ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Том XXX, № 3 РАДИОФИЗИКА 1987

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

УДК 615.47:621.37/39

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ГЛУБИННЫХ ТЕМПЕРАТУР ОБЪЕКТОВ МЕТОДАМИ СВЧ РАДИОМЕТРИИ

Л. С. Павлова, В. М. Поляков

Точность, с которой надо знать интегральные глубинные температуры, определяется целями исследования. Особое значение вопрос о точности приобретает при проведении биологических и медицинских исследований, так как в этом случае ошибка измерения абсолютного значения температуры должна составлять десятые доли градуса [1]. Исходя из этого целесообразно рассмотреть факторы, влияющие на точность измерения температуры СВЧ радиометрическим методом, и оценить возможную точность измерения температуры биологических объектов при использовании антенн-аппликаторов.

Если полагать, что в пределах изменения температуры исследуемого объекта его диэлектрические характеристики остаются постоянными (для биологических объектов это допущение выполняется с большой степенью точности), то показания радиометра N линейно связаны с температурой исследуемого объекта T: $N = a+bT$. Оценку значения измеряемой температуры можно провести по формуле

$$\hat{T} = \frac{N - (\hat{a}+X)}{\hat{b} - Y},$$

$$\hat{b} = b+Y+\delta b, \qquad Y = \frac{\Delta a_1 - \Delta a_2}{T_1 - T_2} + \frac{\Delta b_1 T_1 - \Delta b_2 T_2}{T_1 - T_2}, \tag{1}$$

$$\hat{a} = a - X + \delta a, \qquad X = \frac{\Delta b_1 - \Delta b_2}{T_1 - T_2} T_1 T_2 + \frac{\Delta a_1 T_2 - \Delta a_2 T_1}{T_1 - T_2},$$

T_1 и T_2 — температуры калибровочных эталонов, δ перед соответствующими величинами означает случайные погрешности их определения, Δ — погрешности определяемых величин, связанные с различием коэффициентов a и b при измерениях и калибровке. Ошибка определения температуры $\delta T'$ определяется из выражения

$$\delta T' = \frac{\delta N - \delta a - T\delta b}{b} + \frac{T\delta Y - \delta X}{b} = \delta T + \Delta T. \tag{2}$$

Первое слагаемое (δT) связано с ошибками определения температуры эталонов (δT_1, δT_2) и ошибками отсчета показаний выходного прибора при калибровках и измерении (δN_1, δN_2, δN). Второе слагаемое (ΔT) связано с отличием коэффициентов a и b при измерениях от соответствующих коэффициентов при калибровке. Это отличие может быть вызвано как отличием диэлектрических свойств эталона от свойств исследуемого объекта, так и отличием режима измерений от режима калибровки.

Используя формулы (1) и (2), проведем анализ погрешностей измерения температуры при применении радиометра, входная часть которого соответствует эквивалентной схеме, рассмотренной в [1].

Анализ проведем для трех вариантов этой схемы.

I вариант. Оценка температуры проводится по выходным показаниям радиометра при отсутствии модуляции входного сигнала. Полагая $\delta X = X$, а $\delta Y = Y$, получим следующие выражения для δT и ΔT:

$$\delta T = A\delta T_2 + (1-A)\delta T_1 + \frac{(1-A)\delta N_1 + A\delta N_2 + \delta N}{\alpha\eta(1-p^2)}, \quad A = \frac{T_1 - T}{T_1 - T_2}; \tag{3}$$

$$\Delta T = \frac{1-\eta}{\eta}\left[T_{a_1}(1-A) + T_{a_2}A - T_a\right] + \frac{(1-p_z^2)p^2}{\eta(1-p^2)}\left[T_{z_1}(1-A) + T_{z_2}A - T_z\right] +$$

$$+\frac{1-p_z p^2}{\eta(1-p^2)}\,[T_{вх_1}(1-A)+T_{вх_2}A-T_{вх}]+\frac{\Delta p^2\eta-\Delta\eta(1-p^2)+\Delta\eta\Delta p^2}{\eta(1-p^2)}\times$$

$$\times[T_{a_1}(1-A)+T_{a_2}A-T]+\frac{\Delta p^2}{\eta(1-p^2)}\,[(T_{z_1}-T_{a_1})(1-A)+(T_{z_2}-T_{a_2})A]+ \qquad (4)$$

$$+\frac{p_z^2\Delta p^2}{\eta(1-p^2)}\,[(T_{вх_1}-T_{z_1})(1-A)+(T_{вх_2}-T_{z_2})A],$$

где $R_{вх}$, $T_{вх}$ — входное сопротивление и его эффективная температура, определяемая шумами входа; R_a, T_a — сопротивление потерь и температура материала антенны-аппликатора; R, T — сопротивление излучения антенны-аппликатора и эффективная температура этого сопротивления, равная интегральной глубинной температуре исследуемого участка объекта; R_z, T_z — сопротивление и температура согласованной нагрузки циркулятора; ρ — волновое сопротивление фидера, равное $R_{вх}$; $\eta=R/R_a+R$ — коэффициент полезного действия (кпд) антенны при измерениях; $p^2=\left(\frac{\rho-R-R_a}{\rho+R+R_a}\right)^2$ — коэффициент отражения от антенны по мощности при измерениях; p_z^2 — коэффициент отражения от нагрузки циркулятора по мощности; $\Delta\eta$ и Δp — изменения кпд антенны и коэффициента отражения от нее, связанные с калибровкой; α — коэффициент пропорциональности, регулируемый усилением. Из (3) и (4) следует:

— ошибки δT и ΔT возрастают при уменьшении кпд антенны и при увеличении коэффициента отражения от нее в режиме измерения;

— для того, чтобы ошибки ΔT были равны нулю, необходимо соблюдение в режиме измерения термодинамического равновесия ($T_a=T_z=T_{вх}=T$), а в режиме калибровки температуры T_{ai}, T_{zi} и $T_{вх\,i}$ должны удовлетворять уравнению

$$T_{k_1}=\frac{T_k(T_1-T_2)-T_{k_2}(T_1-T)}{T-T_2}, \quad k=a, z, «вх». \qquad (5)$$

Частным случаем (5) являются термодинамическое равновесие в режиме калибровки ($T_{ai}=T_{zi}=T_{вх\,i}=T_i$) и термостабилизация при температуре исследуемого объекта ($T_{a\,i}=T_{z\,i}=T_{вх\,i}=T$):

— если температуры T_{ai}, T_{zi}, $T_{вх\,i}$ при калибровке не удовлетворяют уравнению (5), ошибка ΔT_k в общем случае не будет равна нулю и в том случае, когда диэлектрические свойства эталона точно соответствуют диэлектрическим свойствам исследуемого объекта ($\Delta\eta=\Delta p^2=0$). Однако, если стабилизировать входные элементы при температуре T, то при $\Delta\eta=\Delta p^2=0$ ошибка ΔT тоже равна нулю;

— если при калибровке температуры T_{ai}, T_{zi}, $T_{вх\,i}$ отличны от соответствующих температур при измерении и при этом не удовлетворяют уравнению (5), ошибка ΔT может быть достаточно велика. Особенно сильное влияние оказывает $T_{вх}$, так как коэффициент перед последним слагаемым в (4) порядка единицы, а перед остальными слагаемыми — порядка 0,1 и меньше.

II вариант — модуляционный приемник с замыкателем на входе. Величина ошибки δT определяется выражением (3), а для ΔT имеем следующее соотношение:

$$\Delta T=\frac{1-\eta}{\eta}\,[T_{a_1}(1-A)+T_{a_2}A-T_a]+\frac{1-p_z^2}{\eta}\,[T_{z_1}(1-A)+T_{z_2}A-T_z]+$$

$$+\frac{p_z}{\eta}\,[T_{вх_1}(1-A)+T_{вх_2}A-T_{вх}]+\frac{\Delta p^2\eta-\Delta\eta(1-p^2)+\Delta\eta\Delta p^2}{\eta(1-p^2)}\times \qquad (6)$$

$$\times[T_{a_1}(1-A)+T_{a_2}A-T]+\frac{\Delta p^2}{\eta(1-p^2)}\,[(T_{z_1}-T_{a_1})(1-A)+(T_{z_2}-T_{a_2})A]+$$

$$+\frac{p_z^2\Delta p^2}{\eta(1-p^2)}\,[(T_{вх_1}-T_{z_1})(1-A)-(T_{вх_1}-T_{z_1})(1-A)-(T_{вх_2}-T_{z_2})A].$$

Из (6) следует, что при использовании модуляционного приемника резко уменьшаются требования к стабильности входной шумовой температуры ($T_{вх}$), но зато существенно возрастают требования к стабильности температуры опорной нагрузки (T_z).

III вариант — модуляционный приемник с использованием в качестве модулятора входного циркулятора. Ошибки δT, как и в предыдущих вариантах, определяются (3), а для ΔT справедливо следующее выражение:

$$\Delta T=\frac{1-\eta}{\eta}\,[T_{a_1}(1-A)+T_{a_2}A-T_a]+1/\eta\,[T_z-T_{z_1}(1-A)-T_{z_2}A]+ \qquad (7)$$

$$+\frac{(1-p^2)\Delta\eta-\Delta p^2\Delta\eta}{\eta(1-p^2)}\,[T-T_{a_1}(1-A)+T_{a_2}A]+\frac{\Delta p^2}{\eta(1-p^2)}\times$$

$$\times [(T_{z_1} - T_{a_1})(1 - A) \times (T_{z_2} - T_{a_2}) A].$$

Из (7) следует, что в случае модуляции входным циркулятором ошибки ΔT не зависят от изменения $T_{вх}$ при проведении измерения и калибровки.

На примере формулы (7) посмотрим, как выглядят выражения для ΔT в режиме термостабилизации каждой из температур при своих заданных величинах температуры $T_{a_1} = T_{a_2} = T_a$; $T_{z_1} = T_{z_2} = T_z$. В этом случае

$$\Delta T = \frac{(1-p^2)\Delta\eta - \Delta p^2\eta - \Delta p^2\Delta\eta}{\eta(1-p^2)}(T - T_a) + \frac{\Delta p^2}{\eta(1-p^2)} \times$$
$$\times (T_z - T_a) = K_1(T - T_a) + K_2(T_z - T_a). \tag{8}$$

Из (8) следует, что в этом случае наличие ошибок ΔT связано только с отклонением свойств эталона от свойств измеряемого объекта. С другой стороны, обращает на себя внимание тот факт, что температура антенны во время калибровок и измерения должна находиться в соответствующем соотношении не только с температурой измеряемого объекта, но и с температурой согласованной нагрузки (T_z).

Что касается погрешности δT, определяемой соотношением (3), то она может быть сделана достаточно малой (менее 0,1 К) путем точного измерения температуры эталонов и повышения флуктуационной чувствительности измерительных устройств.

Полученные в работе соотношения для оценки погрешностей определения глубинных температур позволили дать рекомендации по оптимальному построению схемы радиотермометра, созданию калибровочных эталонов и выбору температурных режимов измерений и калибровки. При выполнении этих рекомендаций абсолютная точность измерения глубинных температур может достигать десятых долей градуса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий В. С. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, **24**, № 9, с. 1054.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

Поступила в редакцию
20 января 1986 г.

УДК 534.0

СИНХРОНИЗАЦИЯ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ МАККЕЯ—ГЛАССА

П. С. Ланда, С. М. Перминов

При изучении хаотических автоколебаний важным является вопрос об их количественных характеристиках. Сейчас известно несколько количественных характеристик хаотических автоколебаний: спектр, автокорреляционная функция, энтропия, ляпуновкие показатели, размерности. В какой-то мере эти количественные характеристики хаоса связаны между собой: спектр связан с автокорреляционной функцией, энтропия — с ляпуновскими показателями и размерностями. При экспериментальных исследованиях определение этих характеристик, кроме спектра, как правило, сложно, так как требует машинной обработки получаемых реализаций с большими затратами времени и оперативной памяти ЭВМ [1, 2]. Поэтому актуальным является вопрос о характеристиках хаоса, легко определяемых из эксперимента.

В работах [3, 4] высказана и на ряде примеров проверена гипотеза о связи амплитудного порога синхронизации и энтропии системы. Под порогом синхронизации понимается то минимальное значение амплитуды внешнего периодического воздействия, при котором на какой-либо частоте этого воздействия существует синхронизация хаотической системы, т. е. колебания являются периодическими с периодом, кратным периоду внешнего воздействия.

Практически порог синхронизации удобно определять следующим образом. При достаточно большой амплитуде внешнего воздействия находим частоты, соответствующие границам областей синхронизации по первому переходу модуля мультипликатора через единицу. Уменьшая амплитуду воздействия A, определяем значения $A_1, A_2, A_3, \ldots$, в которых эти границы смыкаются (индексы 1, 2, 3,... соответствуют номерам областей синхронизации). Порогом синхронизации $A_п$ является минимальное значение найденных величин A_i. Отметим, что для периодических систем порог синхронизации равен нулю [5]. Наличие порога синхронизации у хаотических систем можно, как уже отмечалось, объяснить тем, что тенденция к синхронизации происходит на фоне противоположной тенденции к хаосу. Синхронизация наступает тогда, когда первая тен-