

УДК 534.6

С.А. Найда, канд. техн. наук, Е.С. Дрозденко

Теоретическое обоснование фокусируемого одночастотного динамического акустотермометра

Предложена схема фокусируемого акустотермометра в сочетании с электронной коммутацией пьезоприемника и шумовым эталоном. Это позволяет не только обойтись односпектральным и однолучевым зондированием, но и измерять глубинную температуру тела человека в реальном масштабе времени.

The chart of acoustic device is offered with focusing for measuring of temperature in combination with electronic commutation of piezoelectric receiver and noise standard. It allows not only to treat one spectral and one radial sounding, but also measure the deep temperature of man's body in a real-time.

Введение

Возможность получения пространственного распределения температуры в глубине биологического объекта, в том числе и человека, по его тепловому акустическому излучению явилось стимулом для исследований нового направления в термографии [1]. В качестве методов измерения рассматривались мультиспектральное [2] и многолучевое [3] зондирование с помощью плоских пьезоприемников (ПП). Практическое осуществление акустотермометра даже в простейшем случае измерения температуры поверхности тела натолкнулось на проблему получения предельной (флуктуационной) чувствительности - минимальной регистрируемой разности температур, которая для биологических объектов требуется не больше 1°С (0,3 % от абсолютной температуры человека). Условия получения требуемой чувствительности подробно анализировались в работах [4-6]. Были получены все соотношения, необходимые для выбора схемы акустотермометра, предложен фокусируемый акустотермометр в сочетании с электронной коммутацией ПП и шумовым эталоном, что позволяет не только обойтись односпектральным и однолучевым зондированием, но и измерять температуру в реальном масштабе времени. В статье такой акустотермометр рассчитан и осуществлён на основе плоского ПП и двояковогнутой эллиптической линзы.

Расчетные соотношения метода акустотермографии

Функциональная схема акустотермометра состоит из: фокусирующего ПП, электронного ком-

мутатора, широкополосного усилителя электрического шума (УВЧ), линейного детектора, низкочастотного усилителя модулированной компоненты шума, синхронного детектора с ФНЧ, усилителя постоянного тока (УПТ), регистрирующего устройства - НЧ осциллографа и цифрового индикатора с параллельной выдачей цифровой информации на внешнее регистрирующее устройство.

Средний квадрат напряжения на выходе фокусирующего плоского ПП в виде диска, включая тепловой шум самого ПП и нефокусируемой части излучения, равен:

$$\overline{U_{\Sigma}^2} = \overline{U_{\text{пп}}^2} [2 + (\pi D / (2F))^2], \quad (1)$$

где:

$$\overline{U_{\text{пп}}^2} = \frac{4z_0}{\pi \cdot D^2} \left(\frac{l_0}{e_{33}}\right)^2 k_6 \cdot T \cdot \Delta f = 4R \cdot k_6 \cdot T \cdot \Delta f; \quad (2)$$

D, l_0 - диаметр и толщина диска; z_0 - удельный акустический импеданс пьезокерамики; e_{33} - её пьезоэлектрическая постоянная; $k_6 = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T - абсолютная температура объекта и ПП; Δf - ширина полосы пропускания ПП, акустически согласованного с водой с помощью четвертьволнового слоя с $z_{\text{сн}} = (z_0 z_2)^{1/2}$ и с параллельной индуктивностью, настроенной со статической ёмкостью C_0 на частоту полуволнового резонанса диска f_0 ;

$$R = \text{Re} Z = \frac{z_0}{\pi \cdot D^2} \left(\frac{l_0}{e_{33}}\right)^2 - \quad (3)$$

активная составляющая комплексного электрического импеданса ПП в полосе частот Δf вблизи частоты f_0 .

В случае если напряжение собственных шумов УВЧ, приведённое к его входу $\overline{U_{\text{УЧ}}^2} \ll \overline{U_{\Sigma}^2}$, предельная чувствительность определяется по формуле:

$$\frac{\theta}{T} = \sqrt{2 / \Delta \omega \cdot \tau} \cdot \frac{\overline{U_{\Sigma}^2}}{U_{\text{пп}}^2 [(\pi \cdot D / 2F)^2 + 1]}, \quad (4)$$

$$\frac{\theta_{\text{пор}}}{T} = \sqrt{\frac{2}{\Delta \omega \cdot \tau}}, \quad (5)$$

где τ - постоянная времени ФНЧ.

Из (4) видно, что минимальное значение $\frac{\theta}{T}$ достигается при $(\pi D / 2F)^2 \gg 2$. Для нефокуси-

руемого ПП $\overline{U_{\Sigma}^2} = 2\overline{U_{пп}^2}$ и чувствительность в 2 раза хуже.

Эллиптическая двояковогнутая фокусирующая линза

Из рассмотрения различных способов фокусировки следует, что наибольшее значение $D/2F$ получается с двояковогнутой линзой, для которой:

$$\frac{D}{2F} = 2\sqrt{\frac{1-n}{1+n}}, \quad (6)$$

где $n=c_b/c_n$, $c_b=1,5 \cdot 10^3$ м/с, c_n - скорость звука в воде и линзе соответственно; F – фокусное расстояние линзы.

В случае линзы из оргстекла ($c_n=2,7 \cdot 10^3$ м/с, $n=0,56$): $(\pi D/2F)^2 \leq (1,1\pi)^2=12$, а линзы из полистирола ($c_n=2,37 \cdot 10^3$ м/с, $n=0,63$): $(\pi D/2F)^2 \leq (0,95\pi)^2=9$, т.е. на 25% меньше, чем для линзы из оргстекла. Существенно, чтобы линза была безаберрационной, т.е. эллиптической.

Из (6) видно, что с увеличением F необходимо пропорционально увеличивать D . Однако, при этом, согласно (2), будет уменьшаться $\overline{U_{пп}^2}$ и условие $\overline{U_{yc}^2} \ll \overline{U_{\Sigma}^2}$ может перестать выполняться. В этом случае необходимо, насколько возможно, увеличить отношение I_0/e_{33} . Поскольку $I_0 f_0 = N_t$ - частотному коэффициенту для колебаний по толщине, I_0 - однозначно связано с частотой f_0 , которую из соображений проникновения УЗ в тело человека на глубину зондирования без заметного затухания целесообразно выбирать ≈ 1 МГц. Из пьезокерамик следует выбирать пьезокерамику с наименьшим значением e_{33} . Такой, например, является PZT-6В с параметрами $N_t=2225$ м/с, $z_0=35 \cdot 10^6$ Па·с/м, $e_{33}=7,1$ Кл/м². Взяв $D=56$ мм ($F=28$ мм) и $\Delta f=0,5$ МГц, из (1) и (2) получим:

$$\frac{1}{(\overline{U_{\Sigma}^2})^2} = 7,4 \text{ мкВ}.$$

В работе использовался ПП с $D=28$ мм, $F=14$ мм, $I_0=2,6$ мм из пьезокерамики PZT-8 ($e_{33}=13,2$ Кл/м², $z_0=35 \cdot 10^6$ Па·с/м), $R=550$ Ом. Для близкой частоты f_0 и $\Delta f=0,5$ МГц $\frac{1}{(\overline{U_{\Sigma}^2})^2} \approx 8,1 \text{ мкВ}$, $C_{оп}=2,2$ нФ.

Электрический шумовой эталон фокусируемого пьезоприемника

В экспериментах по регистрации теплового акустического излучения, проводимых в ИРТЭ АН

СССР (затем РАН), применялся модуляционный акустотермометр, который через блок модулятора, заполненный водой, с акустически прозрачным окном, вводился в соприкосновение с кожей пациента. Шумовой акустический сигнал из тела пациента модулировался вращающимся обтюратором. При открытом модуляторе на ПП поступало излучение от исследуемого объекта, при закрытом - из воды, заполняющей модулятор. Эти сигналы близки по величине. Соответствующий им средний квадрат напряжения на выходе нефокусируемого ПП (без собственного шума ПП) определяется выражением (2).

В случае фокусируемого ПП средний квадрат напряжения на его выходе $\overline{U_{\Sigma}^2} \gg \overline{U_{пп}^2}$, поэтому такой способ модуляции не подходит. В настоящей статье осуществлялась модуляция напряжения на выходе ПП с помощью электронной коммутации входа УВЧ с ПП на эталон, имеющий такую же, как и ПП АЧХ и с близким значением среднего квадрата напряжения на выходе.

В качестве такого эталона рассматривались два варианта. Первый - нефокусируемый ПП с той же частотой f_0 , но с меньшим в 3,75 раз диаметром $D_{эт}=D/3,75 \approx 8$ мм и $R=7700$ Ом и реактивными элементами, образующими полосовой фильтр для теплового шума этого резистора и равными значениям элементов эквивалентной схемы акустического эталона.

Схема электрического эталона представлена на рис.1.

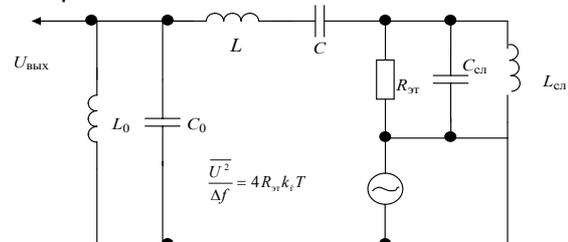


Рис. 1. Схема эквивалентная полосового электрического эталона шума

Элементы полосового электрического эталона шума определяются следующим образом (при $k_t=0,51$ ($\beta=k_t^2=0,26$)):

$$C_{озт} = 157 \text{ пФ}, \omega_1 = \omega_0 (1 - 8\beta / \pi^2)^{1/2},$$

$$L_0 = 1 / \omega_0^2 (C_0 + C_{каб.}),$$

$$C = C_{0.эт} (8\beta / \pi^2) / (1 - 8\beta / \pi^2),$$

$$L = 1 / \omega_1^2 \text{ С}.$$

Электронный коммутатор фокусируемого пьезоприемника и шумового эталона в качестве модулятора акустотермометра

Коммутатор выполнен на полевых транзисторах со встроенным n-каналом. Транзисторы этого типа при напряжениях сток-исток обоих знаков и

меньших 1В, представляют собой управляемые резисторы, сопротивление которых минимальное при напряжении затвор-исток $U_{зи}=0$ и очень большое при $|U_{зи}| > U_{отс}$ — напряжения отсечки.

Ключевой режим полупроводниковых элементов (диодов, транзисторов) широко используется в переключателях и коммутаторах напряжения. Однако случай коммутации тепловых шумов в литературе обнаружить не удалось.

Как шумовой эталон, так и эквивалент антенны (рис.1) представляют связанные контуры с полосой пропускания, в которой средний уровень шумового напряжения определён напряжением шума на частоте:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \sqrt{1 - \frac{8k_f^2}{\pi^2}} \cdot f_0. \quad (7)$$

Эквивалентная схема на этой частоте представлена на рис.2.

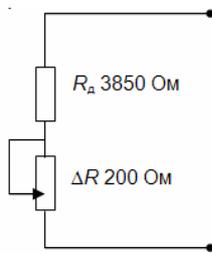


Рис. 2. Эквивалентная схема шумового эквивалента на частоте f_1

Считая, что в интервале $\Delta f : \cdot R = R_d + \Delta R$, получим,

$$\overline{U_{ш}^2} = 4 \cdot (R_d + \Delta R) \cdot k_b \cdot T \cdot \Delta f_{ст}. \quad (8)$$

Из этого следует, что сопротивление $r_{си}$ (при $U_{зи}=0$) должно быть гораздо меньше ($R_d + \Delta R$).

Канал ПТ может быть объемным (транзисторы с управляющим р-п переходом) и поверхностным (транзисторы с изолированным затвором) [7].

Сопротивление транзистора с управляющим р-п переходом минимальное при напряжении на затворе по отношению к истоку $U_{зи}=0$. В справочниках обычно приводится величина начального тока стока $I_{нач}$ при напряжении $U_{си.нас}$, а также напряжение отсечки $U_{зи.отс}$. Всегда выполняется равенство: $U_{си.нас} = U_{зи} - U_{зи.отс}$ или $U_{си.нас} = -U_{зи.отс}$ при $U_{зи}=0$. (9)

Поэтому величину $r_{си0}$ можно определить по формуле [8]:

$$r_{си0} = \frac{U_{си.нас}}{2I_{с.нас}} = -\frac{U_{зи.отс}}{2I_{нач}}. \quad (10)$$

Выводы

Предложен акустотермометр в котором эквивалентом фокусируемого преобразователя явля-

ется электронная схема с сопротивлением в качестве генератора теплового шума с интенсивностью, равной сумме интенсивностей принимаемого акустического излучения тела и собственного шума пьезопреобразователя. Аналогичная схема служит в качестве шумового эталона.

Шумовой эталон и эквивалент пьезоприемника представляют связанные контуры с полосой пропускания, в которой средний уровень шумового напряжения определён напряжением шума на резонансной частоте пьезоприемника.

Применение электронной коммутации пьезоприемника и шумового эталона позволило исключить из схемы акустотермометра блок модулятора, используемый в ИРТЭ РАН.

Применение двояковогнутой эллиптической линзы позволяет измерять абсолютную глубинную температуру тела одночастотным, одноканальным методом. Причем, в отличие от двухчастотного метода, частоту можно выбирать низкую, что обеспечивает большую глубину проникновения в ткани.

Литература

1. Godik E.E., Gulyaev Y.V. Functional imaging of the human body // IEEE Engineering in medicine and biology. 1991. V.10. N 4. P.21-29.
2. Гуляев Ю.В., Годик Э.Э. Дементенко В.В., Пасечник В.И., Рубцов А.А. О возможностях акустической термографии биологических объектов// Доклады АН СССР. 1985.Т.183. N 6С.1495-1499.
3. Пасечник В.И. Акустическая термография биологических объектов // Радиотехника. 1991. N 8. С.77-80.
4. Найда С.А. Акустометрия жидких объектов с помощью пьезоприемников мегагерцевого диапазона // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. —2002. №3. -С.41-48.
5. Найда С.А. Пьезоприемники теплового акустического излучения для зондирования внутренней температуры объектов// Техническая диагностика и неразрушающий контроль. —2003. №1. -С. 25-29.
6. Найда С.А. О возможности одноканальной динамической пассивной акустотермометрии головного мозга и улитки внутреннего уха новорожденных с помощью фокусированного ультразвука// Электроника и связь.-2003.-№ 18.-С.9-10.
7. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Глухов А.И. Аналоговая и цифровая электроника / Под ред. О.П. Глудкина. — М.: Горячая линия.Телеком, 1999. — 768 с.