэ А.А., Казанский А.С., Мансфельд А.Д., Санин А.Г., Шаракишанэ А.С.* Аппаратная функция широкополосного акустотермометрического датчика // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 5. С. 616–623.