

Расчет аппаратной функции широкополосного акустотермометрического датчика

А. А. Аносов^{1,*}, А. А. Шаракшанэ^{1,†}, А. Д. Мансфельд^{2,‡}, А. Г. Санин^{2,§}

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

Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7

²Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики РАН»

Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

(Статья поступила 28.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

Рассчитана аппаратная функция широкополосного (1.6–2.5 МГц) датчика, используемого в акустотермометрии. Экспериментальная проверка показала согласование измеренных и расчетных результатов. Проведены исследования влияния характеристик полосы пропускания и размера датчика на аппаратную функцию приемника, а также влияния аппаратной функции на измеряемый датчиком акустотермометрический сигнал. Показано, что при типичных в акустотермометрии расстояниях между датчиком и исследуемым объектом основным параметром, определяющим акустотермометрический сигнал, является отношение длины волны (для средней частоты приема) к диаметру датчика. Для задач локализации нагретой области приемник оптимально устанавливать на расстоянии 15–25 мм от нагретой области. Например, в этой зоне для датчика диаметром 8 мм ширина аппаратной функции составляет 1.2 ± 0.1 мм по уровню 0.5 от максимального.

PACS: 43.60.+d

УДК: 534.7

Ключевые слова: тепловое акустическое излучение, аппаратная функция, полоса пропускания, акустостеркая температура.

ВВЕДЕНИЕ

В задачах ранней диагностики и мониторинга нагрева участков тела человека желательнее использовать неинвазивные способы измерения распределения глубинной температуры. Для этих целей можно использовать пассивную акустическую термометрию, основанную на регистрации собственного теплового акустического излучения организма человека в мегагерцовом диапазоне [1, 2]. При восстановлении распределения глубинной температуры важно знать зону чувствительности или аппаратную функцию (АФ) датчика. В работе рассчитана аппаратная функция широкополосного акустотермометрического датчика и проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для измерений теплового акустического излучения был использован многоканальный акустотермограф [3], разработанный в ИПФ РАН (полоса пропускания 1.6–2.5 МГц, пороговая чувствительность при времени интегрирования 10 с — 0.2 К). Датчики акустотермографа были расположены в аквариуме размером $400 \times 600 \times 200$ мм³, заполненном водой. Использовали плоскую двумерную приемную решетку, состоящую из 14 датчиков (диаметр пьезопреобразователей 8 мм, расстояние между центрами соседних датчиков

10 мм). В качестве теплового источника использовались нагретые пластилиновые цилиндры (диаметром 4 и 9 мм), вытянутые в вертикальном направлении. Размер цилиндра в вертикальном направлении составлял 150 мм и существенно превышал вертикальный размер решетки, составлявший 36 мм. Цилиндры перемещались перпендикулярно осям датчиков. Расстояние между нагретым объектом и решеткой датчиков составляло 44 или 89 мм. Принимаемые акустические сигналы преобразовывались в электрические, которые усиливались, проходили через квадратичный детектор и усреднялись в течение 30 мс. С выходов многоканального акустотермографа сигналы подавались на 14-ти разрядный многоканальный АЦП Е14-140 с частотой дискретизации 1 кГц на один канал. Разработанная программа проводила дальнейшее усреднение данных.

2. РАСЧЕТ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ

При расчете аппаратной функции датчик рассматривается как диск радиуса a , расположенный в плоскости xy (рис. 1). Точечный источник S находится в плоскости xz , на заданном удалении по оси z и на расстоянии r от оси z . Источник S испускает сферическую гармоническую волну единичной амплитуды, которая приходит к элементарному приемнику площадью $d\Omega$ с центром в точке Q , являющемуся частью диска с полярными координатами ρ и θ . Тогда квадрат амплитуды $A_\omega(S)^2$ гармонической волны циклической частоты ω , регистрируемой всем диском, можно

*E-mail: anosov@hotmail.ru

†E-mail: sharakshane@yandex.ru

‡E-mail: mansfeld@appl.sci-nnov.ru

§E-mail: agsanin@mail.ru

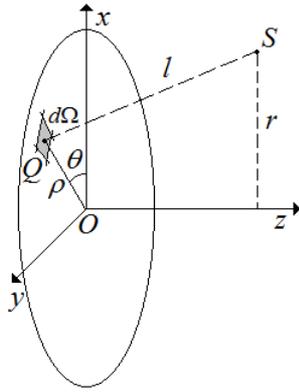


Рис. 1: Конфигурация, используемая для расчета аппаратной функции датчика: S — источник, находящийся на расстоянии r от оси z, Q — центр элементарного приемника площадью dΩ, l — расстояние между Q и S

определить по формуле

$$A_{\omega}(S)^2 = \left\{ \sum \frac{\cos[\varphi(Q, S)]}{l(Q, S)} d\Omega \right\}^2 + \left\{ \sum \frac{\sin[\varphi(Q, S)]}{l(Q, S)} d\Omega \right\}^2,$$

где γ — коэффициент поглощения ультразвука по интенсивности, AF — аппаратная функция датчика, с центром в точке $(x_0, y_0, 0)$, $\Delta T_A = T_A - T_0$, $\Delta T = T - T_0$, T_0 — температура окружающей среды, в нашем случае — температура аквариума. Отметим, что коэффициент поглощения зависит от частоты, и в формуле (1) следовало бы провести интегрирование и по частоте с учетом характеристик полосы пропускания датчика. Для упрощения в выражении (1) использован эффективный (усредненный) коэффициент поглощения. В качестве АФ можно рассматривать произведение функции AF , коэффициента поглощения и экспоненциального множителя в подынтегральном выражении интеграла (1), но в этой работе аппаратной функцией будем считать только функцию AF . Для АФ действует правило нормировки:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} AF(x-x_0, y-y_0, z) dx dy = 1. \quad (2)$$

В эксперименте в качестве источника теплового излучения использовался нагретый пластилиновый ци-

линдр, помещенный в воду. В пластилине сильное поглощение, в воде — слабое: на частоте 2 МГц при температуре, близкой к комнатной, коэффициенты поглощения различаются приблизительно на три порядка. Поэтому мы считали, что нагретое черное тело находится в непоглощающей среде, и тепловой сигнал идет с поверхности цилиндра.

$$2\pi \int_{-\infty}^{\infty} A_{\omega}(z, r)^2 r dr = 1$$

для любого z. При расчете широкополосной аппаратной функции датчика $AF(z, r)$ монохроматические компоненты интегрируются по частоте с учетом полосы пропускания [4].

3. РАСЧЕТ АКУСТОЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Измеряемый акустотермометром сигнал — инкремент ΔT_A акустояркостной температуры T_A — связан с инкрементом ΔT термодинамической температуры T выражением:

$$\Delta T_A(x_0, y_0) = \int_0^{\infty} dz \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} AF(x-x_0, y-y_0, z) \gamma(x, y, z) \exp\left[-\int_0^z \gamma(x, y, \xi) d\xi\right] \times \Delta T(x, y, z) dx dy, \quad (1)$$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измеренная методом переменной акустической нагрузки [5] полоса пропускания акустотермометрического датчика имела два максимума.

При измерениях температуры человека акустотермометрический датчик контактирует с телом через иммерсионную жидкость [6] и, таким образом, находится на некотором расстоянии от поверхности, обычно, не ближе, чем 10 мм. Характерное поглощение в мягких тканях организма составляет 0.25 см^{-1} . Т.е. сигнал снижается на порядок на глубине около 100 мм.

Эти величины определили диапазон расстояний между приемником и источником, в котором проводилось исследование АФ датчика.

Расчитанная АФ широкополосного датчика показана на рис. 2. Из-за широкополосности датчика волновые эффекты сглажены: АФ монотонно убывает от оси датчика, начиная уже с расстояния $z = 15$ мм. На этом расстоянии параметр Френеля $z\lambda/a^2$ меняется от 0.56 (для частоты 2.5 МГц) до 0.88 (1.6 МГц). Наиболее узкой в поперечном направлении (1.2 ± 0.1 мм по уровню 0.5 от максимального) АФ получается в диапазоне расстояний z от 15 до 25 мм. Это оптимальное расстояние между приемником и нагретой областью в теле человека, если ставится задача ее локализации.

В целом результаты вычисления близки к экспериментальным данным, что говорит об адекватности рассматриваемой вычислительной модели. Несмотря на то, что в эксперименте были использованы достаточно узкие цилиндры (максимальный угол, под которым были «видны» объекты, составлял $5.5^\circ \pm 0.3^\circ$, особенности аппаратной функции при расчете не играют существенной роли.

Рассмотрим влияние характеристик полосы пропускания на аппаратную функцию датчика на расстояниях $z > 15$ мм. Расчеты показывают, что изменение ширины частотного диапазона практически не влияет на поперечный размер (взятый по уровню 0.5 от максимального) АФ. Например, на расстоянии 40 мм от приемника рассчитанный поперечный размер АФ снижается при переходе от широкополосного к монохроматическому датчику (средняя частота полосы пропускания не меняется) на 0.5%. При увеличении средней частоты АФ суживается прямо пропорционально длине волны. Например, на расстоянии 40 мм от приемника изменения рассчитанного поперечного размера АФ пропорциональны изменениям длины волны с точностью ± 0.05 мм. Незначительно влияет на вид АФ изменение формы полосы пропускания (при неизменной ширине и средней частоте). Например, на расстоянии 40 мм от приемника изменение поперечного размера рассчитанной АФ для прямоугольной и для измеренной полос пропускания не превышает 0.1 мм.

Аппаратная функция датчика определяется не только полосой пропускания, но и диаметром приемника. Расчеты для датчиков разного диаметра показали, что практически линейное расширение поперечного размера АФ (см. кривую на рис. 2) начинается с координаты z , соответствующей значению параметра Френеля равному единице ($z \geq a^2/\lambda$) для средней частоты полосы пропускания (для $a = 4$ мм поперечный размер расширяется линейно при $z \geq 21$ мм). Таким образом, хотя зону Фраунгофера принято определять при значении параметра Френеля много больше единицы, для широкополосного датчика это приближение (для определения поперечного размера АФ) работает уже при зна-

чении параметра Френеля просто больше единицы. Расчеты показали, что расширение поперечного размера (по уровню 0.5 от максимального) АФ определяется выражением $0.247\lambda z/a$.

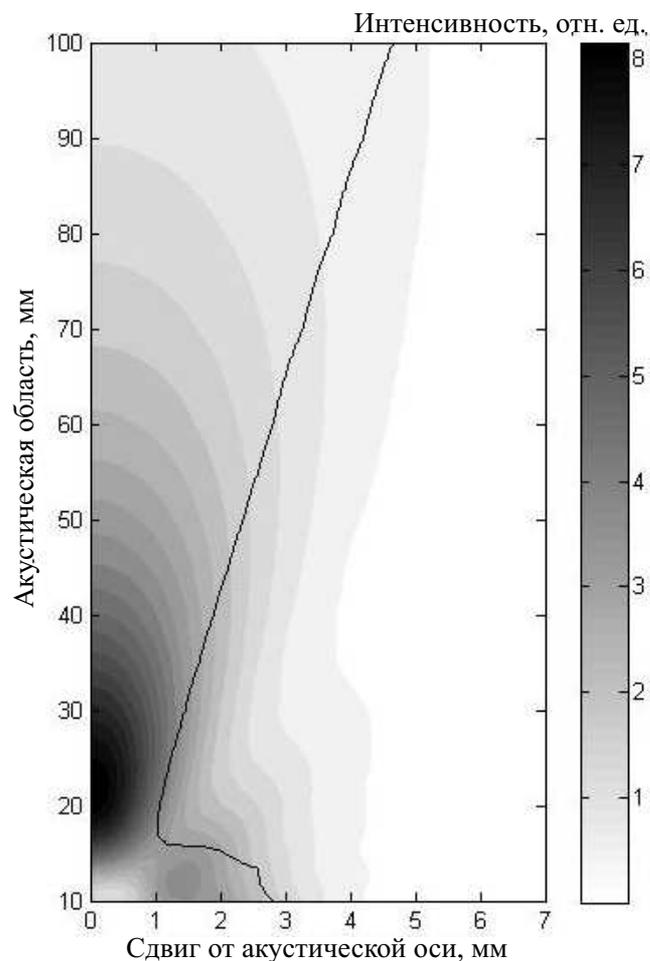


Рис. 2: Линии уровня аппаратной функции датчика. Кривая показывает ширину АФ по уровню 0.5 от максимального на данном расстоянии вдоль акустической оси. Расчет проводился для датчика диаметром 8 мм и скорости ультразвука 1500 м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При задаче локализации нагретой области приемник (диаметром 8–10 мм) оптимально установить на расстоянии 15–25 мм от нагретой области (в этой зоне аппаратная функция датчика является наиболее узкой).

Работа поддержана РФФИ (проект № 17-02-00717).

- [1] Аносов А. А., Беляев Р. В., Вилков В. А., Казанский А. С., Мансфельд А. Д., Шаракшанэ А. С. Акуст. журн. 2009. **55**, № 4–5. С. 436.
- [2] Аносов А. А., Беляев Р. В., Вилков В. А., Дворникова М. В., Дворникова В. В., Казанский А. С., Курятникова Н. А., Мансфельд А. Д. Акуст. журн. 2012. **58**, № 5. С. 592.
- [3] Мансфельд А. Д. Акуст. журн. 2009. **55**, № 4–5. С. 536.
- [4] Аносов А. А., Шаракшанэ А. А., Казанский А. С., Мансфельд А. Д., Санин А. Г., Шаракшанэ А. С. Акуст. журн. 2016. **62**, № 5. С. 616.
- [5] Санин А. Г., Рейман А. М., Чичагов П. К. Ультразвуковая диагностика. Горький: ИПФ АН СССР, 1983. С. 21.
- [6] 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. и др. Биомедицинская радиоэлектроника. 2008. № 5. С. 67.

Calculation of the instrument function of a broadband acoustic thermometric detector

A. A. Anosov^{1,a}, A. A. Sharakshane^{1,b}, A. D. Mansfeld^{2,c}, A. G. Sanin^{2,d}

¹Kotel'nikov Institute of Radio-engineering and Electronics (IRE) RAS. Moscow 125009, Russia

²Federal Research Center The Institute of Applied Physics RAS. Nizhny Novgorod, 603950, Russia

E-mail: ^aanosov@hotmail.ru, ^bsharakshane@yandex.ru, ^cmansfeld@appl.sci-nnov.ru, ^dagsanin@mail.ru

The instrument function of a broadband (1.6–2.5 MHz) detector that is used in acoustic thermometry has been calculated. Experimental check shown that measured and computed results are in agreement. The effect of the pass band characteristics and the detector's size on the instrument function has been studied as well as the effect that the instrument function has on an acoustic thermometric signal that is measured by the detector. The ratio of the wavelength (for the mean reception frequency) to the detector's radius has been shown to be the main parameter that determines the acoustic thermometric signal at distances that are typical of acoustic thermometry. For problems of localizing a heated region, it is optimal to locate the receiver at a distance of 15–25 mm from the region. For example, for a detector 8 mm in diameter, the width of the instrument function at a level of 0.5 of the maximum is 1.2 ± 0.1 mm in this zone.

PACS: 43.60.+d

Keywords: thermal acoustic radiation, instrument function, pass band, acoustobrightness temperature.

Received 28 June 2017.

Сведения об авторах

1. Аносов Андрей Анатольевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (499) 367-18-72, e-mail: anosov@hotmail.ru.
2. Шаракшанэ Александр Абович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 624-52-85, e-mail: sharakshane@yandex.ru.
3. Мансфельд Анатолий Дмитриевич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (831) 436-56-60, e-mail: mansfeld@appl.sci-nnov.ru.
4. Санин Анатолий Геннадьевич — ст. науч. сотрудник, тел.: (831) 436-56-60, e-mail: agsanin@mail.ru.