

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТОТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

А.А. Аносов^{1,2}, А.С. Казанский¹, А.Д. Мансфельд³, А.С. Шаракшанэ⁴

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

² Московская медицинская академия им. И.М.Сеченова

³ Институт прикладной физики РАН

⁴ Институт биохимической физики РАН

E-mail: anosov@hotmail.ru

Динамическое картирование внутренней температуры модельных пластилиновых объектов проведено в процессе их нагрева-охлаждения методом акустотермографии. В эксперименте использовали плоскую решетку из 14 акустотермометров. По результатам измерений получали меняющиеся во времени карты акустояркой температуры и восстанавливали динамику изменения параметров температурного распределения: координат центра и размера нагретой области, а также ее температуры. Время усреднения составляло 10 с. При этом погрешность в определении положения центра и размера области составляла около 1 мм, точность расчета температуры – приблизительно 1 градус. Полученные результаты могут оказаться полезными для контроля температуры при проведении медицинских процедур, связанных с нагревом внутренних тканей организма человека.

При нагреве внутренних тканей организма человека (например, при гипертермии или термооблации) желателен постоянный контроль температуры. В ряде случаев [1] для такого контроля можно использовать акустотермографию – метод измерения теплового акустического излучения объекта [2]. Расчеты [3-4] и модельные эксперименты [5-7] показывают, что предлагаемый метод позволяет измерить температуру на глубине до 8 см, в объеме около 1 см³ с точностью 0.5-1 К за время порядка одной минуты. Для восстановления пространственного распределения глубинной температуры объекта мы предлагаем использовать набор неподвижных акустотермометрических датчиков, расположенных в одной плоскости. В этом случае результаты измерений позволяют получить карту (двумерное распределение) акустояркой температуры с одной стороны объекта, а затем восстановить распределение внутренней температуры.

Для измерений теплового акустического излучения был использован многоканальный акустотермограф, разработанный в ИПФ РАН (полоса пропускания 1.2-2.7 МГц, пороговая чувствительность при времени интегрирования 10 с – 0,2 К). Датчики акустотермографа были расположены в аквариуме размером 40x60x20 см³, заполненном водой. Использовали плоскую двумерную приемную антенну (рис. 1), состоящую из 14 акустотермометров (диаметр пьезопреобразователей 8 мм, расстояние между центрами соседних датчиков 10 мм).

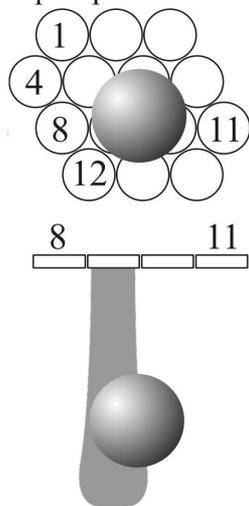


Рис. 1. Схема эксперимента – фронтальная проекция и вид сверху. Цифрами показаны номера датчиков, серым цветом – их диаграммы направленности. Нагретая область изображена в виде шара.

Принимаемые акустические сигналы преобразовывались в электрические, которые усиливались, проходили через квадратичный детектор на компьютер, где усреднялись в течение 10 с. В качестве источников теплового акустического излучения использовали пластилиновые тела различной формы. Внутри пластилина находились электрические сопротивления, которые (при подаче напряжения) нагревали пластилин на 10 – 20 градусов относительно воды в аквариуме. Температуру пластилиновых тел и воды контролировали электронными термометрами с точностью до 0.3 К.

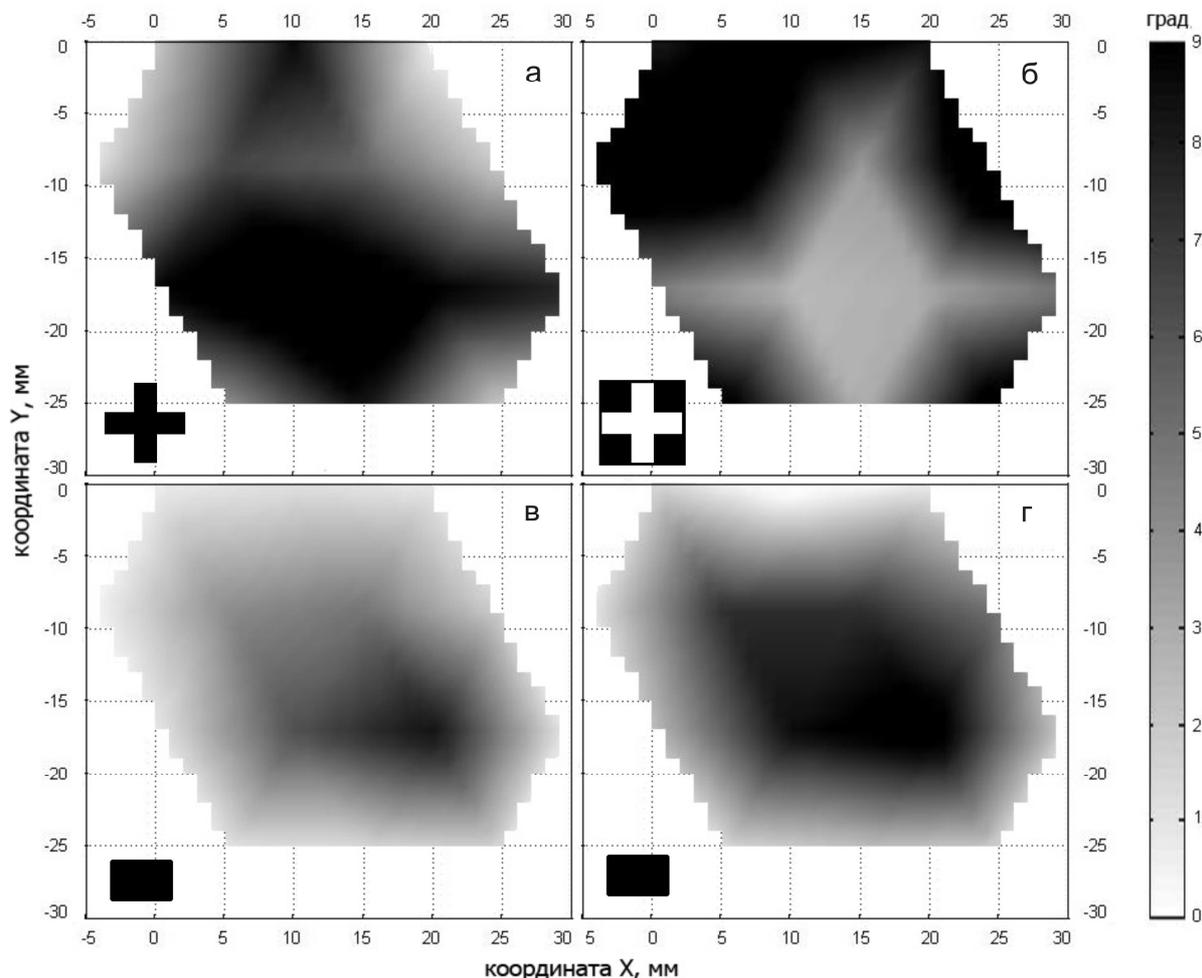


Рис. 2. Карты акустояростной температуры

В акустотермографии измеряемой величиной является квадрат давления теплового акустического излучения, значение которого пропорционально температуре объекта. С помощью акустического черного тела (пластилина) измеряемый сигнал калибруется в градусах и получается так называемая акустояростная температура. С учетом диаграммы направленности датчиков акустояростную температуру T_A можно рассчитать по формуле [8]:

$$T_A = \int_0^{\infty} dz \gamma(x, y, z) T(x, y, z) \exp \left[- \int_0^z \gamma(x, y, z) dz \right] \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(x, y, z) dx dy \quad (1)$$

где $T(x, y, z)$ и $\gamma(x, y, z)$ – распределения в пространстве температуры и коэффициента поглощения (по интенсивности) ультразвука, $A(x, y, z)$ - диаграмма направленности датчика, ось z совпадает с акустической осью приемника. Ноль температуры соответствует температуре воды в аквариуме. Используемый в эксперименте приемник является широкополосным (полоса пропускания относительно средней частоты приема составляет 77%). Поэтому в качестве диаграммы направленности датчика мы использовали функцию Гаусса. Эксперименты

показали – поперечный размер диаграммы направленности составляет $d=1.8\pm 0.2$ мм (при $z = 44$ мм) и увеличивается пропорционально z .

Варианты карт акустояркостной температуры, полученных с помощью приемной антенны из 14 датчиков, показаны на рис. 2. На рис. 2а и 2б представлены изображения нагретого пластилинового креста (а) и отверстия в виде креста в нагретом пластилине (б). Эскизы нагретых объектов помещены в левый нижний угол каждого рисунка. В этих экспериментах температура пластилина была на 13 градусов выше температуры воды. Ширина горизонтальной и вертикальной частей креста (и отверстия) составляла 8 мм. Расстояние от объекта до приемной антенны равнялось 44 мм. Точка с координатами 0, 0 соответствует центру датчика 1 на рис. 1. Изображения получены путем интерполяции по трем точкам (по треугольникам) с помощью кусочно-линейной функции и достаточно хорошо передают форму нагретого объекта. Возникающие искажения связаны с тем, что характерный размер объекта (8 мм) меньше шага дискретизации (расстояния между датчиками) – 10 мм.

По карте акустояркостной температуры можно восстановить двумерное распределение термодинамической температуры объекта. В качестве модели мы использовали пластилиновый прямоугольный параллелепипед размером $16 \times 16 \times 23$ мм³. К датчикам он был повернут гранью 16×23 мм². Расстояние до приемной антенны равнялось 70 мм. Эксперимент длился 125 с, прогрев начинался на 50-ой секунде. Изображения объекта на 85 и 115 с показаны на рис. 2в и 2г. На рисунках видна разогревающаяся область с разными размерами по горизонтали и вертикали. На рис. 3а представлены акустояркостные температуры всех 14 датчиков. Из рисунка видно, что изменения сигналов определяются сценарием эксперимента: после включения нагрева сигналы увеличиваются у датчиков 5, 6, 9, 10 (см. рис. 1), расположенных напротив нагретого объекта.

При восстановлении распределения температуры объекта мы предположили, что оно имеет форму гауссиана:

$$T(x, y) = T_0 \exp \left[-\frac{(x-x_0)^2}{2D_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2D_y^2} \right], \quad (2)$$

где T_0 – максимальная температура, x_0 и y_0 – координаты центра, D_x и D_y – характерные размеры нагретой области в горизонтальном и вертикальном направлениях. Таким образом, речь идет о восстановлении 5 параметров. Расчеты показали, что при одновременном восстановлении всех параметров возникают неприемлемые погрешности. Поэтому мы действовали постепенно. Сначала мы определили координаты центра нагретой области, которые совпадают с координатами центра распределения акустояркостной температуры. Экспериментальные данные были аппроксимированы эллиптическим параболоидом $T_A(x, y) = a(x-x_0)^2 + b(y-y_0)^2 + c$, где a , b и c – некоторые коэффициенты. Координаты центра были рассчитаны методом наименьших квадратов. Вторым шагом было определение остальных трех параметров распределения: максимальной температуры и размеров нагретой области. Если распределение температуры задано гауссианом (2), то с учетом выражения (1) расчетное значение акустояркостной температуры $T_A(i)$ на i -ом датчике будет равно:

$$T_A(i) = T_0 \frac{D_x D_y}{\sqrt{(D_x^2 + d^2)(D_y^2 + d^2)}} \exp \left[-\frac{(x_i - x_0)^2}{2(D_x^2 + d^2)} - \frac{(y_i - y_0)^2}{2(D_y^2 + d^2)} \right], \quad (3)$$

где x_i и y_i – координаты центра датчика, $d=2.7$ мм (при $z=70$ мм). Параметры T_0 , D_x и D_y рассчитывали путем минимизации функционала:

$$\sum_{i=1}^{14} [T_A(i) - T_{AEXP}(i)]^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $T_{AEXP}(i)$ – измеренная i -ым датчиком акустояркостная температура. Результаты восстановления показаны на рис. 3б-г. На рис. 3б показаны восстановленные координаты центра области: $x_0=13.2\pm 0.8$ мм и $y_0=-12.3\pm 0.2$ мм. Восстановленный центр лежит внутри ромба с вершинами в центрах датчиков 5, 6, 9, 10 (см. рис. 1). При этом два крайних левых положения

(которые и увеличивают разброс по x) получены в начале нагрева, когда измеренная акустоаркостная температура была еще недостаточно велика.

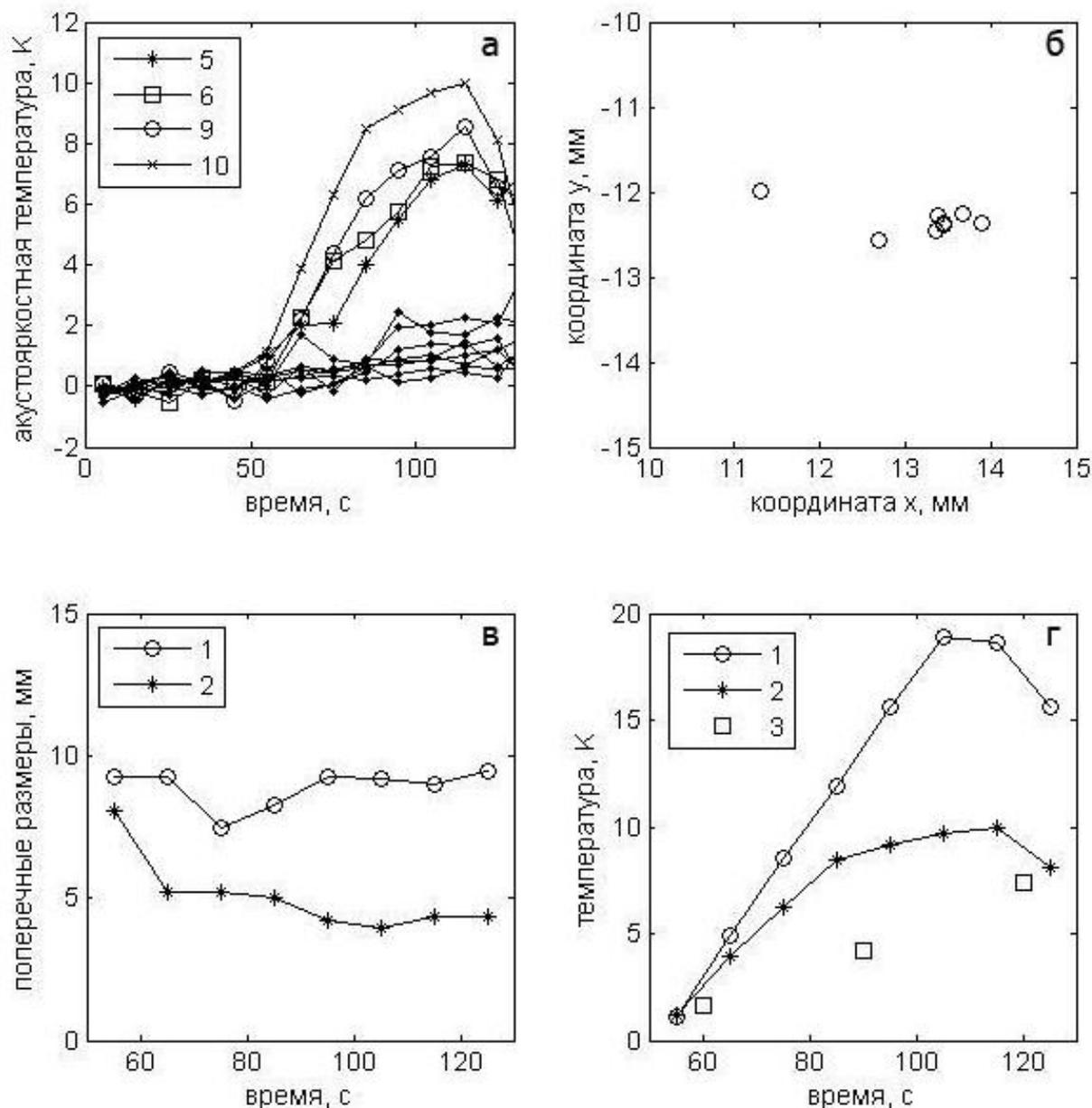


Рис. 3. Восстановление параметров температурного распределения.

На рис. 3в показаны восстановленные горизонтальный (1) и вертикальный (2) размеры нагретой области. Горизонтальный размер больше (как и есть на самом деле) и составляет $D_x=8.9\pm 0.7$ мм, вертикальный размер (если исключить первую точку на 55 с) составляет $D_y=4.6\pm 0.5$ мм. Из этих результатов можно получить размеры нагретой области по горизонтали и вертикали, при которых максимальная температура уменьшается вдвое: 21 мм и 12 мм, соответственно. Для сравнения – размеры пластилинового объекта 23 и 16 мм. На рис. 3г показана восстановленная максимальная температура объекта (1) и для сравнения акустоаркостная температура близлежащего десятого датчика (2), а также температура объекта (3), измеренная электронным термометром. Из рисунка видно, что динамика изменений восстановленной температуры соответствует изменению акустоаркостной температуры и изменению измеренной термометром температуры. При этом восстановленное значение выше. Для акустоаркостной температуры так и должно быть в соответствии с формулой (3).

Измеренное термометром значение может быть меньше максимальной восстановленной температуры, т.к. он располагался достаточно близко к поверхности пластины. Таким образом, полученное значение T_0 является некоторой усреднённой величиной. Поэтому оценка точности восстановления максимальной температуры требует дальнейших исследований. Завершая обсуждение результатов, полученных с помощью одной двумерной решетки, отметим, что восстановление проведено на основе данных, усредненных всего лишь за 10 с.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы. Использование антенной решетки позволило получить карту распределения акустояростной температуры объекта, что, в свою очередь, дало возможность выделить расположенные в глубине объекта нагретые зоны. Это может быть использовано в медицине для диагностики воспалительных или онкологических процессов. Проведенные измерения показали, что в ряде случаев для восстановления достаточно всего 10 с, что позволяет осуществлять динамическое картирование внутренней температуры объекта в режиме реального времени. Заметим, что 10 с – это незначительный промежуток времени при проведении целого ряда терапевтических процедур, связанных с нагревом. Полученные результаты восстановления положения центра источника и его характерного размера (ошибки не превышают 1 мм) следует признать приемлемыми для контроля температуры при проведении медицинских процедур, связанных с нагревом внутренних тканей организма человека. Достаточно хорошо восстанавливается эффективная (усредненная) температура объекта (ошибка около 1 градуса).

Работа поддержана РФФИ (грант № 08-02-00240).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аносов А.А., Сергеева Т.В., Алехин А.И., Беляев Р.В., Вилков В.А., Иванникова О.Н., Казанский А.С., Кузнецова О.С., Лесс Ю.А., Мансфельд А.Д., Санин А.Г., Шаракшанэ А.С., Луковкин А.В.* Акустотермометрическое сопровождение лазериндуцированной интерстициальной гипертермии молочной и щитовидной желез // Биомедицинская радиоэлектроника, 2008, №5, С.67-72
2. *Гуляев Ю.В., Годик Э.Э., Дементюченко В.В., Пасечник В.И., Рубцов А.А.* О возможностях акустотермографии биологических объектов // Докл. АН СССР. 1985. Т.283. №6. С.1495-1499.
3. *Аносов А.А., Гаврилов Л.Р.* Восстановление распределения глубинной температуры биообъектов с помощью линейных фазированных решеток // Акуст. журн. Т.51. 2005. №4. С.447-455
4. *Мансфельд А.Д.* Акустотермометрия. Состояние и перспективы. // Акуст. журн. Т.55. 2009. №4-5. С.536-547
5. *Krotov E.V., Zhadobov M.V., Reyman A.M.* Detection of thermal acoustic radiation from laser-heated deep tissue // Appl. Phys. Lett., Vol. 81, No. 21, P. 3918-3920, 2002.
6. *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.
7. *Миргородский В.И., Герасимов В.В., Пешин С.В.* Экспериментальные исследования особенностей пассивной корреляционной томографии источников некогерентного акустического излучения мегагерцового диапазона // Акуст. журн. 2006 Т.52 №5 С.606-612.
8. *Passechnik, V.I.* Verification of the Physical Basis of Acoustothermography // Ultrasonics 1994. V.32. №4. P. 293-299