

РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© А.С.Руды́й

Возможности традиционных способов повышения чувствительности тепловых приемников ИК излучения, основанных на увеличении температурного коэффициента сопротивления болометра, ограничены уровнем его собственных шумов [1,2]. Для улучшения соотношения сигнал/шум широко используется синхронное детектирование, для чего подаваемый на болометр световой поток модулируется частотой от 10 до 10^5 Гц. Поскольку при этом регистрируются вынужденные тепловые колебания болометра, т. е. колебания системы релаксационного типа, их амплитуда невелика. В настоящей работе дается теоретическое обоснование принципиально иного способа повышения чувствительности болометра, основанного на увеличении добротности релаксационной системы за счет обратной связи по температуре.

Рассмотрим математическую модель приемника ИК излучения, показанного на рис. 1. Устройство состоит из двух тонкопленочных терморезисторов 1, напыленных на диэлектрическую подложку 2, расположенную на термостабируемом медном основании 3. Термочувствительные элементы R_t и резисторы R_0 , R_1 образуют болометрический мост, в диагональ которого включен предварительный усилитель 4. Пропорциональный температуре термочувствительных элементов сигнал разбаланса моста $\alpha T(x_0, t)$ сравнивается с опорным напряжением u_0 источника 5, а усиленный сигнал ошибки подается с выхода регулятора 6 на нагреватель 7. Последний одновременно является приемником ИК излучения, предварительно промодулированного на частоте ω модулятором 9, в результате чего тепловой поток на поверхности $x = \delta$ содержит осциллирующую компоненту $q_0 \operatorname{Re}[1 + \exp i(\omega t + \varphi)]$.

Динамика приведенной на рис. 1 системы определяется температурным полем ее распределенного элемента (рис. 2) и параметрами петли обратной связи, которые далее полагаются сосредоточенными. Математическая модель системы в детерминированной постановке имеет вид нелинейной краевой задачи

$$\dot{T}(x, t) = \alpha T''(x, t), \quad (1)$$

$$T(0, t) = 0, \quad (2)$$

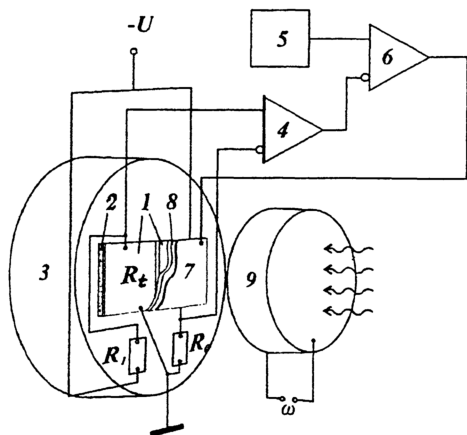


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для регистрации ИК излучения: 1 — термочувствительные элементы, 2 — диэлектрическая подложка, 3 — термостат, 4 — предварительный усилитель, 5 — источник опорного напряжения, 6 — регулятор, 7 — резистивный нагреватель с зачерненной поверхностью, 8 — диэлектрический слой, 9 — модулятор. Падающий световой поток модулируется на собственной частоте приемника $\omega_c = 2a\nu^2(\xi_0)/\delta^2$ (для $\xi_0 = 0.33$, $a = a_0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\delta = 10^{-5} \text{ м}$ частота модуляции составляет $2.6a_0 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$).

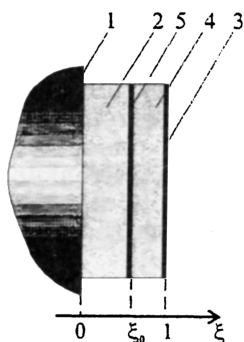


Рис. 2. Конструкция активного болометра: 1 — термостат, 2 — диэлектрическая подложка, 3 — тонкопленочный нагреватель, 4 — слой диэлектрика, 5 — термочувствительный элемент. В модели (1)–(3) тепловые сопротивления и теплоемкости нагревателя и термочувствительного элемента не учитываются.

$$T'(x, t)|_{x=\delta} = \frac{K^2}{\lambda SR} [u_0 - \alpha T(x_0, t)]^2 + \frac{q_0}{\lambda} [1 + \exp i(\omega t + \varphi)], \quad (3)$$

в которой обратная связь моделируется условием (3). Здесь S и δ — площадь поверхности и толщина болометра, λ — теплопроводность диэлектрического слоя, R — сопротивление нагревателя, K — коэффициент усиления регулятора.

Аналогичная (1)–(3) задача исследовалась в работе [3] применительно к автономной системе ($q_0 = 0$). Как было показано в [3], все независимые параметры системы можно свести в один управляющий параметр $A(K, u_0) < 0$. При уменьшении A добротность системы растет, и при $A = A_0$ система становится осцилляторной, а при $A = A_c$ в ней возникают автоколебания частоты ω_c .

Пусть теперь в (3) $\omega = \omega_c$, а система находится в докритической области вблизи точки бифуркации, т. е. $A = A_c(1 + \varepsilon)$, где $\varepsilon < 0$, $|\varepsilon| \ll 1$. Линеаризуя задачу (1)–(3) на ее стационарном решении

$$\bar{T}(x) = \frac{A}{A-2} \left(\frac{u_0}{\alpha x_0} - \frac{2q_0}{\lambda A} \right) x \quad (4)$$

и переходя к нормированной координате $\xi = x/\delta$, получим краевую задачу для определения осциллирующей компоненты температуры

$$\dot{T}(\xi, t) = a\tilde{T}''(\xi, t), \quad \tilde{T}(0, t) = 0,$$

$$\tilde{T}'(\xi, t)|_{\xi=1} = \frac{A_c}{\xi_0} (1 + \varepsilon) \tilde{T}(\xi, t) + \frac{q_0}{\lambda} [1 + \exp i(\omega t + \varphi)]. \quad (5)$$

Общее решение соответствующей однородной краевой задачи совпадает с полученным в [3], а ее частное решение ищем в том же виде, что и неоднородность $\tilde{T}(\xi, t) = \Theta(\varepsilon) \text{sh}(1 + i)\nu_c \xi \exp(i\omega t)$. Амплитуда решения $\Theta(\varepsilon)$ определится из условия обратной связи, которое с учетом того, что $(1+i)\nu_c$ удовлетворяет условию обратной связи автономной системы, принимает вид

$$\frac{A_c}{\xi_0} \varepsilon \Theta(\varepsilon) \text{sh}(1+i)\xi_0 \nu_c + \frac{q_0 \delta}{\lambda} \exp(i\varphi) = 0. \quad (6)$$

Разделяя в (6) действительную и мнимую части и исключая φ , приходим к окончательному выражению для амплитуды колебаний температуры в точке $\xi = \xi_0$:

$$\Theta(\varepsilon) \sqrt{\text{sh}^2 \xi_0 \nu_c + \sin^2 \xi_0 \nu_c} = \frac{q_0 \xi_0 \delta}{A_c \varepsilon \lambda}. \quad (7)$$

$$[\xi_0 / A_c(\xi_0)] \times 10^3$$

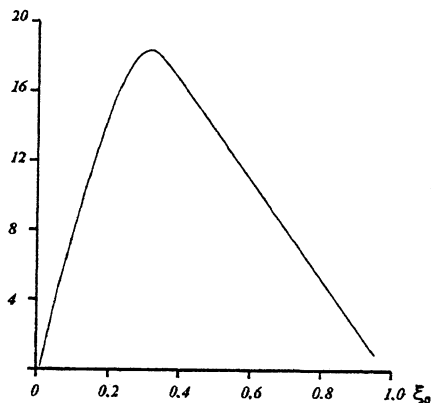


Рис. 3. Зависимость технической чувствительности приемника ИК излучения от координаты термочувствительного элемента.

Согласно (7), амплитуда вынужденных колебаний зависит от надкритичности системы как $1/\varepsilon$ и растет при $A \rightarrow A_c$. Определим область значений ε , для которой справедливы полученные результаты. При линейризации (1)–(3) предполагалось, что выполняется условие $\text{Re } \tilde{T}(\xi_0, t) \ll \ll 4\bar{T}(\xi_0)/|A|$, которое с учетом (7) преобразуется в

$$|\varepsilon| \gg \frac{q_0 \eta \delta}{4\beta_0 \lambda} \left(1 + \frac{2}{|A_c|} \right). \quad (8)$$

Условие (8) определяет максимальное для заданного ξ_0 значения надкритичности, при котором справедливы результаты линейного анализа. Выбор параметра ξ_0 диктуется требованием максимальной чувствительности системы C_T , определяемой как отношение удвоенной амплитуды колебаний температуры (7) к максимальной внешней мощности $q_0 S$:

$$C_T = \frac{2\xi_0 \delta}{A_c(\xi_0) \varepsilon S \lambda}. \quad (9)$$

Зависимость $\xi_0/A_c(\xi_0)$, график которой представлен на рис. 3, имеет максимум при $\xi_0 = \xi_m = 0.33$. Подстановка ξ_m , $A_c(\xi_m)$, u_0 , α в неравенство (8) позволяет окончательно определить границы применимости результатов анализа линейризованной модели (5):

$$|\varepsilon| \gg 0.368 \frac{q_0 \delta \alpha}{4u_0 \lambda}. \quad (10)$$

Сравним обнаружительные способности $D^* = \sqrt{S}/P_{\text{экр}}$ активного ($A < 0$) и пассивного ($A = 0$) болометров [2]. Здесь $P_{\text{экр}}$ — эквивалентная шумовая мощность, определяемая как отношение корня из спектральной плотности шумов $\sigma_T(f)$ к технической чувствительности болометра C_T . Подставляя $\sigma_T(f)$ и (9) в D^* вместо $P_{\text{экр}}$, получим

$$D^* = D_0^* \frac{\xi_0}{A_c(\xi_0)\varepsilon}, \quad (11)$$

где $D_0^* = 2\delta/\lambda\sqrt{\sigma_T(f)S}$ — обнаружительная способность пассивного болометра. Таким образом, введение обратной связи увеличивает обнаружительную способность пассивного болометра в $\xi_0/\varepsilon A_c(\xi_0)$ раз. Отметим, что для более корректной оценки D^* в модели (1)–(3) необходимо учесть стохастичность системы.

Полученные результаты могут служить основой для разработки новых методов регистрации ИК излучения. Наиболее вероятными областями применения предлагаемого метода могут стать системы дистанционного управления, аэрофотосъемка в ИК диапазоне, системы обнаружения, слежения, распознавания, приборы ночного видения и ИК спектроскопия.

Список литературы

- [1] Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения. Справочник. М.: Радио и связь, 1987. 296 с.
- [2] Ван дер Зил А. Шумы при измерениях. М.: Мир, 1979. 292 с.
- [3] Rudyi A.S. // Int. J. Thermophys. 1993. V. 14. N 1. P. 159–172.

Ярославский
государственный
университет

Поступило в Редакцию
24 ноября 1996 г.