АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2003, том 49, № 6, с. 725–730

УДК 534.8

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ПРИЕМ ТЕПЛОВОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2003 г. А. А. Аносов[1, 3], Ю. Н. Барабаненков[1, 2], А. Г. Сельский[1, 2]
[1]НИЦ "ЭЛДИС" РАН
[2]Институт радиотехники и электроники РАН
[3]Московская медицинская академия им. И.М. Сеченова
E-mail: anosov@hotmail.ru
Поступила в редакцию 18.11.2002 г.

Измерены коррелированные сигналы теплового акустического излучения от протяженных в поперечном направлении нагретых источников: от пары узких пластилиновых пластин и от широкой пластилиновой полосы. При измерениях перемножали сдвинутые во времени друг относительно друга сигналы, регистрируемые двумя пьезодатчиками. Величина коррелированных сигналов теплового акустического излучения определяется пространственной вариацией температуры в исследуемой среде.

Для измерения глубинной температуры биообъектов возможно использование пассивного акустического термотомографа, основанного на регистрации теплового акустического излучения (ТАИ) [1]. Проведены первые эксперименты по измерению с помощью некогерентного приема ТАИ распределения глубинной температуры [2] и по локализации тепловых источников [3] в модельных объектах, измерен профиль внутренней температуры в кисти руки человека [4]. Проведены измерения термоакустической эмиссии, возникающей при нагреве мягких тканей биообъекта [5]. Возможности корреляционного приема ТАИ как основы пассивного акустического термотомографа в последнее время теоретически обсуждали в ряде работ [6–8]. С той же целью проведены экспериментальные исследования корреляционного приема шумового (нетеплового) акустического излучения [9], фокусированного приема [10, 11] ТАИ. Измерены и экспериментально исследованы пространственная и пространственно-временная корреляционные функции давления ТАИ [1, 12–14]. Параллельно проводятся теоретические исследования корреляционного приема ТАИ [8, 15, 16].

В предыдущей нашей работе [14] мы экспериментально показали возможность получить ненулевой коррелированный сигнал (пространственно-временную корреляционную функцию давления) ТАИ с помощью пары пьезопреобразователей (ПП), сдвигая во времени измеряемые сигналы друг относительно друга. Источником излучения служила неподвижная узкая нагретая пластина. Небольшой характерный размер источника, меньший половины периода пространственной корреляционной функции, требовался для получения ненулевого коррелированного сигнала [12]. Однако это условие неприемлемо при термотомографии биообъектов. Цель данной работы – экспериментально исследовать возможности корреляционного приема ТАИ от протяженных источников, характерные поперечные размеры которых жестко не ограничены.

Принципиальная схема эксперимента, аналогичная представленной в работе [14], включала аквариум *1* (рис. 1) с водой. Приемниками ТАИ служили два круглых плоских пьезопреобразователя ($ПП_1$ и $ПП_2$) радиуса a = 5 мм (расстояние между центрами – D = 18 мм). Акустические оси пьезопреобразователей лежали в горизонтальной плоскости и пересекались на расстоянии z = 200 мм от ПП на оси x. Пьезопреобразователи (средняя частота приема f = 2.2 МГц, полоса пропускания Δf = 0.6 МГц), снабженные четвертьволновыми слоями, имели приблизительно одинаковую чувствительность. Использовали два источника ТАИ: пару параллельных узких пластилиновых пластин (на рис. 1 не показаны) шириной (вдоль оси x) d = 4 мм (расстояние между пластинами – 4 мм) и широкую пластилиновую полосу *2*. Ширина полосы, а также длина (вертикальный размер) пластин и полосы были больше поперечного размера аппаратных функций приемников ТАИ. Толщина источников составляла 5 мм, что означало практически полное поглощение ультразвука в пластилине. Источники ТАИ помещали в кювету *3* с пенопластовыми стенками и акустически прозрачными окнами, также заполненную водой, которую нагревали относительно аквариума.

Методика регистрации сигналов совпадала с представленной в работе [14]. Звуковые давления на $ПП_1$ и $ПП_2$ преобразовывались в электричес-

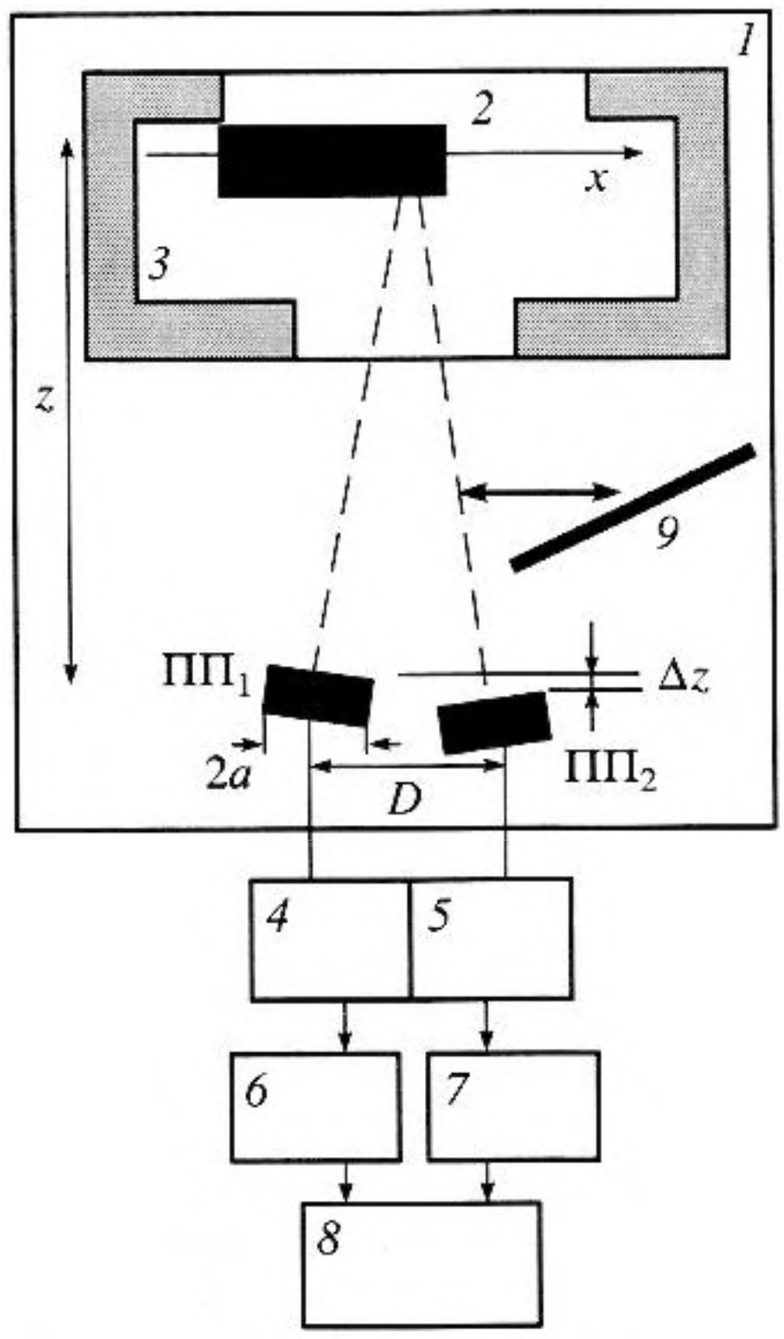

Рис. 1. Схема эксперимента: *1* – аквариум; *2* – пластилиновая полоса; *3* – кювета; *4*, *5* – предварительные усилители; *6* (*7*) – усилитель У3-29 (У3-33); *8* – персональный компьютер; *9* – отражательная пластина. $ПП_1$ и $ПП_2$ – пьезопреобразователи радиуса *a*, *D* – расстояние между их центрами, *z* – расстояние от оси *x* до ПП, Δz – сдвиг одного ПП относительно другого.

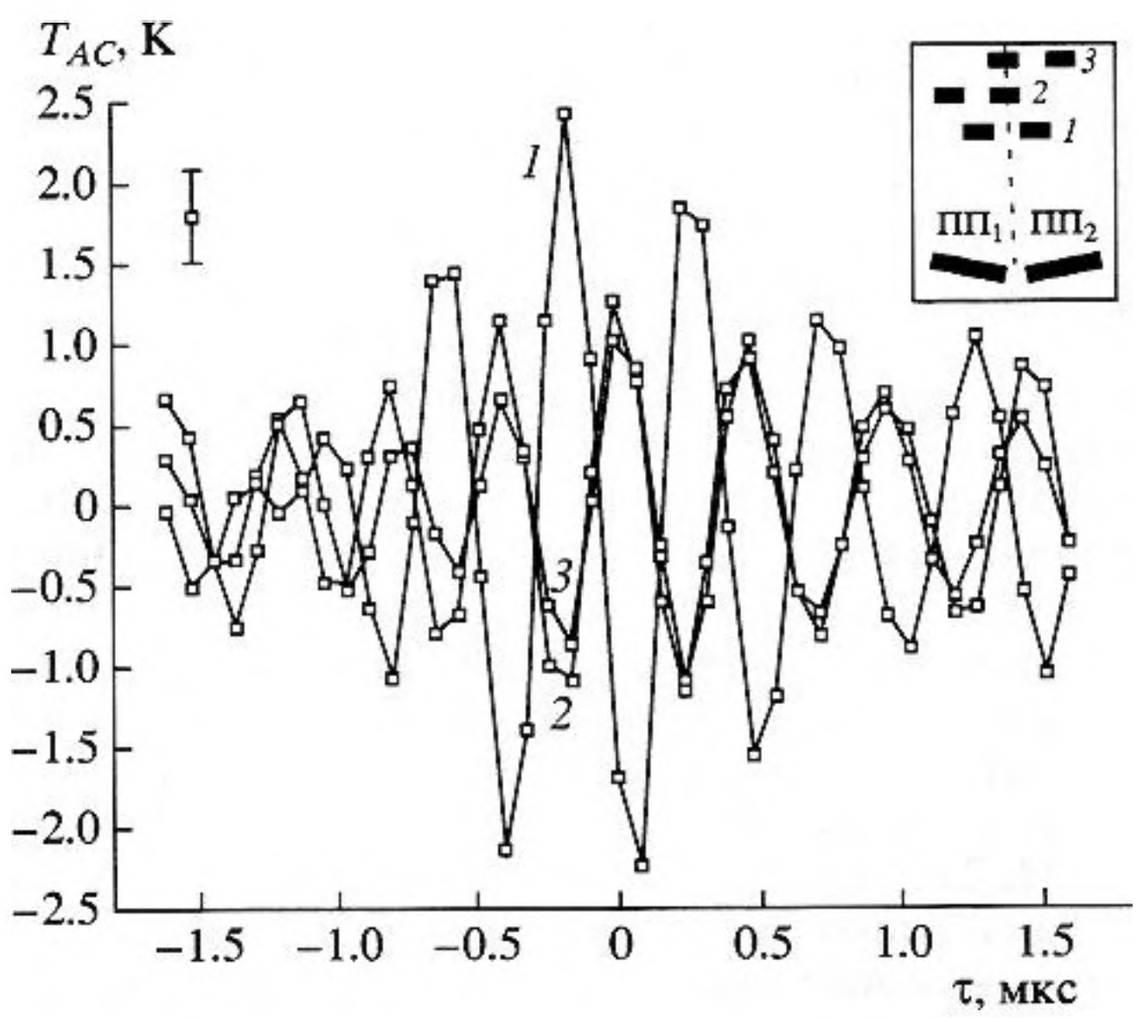

Рис. 2. Измеренные коррелированные акустояркостные температуры T_{AC} пары пластин в зависимости от временного сдвига τ одного сигнала относительно другого. Врезка: геометрия эксперимента (положениям пластин на врезке соответствуют экспериментальные кривые).

кие сигналы, которые пропускали через предварительные усилители *4* и *5* (разработка М.А. Антонова [12]), а также через усилители У3-29 (*6*) и У3-33 (*7*). Усиленные сигналы через 8-разрядную плату ЛА-н10М7PCI (ЗАО "Руднев–Шиляев", Россия) записывали в персональный компьютер *8*. Частота съема составляла 12.5 МГц, на два канала приходилось 256 килобайт памяти платы. В компьютере сдвигали сигналы во времени относительно друг друга и определяли среднее значение произведений отсчетов сигналов. Измерения повторяли для получения статистически значимых результатов (время интегрирования составляло около 40 с).

Измерения проводили в двух режимах: в первом случае ("открытое" состояние) сигнал на ПП шел от источника, во втором ("закрытое") между ПП и кюветой ставили отражательную дюралевую пластину *9*: сигнал на ПП шел из аквариума, причем температуры ПП и аквариума совпадали. Для исключения дрейфов сигналов и возможных неакустических источников корреляции рассчитывали разность усредненных функций в первом и во втором режимах. Для нормировки коррелированных сигналов в градусах измеряли интенсивность ТАИ (акустояркостную температуру) каждым ПП в "открытом" и "закрытом" состояниях от широкой полосы, полностью "перекрывающей" аппаратную функцию ПП. В этом случае полоса является акустическим черным телом, и разность интенсивностей ТАИ в "открытом" и "закрытом" состояниях пропорциональна разнице температур полосы и аквариума. Коррелированный сигнал, выраженный в градусах, будем называть (как было предложено в работе [12]) коррелированной акустояркостной температурой T_{AC}.

Коррелированный сигнал для пары пластин измеряли при трех положениях источника (см. врезку на рис. 2): пластины расположены вертикально симметрично акустической оси системы (1), пластины сдвинуты влево (2) и вправо (3) на 4 мм. На рис. 2 представлены измеренные коррелированные акустояркостные температуры T_{AC} ТАИ в зависимости от временного сдвига (задержки) τ одного сигнала относительно другого. Экспериментальные данные при трех положениях источника для наглядности соединены соответственно ломаными *1*, *2*, *3*. На графике (в левом верхнем углу) показана усредненная по всем сдвигам стандартная ошибка измерений. Коррелированный сигнал для широкой полосы измеряли также при трех положениях источника (см. врезку на рис. 3): полоса "заполняет" половину аппаратной функции ПП и еще участок шириной 3 мм слева от акустической оси системы (1), сдвинута вправо на 4 мм (2) и "заполняет" всю аппаратную функцию (3). На рис. 3 представлены измеренные

коррелированные акустояркостные температуры $T_{AC}(\tau)$, для наглядности соединенные ломаными, при всех трех положениях источника (*1*, *2*, *3* соответственно).

Все измеренные коррелированные сигналы (кроме кривой *3* на рис. 3) представляют собой осциллирующие функции, огибающая которых максимальна при $\tau \approx 0$ и спадает при увеличении задержки τ. Такой вид коррелированного сигнала связан с конечной полосой пропускания ПП Δf.

Временной период корреляционной функции (коррелированной акустояркостной температуры) определяется средней частотой приема и равен $T = 1/f = 0.45$ мкс. Пространственный период коррелированного сигнала (это подтверждено нами экспериментально в работах [1, 12, 13]) равен $\Lambda = \lambda z/D \approx 8$ мм, где λ – длина акустической волны в воде, соответствующая средней частоте приема f. Если сдвинуть источник по горизонтальной оси x на половину пространственного периода, то новый коррелированный сигнал должен быть в противофазе относительно старого. На рис. 2 (кривые *1*, *2* и *1*, *3*) и рис. 3 (кривые *1*, *2*) видно, что результаты измерений удовлетворяют данному условию. Заметим, что пара пластин (см. врезку на рис. 2) сдвинута из положения *2* в *3* на 8 мм (полный период), кривые *2* и *3* (рис. 2) изменяются синфазно.

На рис. 3 представлен коррелированный сигнал (кривая *3*), измеренный, когда широкая полоса, температура которой постоянна, "закрывала" всю аппаратную функцию приемной системы. Заметим, что теоретические оценки для такого случая, представленные в работах [8, 12, 13], показывают, что сигнал должен быть нулевым, а экспериментально нулевой коррелированный сигнал для широкой полосы при $\tau = 0$ получен нами в работах [12, 13]. Экспериментальные данные подтверждают теоретические оценки – кривая *3* (рис. 3) осциллирует около нуля в пределах погрешности измерений.

Сигнал ТАИ зависит от поглощения ультразвука в среде и от температуры среды. Акустояркостная температура T_A определяется для среды, температура T и энергетический коэффициент поглощения γ в которой зависят только от глубины z, по формуле, предложенной в работе [17] и экспериментально проверенной в работе [18]:

$$T_A = \int_0^\infty \gamma(z)T(z)\exp\left[-\int_0^z \gamma(z)dz\right]dz. \qquad (1)$$

В экспериментальной установке аквариум моделирует безграничную слабо поглощающую среду, температура T_0 которой постоянна и совпадает с температурой приемников ТАИ. Акустояркостная температура T_A в этом случае равна

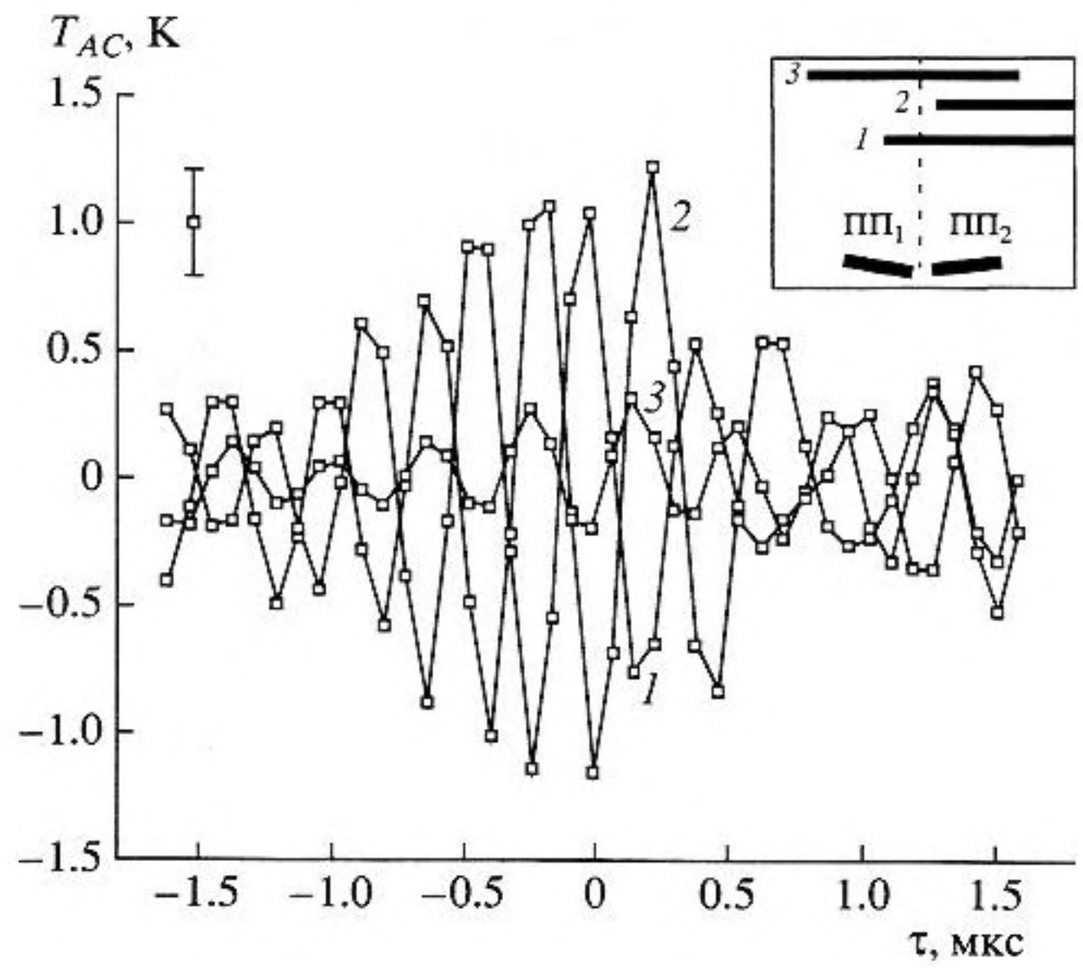

Рис. 3. Измеренные коррелированные акустояркостные температуры T_{AC} широкой полосы в зависимости от временного сдвига τ одного сигнала относительно другого. Врезка: геометрия эксперимента (положениям полосы на врезке соответствуют экспериментальные кривые).

термодинамической $T_A = T_0$, а коррелированный сигнал равен нулю. Нагретая относительно аквариума на температуру ΔT кювета создает неоднородность температуры. При этом, если в кювету не помещать пластилин, из-за малого поглощения ультразвука в водном объеме ограниченной толщины сигнал ТАИ из кюветы будет практически незаметен $T_A \approx T_0$. Если поместить в кювету пластилиновые полосы (акустические черные тела), то интегрирование выражения (1) по глубине в пластилине даст следующий результат:

$$T_A = T_0 + K\Delta T, \qquad (2)$$

где коэффициент $K = 1$, если широкая полоса занимает всю апертуру приемной системы. Если полоса не занимает всей апертуры, то энергетический коэффициент поглощения γ зависит не только от глубины z, но и от поперечной координаты x. В этом случае формула (2) также справедлива [10], а коэффициент K равен отношению углового размера θ полосы к угловому размеру Ω аппаратной функции ПП: $K = \theta/\Omega$. Таким образом, использование в эксперименте акустических черных тел упрощает учет поглощения ТАИ.

Расчет коррелированной акустояркостной температуры пластины, ограниченной по оси x координатами x_1 и x_2 ($d = x_2 - x_1$) и безграничной по оси y, можно провести, используя результаты, полученные в работах [12, 14, 19]. Если моделировать ПП вертикальными безграничными полосами толщиной $2a$, использовать приближение Фраунгофера и считать, что полоса Δf пропускания

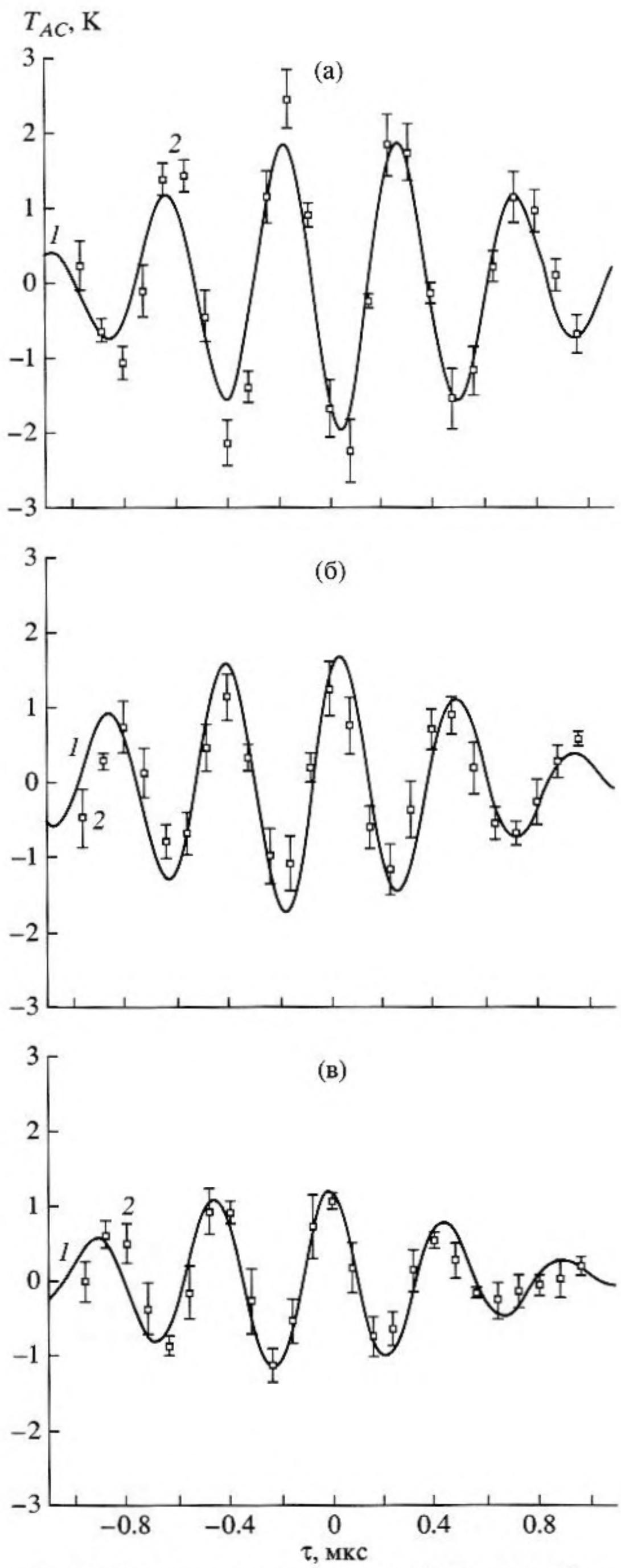

Рис. 4. Расчетные зависимости $T_{AC}(\tau)$ (кривые *1*) и экспериментальные данные (точки *2*): а) для пары симметричных относительно акустической оси пластин (разность температур между пластинами и аквариумом, принятая в расчете, составляет $\Delta T = 8$ K); б) для пары сдвинутых относительно акустической оси пластин ($\Delta T = 8$ K); в) для широкой полосы, "закрывающей" больше половины апертуры приемной системы ($\Delta T = 15$ K).

ПП прямоугольной формы и достаточно узкая ($\Delta f/f \ll 1$), то коррелированная акустояркостная температура пластины определяется формулой:

$$T_{AC}(\tau) = \Delta T \frac{2a}{\lambda} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sin^2 \frac{2\pi a x}{\lambda z} \sin^2 \frac{\pi \Delta f}{f}\left(\frac{Dx}{\lambda z} - f\tau\right)}{\left(\frac{2\pi a x}{\lambda z}\right)^2 \left[\frac{\pi \Delta f}{f}\left(\frac{Dx}{\lambda z} - f\tau\right)\right]} \times \cos 2\pi\left(\frac{Dx}{\lambda z} - f\tau\right)\frac{dx}{z}, \quad (3)$$

где множитель $\sin^2 \frac{2\pi a x}{\lambda z} / \left(\frac{2\pi a x}{\lambda z}\right)^2$ определяется одинаковыми аппаратными функциями ПП, множитель $\sin^2 \frac{\pi \Delta f}{f}\left(\frac{Dx}{\lambda z} - f\tau\right) / \left[\frac{\pi \Delta f}{f}\left(\frac{Dx}{\lambda z} - f\tau\right)\right]^2$ – одинаковыми конечными полосами пропускания ПП, а множитель $\cos 2\pi\left(\frac{Dx}{\lambda z} - f\tau\right)$ определяет осциллирующий характер коррелированного сигнала. Присутствие в формуле (3) разности температур ΔT источника и окружающей среды связано с тем, что ненулевой коррелированный сигнал возникает только при наличии вариации температуры в пространстве.

Покажем, что формула (3) справедлива для некогерентного приема при $D = 0$ и $\tau = 0$. Если ширина d источника больше поперечного размера аппаратной функции ПП ($\theta = d/z > \Omega = \lambda/2a$), то акустояркостная температура (а точнее, инкремент акустояркостной температуры, т.е. разность акустояркостных температур источника и аквариума) равна термодинамической $\Delta T_A = \Delta T$. Для источника, расположенного на акустической оси системы, из формулы (3) следует, что его акустояркостная температура определяется тем, как он заполняет апертуру: $\Delta T_A = 2ad/\lambda z \Delta T = \theta/\Omega \Delta T$. И тот, и другой результат согласуются с приведенными выше рассуждениями.

На рис. 4 представлены рассчитанные путем численного интегрирования выражения (3) коррелированные акустояркостные температуры T_{AC} (кривые *1*) как функции времени задержки τ для трех случаев, показанных на врезке к рис. 2, позиции *1* и *2* (рис. 4а и 4б соответственно), и на врезке к рис. 3, позиция *1* (рис. 4в). Там же повторены (кривые *2*) соответствующие экспериментальные данные. Отметим, что в расчетах мы использовали значение разности температур между кюветой и аквариумом ΔT как подгоночный параметр. Это связано с тем, что схема измерений не позволяла в течение длительного времени точно поддерживать постоянной величину ΔT (медленный теплообмен между кюветой и аквариумом

происходил через закрытые тонкой лавсановой пленкой окна кюветы).

На рис. 4а (рис. 4б) видно, что минимум (максимум) корреляционной функции сдвинут вправо на $\Delta\tau \approx 0.05$ мкс относительно $\tau = 0$, где он должен находиться, исходя из геометрии эксперимента (см. врезку к рис. 2, позиция *1* (*2*)). По-видимому, это связано со сдвигом Δz ПП по оси z (см. рис. 1). Учтенная в расчетах величина сдвига $\Delta z \approx 0.1$ мм связана с погрешностью установки ПП в аквариуме.

Анализируя вид коррелированной акустояркостной температуры $T_{AC}(\tau)$ (рис. 4в) для широкой полосы, "заполняющей" приблизительно половину аппаратной функции ПП (см. врезку к рис. 3), отметим, что согласно выражению (3) сдвиг по координате x аналогичен временному сдвигу τ. Если при $\tau = 0$ полоса "заполняет" всю аппаратную функцию ПП или ровно половину аппаратной функции, то коррелированный сигнал равен нулю (это следует из четности подынтегрального выражения (3)). Сдвиг полосы по оси x, например, на 3 мм приводит к появлению ненулевой корреляционной составляющей, определяемой тонкой полоской шириной 3 мм. Дальнейший сдвиг приводит к затухающей осцилляции коррелированного сигнала. Аналогичная ситуация возникает и при временном сдвиге. Рассчитанная из выражения (3) функция $T_{AC}(\tau)$ имеет положительное значение при $\tau = 0$. Это объясняется тем, что полоса "заполняет" половину аппаратной функции ПП "плюс" 3 мм.

Отметим, что аналогичный результат можно получить, используя представление о приемной системе как о фильтре пространственных частот с собственной пространственной частотой $D/\lambda z$ [19]. Пространственный спектр широкой полосы (ступеньки) является белым шумом, из которого фильтр выделяет соответствующую полосу частот.

Как видно из рис. 4а, 4б, 4в, расчетные кривые достаточно хорошо, при заданном выборе ΔT, аппроксимируют экспериментальные точки.

Таким образом, мы экспериментально получили ненулевые коррелированные сигналы от источников ТАИ, характерные поперечные размеры которых значительно меняются. Это необходимый первый шаг в направлении более полного исследования прямой задачи пассивной акустической термотомографии с помощью корреляционного приема ТАИ. Заметим, что мы экспериментально показали возможность различать источники ТАИ только в плоскости, перпендикулярной акустической оси системы. Дальнейшие исследования должны учесть протяженность источников в глубину и поглощение акустических волн в среде.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-02-17371).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пасечник В.И., Аносов А.А., Бограчев К.М.* Основы и перспективы пассивной термоакустической томографии // Биомедицинская радиоэлектроника. 1999. № 2. С. 3–26.
2. *Passechnik V.I., Anosov A.A., Isrefilov M.G., Erofeev A.V.* Experimental reconstruction of temperature distribution at a depth through thermal acoustic radiation // Ultrasonics. 1999. V. 37. P. 63–66.
3. *Кротов Е.В., Ксенофонтов С.Ю., Мансфельд А.Д., Рейман А.М., Санин А.Г., Прудников М.Б.* Экспериментальные исследования возможностей многоканальной акустической термотомографии // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1999. Т. XLII. № 5. С. 479–484.
4. *Аносов А.А., В.И. Пасечник, К.М. Бограчев* Пассивная термоакустическая томография кисти руки человека // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 6. С. 725–730.
5. *Kruger R.A., Reinecke D.R., Kruger G.A.* Thermoacoustic computed tomography-technical consideration // Med. Phys. 1999. V. 26. P. 1832–1837.
6. *Hessemer R., Perper T., Bowen T.* Correlation thermography // United States patent 4,416,552, Nov. 22, 1983.
7. *Пасечник В.И.* Пассивный термоакустический томограф, не использующий априорную информацию о коэффициенте поглощения // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 4. С. 563–565.
8. *Буров В.А., Дариалашвили П.И., Румянцева О.Д.* Активно-пассивная термоакустическая томография // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 4. С. 474–484.
9. *Герасимов В.В., Гуляев Ю.В.,Миргородский А.В., Миргородский В.И., Пешин С.В.* Пространственное разрешение пассивной локации на основе корреляционной обработки 4-го порядка // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 4 С. 487–493.
10. *Аносов А.А., Пасечник В.И., Шаблинский В.В.* Пространственная разрешающая способность акустотермографии и СВЧ-радиометрии // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 4. С. 610–616.
11. *Кротов Е.В., Мансфельд А.Д., Рейман А.М., Вилков В.А.* Двумерная акустическая термотомография биологических объектов // Акустика речи. Медицинская и биологическая акустика. Сборник трудов XI сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2001. Т. 3. С. 165–169.
12. *Аносов А.А., Антонов М.А., Пасечник В.И.* Измерение корреляционных свойств теплового акустического излучения // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 1. С. 28–34.
13. *Аносов А.А., Пасечник В.И.* Корреляция сигналов теплового акустического излучения // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 2. С. 161–166.
14. *Пасечник В.И., Аносов А.А., Барабаненков Ю.Н., Сельский А.Г.* Измерение пространственно-временной корреляционной функции теплового акус-

тического излучения // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 5. С. 683–686.

15. *Passechnick V.I., Barabanenkov Yu.N.* Fluctuation theory of thermal acoustic radiation // J. Amer. Acount. Soc. 1996. V. 99. P. 65–71.
16. *Пасечник В.И.* Об аппаратной функции устройства для измерения корреляционной функции теплового акустического излучения / Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 5. С. 666–674.
17. *Бабий В.И.* Перенос акустической энергии в поглощающей и излучающей среде // Мор. гидрофиз. исслед. 1974. № 2(65). С. 189–192.
18. *Passechnik V.I.* Verification of the physical basis of acoustothermography // Ultrasonics. 1994. V. 32. P. 293–299.
19. *Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н.* Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 416 с.

Correlation Reception of Thermal Acoustic Radiation

A. A. Anosov, Yu. N. Barabanenkov, and A. G. Sel'skii

Correlated signals of thermal acoustic radiation from heated sources extending in the transverse direction (a pair of narrow plasticine plates and a wide plasticine strip) are measured. The measurements are performed by multiplying together the signals that are shifted in time with respect to each other and detected by two piezoelectric transducers. The values of the correlated signals of thermal acoustic radiation are determined by the spatial variation of temperature in the medium under study.