

## Модернизированный входной блок микроволнового радиотермометра для дистанционного измерения температуры биологического объекта

А. В. ФИЛАТОВ, М. Н. АНИШИН, С. Р. ГАЗИТОВ, С. Е. ТАРАСОВ,  
Б. В. УТКИН, А. А. ШИБЕЛЬГУТ<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия, e-mail: filsash@mail.ru

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, e-mail: shibelgut@gmail.com

Описан модернизированный входной блок микроволнового радиотермометра, предназначенного для исследования биологических сред. В данном блоке применён ответвитель на связанных линиях передачи. Часть высокочастотного сигнала генератора шума ответвляется из основного канала в рабочие плечи вторичного канала с различными коэффициентами переходного ослабления, разность которых определяет диапазон измерений. Это позволяет на стадии моделирования параметров ответвителя создавать радиотермометры с заданными диапазонами измерений.

**Ключевые слова:** биологическая среда, измерение глубинной температуры, дистанционный метод, микроволновый радиотермометр, модификация нулевого метода измерений.

*Described modernized input unit microwave radio thermometer for the study of biological fluids, which is applied to the coupler coupled transmission lines. A branch portion of high frequency noise signal generator is derived from the main channel in both the working channel secondary shoulder transition with different attenuation factors, the difference of which defines the scope of the measurement range. This allows the options to create the modeling stage coupler radiometry with specified measurement ranges.*

**Key words:** biological environment, measure the depth of the temperature, remote method, microwave radio, a modification of the zero measurement method.

В [1] представлен радиотермометр, предназначенный для дистанционного измерения термодинамической температуры внутри биологического объекта. В данном приборе реализован нулевой метод измерений, для чего в радиотермометре установлен канал подшумливания объекта исследования. Подшумливание осуществляется импульсами, длительность которых зависит от интенсивности излучения объекта. В радиотермометре выполняются два вида импульсной модуляции — амплитудная и широтная. Достоинства такой схемы перед описанными в [2—4] — более высокое быстродействие и отсутствие погрешностей, связанных с искажением формы периодической последовательности промодулированных на входе сигналов после выделения огибающей в квадратичном детекторе. В радиотермометре электромагнитный сигнал, несущий информацию о температуре внутри объекта, определяется косвенным образом через длительность широтно-импульсного сигнала. На точность определения электромагнитного сигнала не влияет коэффициент отражения в месте приложения аппликаторной антенны к объекту.

Во входном блоке радиотермометра установлен циркулятор, работающий в режиме вентили. Для этого одно из выходных плеч циркулятора соединено с согласованной нагрузкой. Нагрузка в радиотермометре выполняет роль опорного шумового источника, определяющего нижнюю границу диапазона измеряемых антенной шумовых температур. Для волноведущих структур согласованная нагрузка является ана-

логом абсолютно чёрного тела, и её термодинамическая и шумовая температуры равны.

В данной работе описан модернизированный входной блок без использования вентильного сверхвысокочастотного (СВЧ) устройства. Модернизация заключается в добавлении ответвителя, т. е. двух линий передачи с распределённой электромагнитной связью и различными значениями переходного ослабления. Ослабление возникает при ответвлении сигнала из основного (первичного) канала во вспомогательный (вторичный) в прямом и противоположном направлениях.

На рис. 1 приведена структурная схема входного модернизированного блока. Блок состоит из антенны 1 аппликаторного типа, СВЧ-ключа 2, ответвителя 3, в основной канал которого через СВЧ-переключатель 5 поступает сигнал генератора шума 6 для подшумливания объекта исследования. В канале формирования подшумливающего сигнала также установлены две согласованные нагрузки 7, 8. Сигнал с выхода ответвителя 3 поступает на приёмно-усилительный тракт, на входе которого установлен малошумящий усилитель высоких частот 4, собственная шумовая температура которого равна  $T_{УВЧ}$ .

Электромагнитное излучение, формируемое в толще объекта и характеризующее эффективной шумовой температурой  $T$ , поступает на границу объекта. В месте приложения контактной (аппликаторной) антенны часть этого излучения, равная  $TR$  ( $R$  — коэффициент отражения по мощнос-

ти на границе раздела объект — антенна), отражается обратно в объект. Другая часть, равная  $T(1-R)$ , попадает в антенну и является входным сигналом для радиотермометра.

Во входном блоке амплитудно-импульсная модуляция сигнала антенны выполняется в СВЧ-ключе по меандровому сигналу. Для этого входящие на вход управления ключом импульсы длительностью  $t_{\text{АИМ}}$  следуют со скважностью 2. Сигнал генератора в канале подшумливания подвергается широтно-импульсной модуляции. Модуляция осуществляется по управляющему сигналу длительностью  $t_{\text{ШИМ}}$  и состоит в переключении входных плеч основного канала ответвителя. На рис. 2, а показано направление распространения сигналов во вспомогательном канале ответвителя при поступлении высокочастотного сигнала генератора шума с эффективной температурой шумов  $T_{\text{ГШ}}$  на различные входы основного канала. При питании входного плеча 1 основного канала поступающая во вспомогательный канал часть сигнала генератора шума, равная  $\beta T_{\text{ГШ}}$ , распространяется в сторону антенны, другая часть,  $\beta_1 T_{\text{ГШ}}$ , — в сторону входа усилителя высоких частот, где  $\beta, \beta_1$  — значения переходного ослабления связанных линий, для которых во всей полосе принимаемых частот выполняется условие  $\beta_1 < \beta < 1$ . Аналогичным образом, если сигнал генератора шума поступает во входное плечо 2 основного канала ответвителя, то его часть, равная  $\beta T_{\text{ГШ}}$ , распространяется в сторону усилителя высоких частот, а другая часть,  $\beta_1 T_{\text{ГШ}}$ , — в сторону антенны.

Принцип работы радиотермометра, в котором использован данный входной блок, заключается в следующем. Во входном блоке по управляющему сигналу  $t_{\text{АИМ}}$  замыкается высокочастотный ключ, и сигнал антенны поступает на вход усилителя высоких частот. При замкнутом ключе синхронно с амплитудно-импульсной модуляцией происходит широтно-импульсная модуляция по сигналу  $t_{\text{ШИМ}}$ . В начале импульса  $t_{\text{АИМ}}$  в переключателе выход генератора шума коммутирован на первый вход основного канала ответвителя. В результате большая часть сигнала, т. е.  $\beta T_{\text{ГШ}}$  через СВЧ-ключ попадает в антенну и, отражаясь на границе с объектом, возвращается на вход усилителя высоких частот. Меньшая часть сигнала генератора шума,  $\beta_1 T_{\text{ГШ}}$ , поступая во вторичный канал ответвителя, непосредственно распространяется в сторону усилителя высоких частот. При появлении импульса  $t_{\text{ШИМ}}$  происходит переключение входов основного канала ответвителя, они меняются местами. От генератора запитывается вход 2, при этом большая часть сигнала генератора шума поступает на вход усилителя высоких частот, а меньшая передаётся в сторону антенны.

В полупериоде амплитудно-импульсной модуляции, когда импульсный сигнал  $t_{\text{АИМ}}$  принимает нулевое значение, ключ во входном блоке размыкается. В этом полупериоде импульсный сигнал управления широтной модуляцией не вырабатывается и сигнал генератора шума в течение всего полупериода поступает во входное плечо 1 основного канала ответвителя.

Таким образом, в зависимости от комбинации сигналов, управляющих ключом и переключателем, на входе усилителя высокой частоты линейного измерительного тракта образуются три сигнальных уровня, пропорциональных соответствующим шумовым температурам.

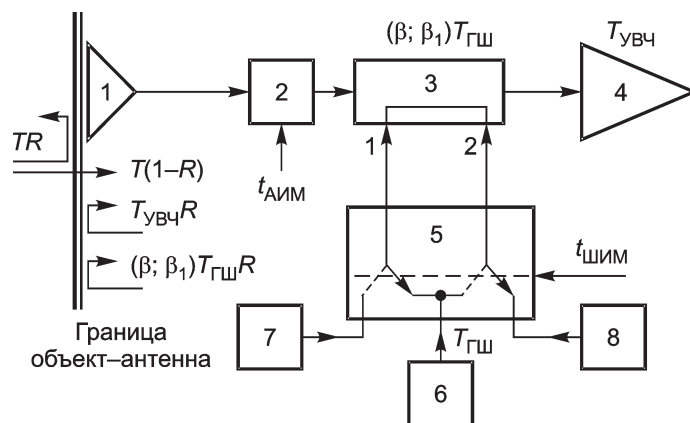


Рис. 1. Структурная схема входного модернизированного блока микроволнового радиотермометра:

1 — антенна; 2 — СВЧ-ключ; 3 — ответвитель; 4 — малошумящий высокочастотный усилитель; 5 — СВЧ-переключатель; 6 — генератор шума; 7, 8 — согласованные нагрузки

При одновременном действии  $t_{\text{АИМ}}$ ,  $t_{\text{ШИМ}}$  имеет место сигнал А:

$$T(1-R) + T_{\text{ГШ}}\beta + T_{\text{ГШ}}\beta_1 R + T_{\text{УВЧ}}R + T_{\text{УВЧ}}. \quad (1)$$

При действии только импульса  $t_{\text{АИМ}}$  — сигнал В:

$$T(1-R) + T_{\text{ГШ}}\beta R + T_{\text{ГШ}}\beta_1 + T_{\text{УВЧ}}R + T_{\text{УВЧ}}. \quad (2)$$

При отсутствии обоих импульсов появляется сигнал С:

$$T_{\text{ГШ}}\beta + T_{\text{ГШ}}\beta_1 + T_{\text{УВЧ}} + T_{\text{УВЧ}} = T_{\text{ГШ}}(\beta - \beta_1) + 2T_{\text{УВЧ}}. \quad (3)$$

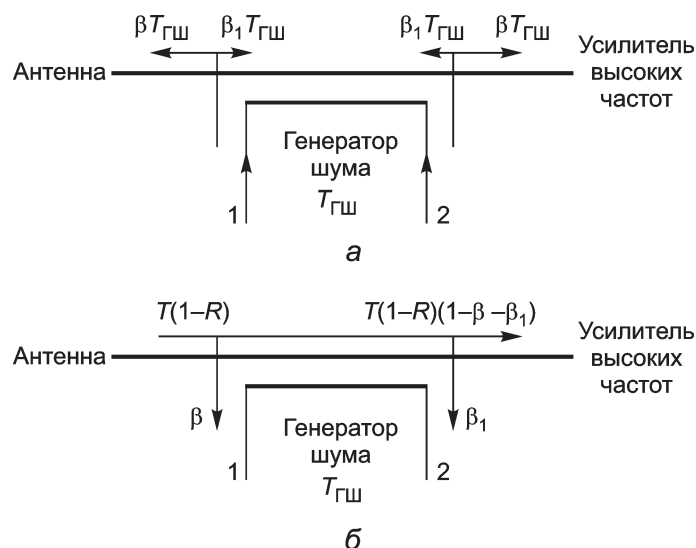


Рис. 2. Схемы направлений распространения сигналов во вспомогательном канале ответвителя:

а — при поступлении сигнала генератора шума на различные входы основного канала; б — при ответвлении части полезного сигнала антенны в основной канал

Предполагается, что высокочастотный ключ не имеет потерь, и в закрытом состоянии его коэффициент отражения равен единице, а собственное излучение усилителя высокой частоты распространяется в обе стороны.

Формулы (1)–(3) приведены без учёта обратной передачи сигналов из вспомогательного канала ответвителя в основной. В выражении (3) эффективная температура собственных шумов усилителя высокой частоты удваивается. Это связано с тем, что на его входе происходит сложение мощности собственного шума усилителя и этого же шума, отражённого от разомкнутого СВЧ-ключа. В (3) не представлен интерференционный член от взаимодействия этих сигналов. Условием его отсутствия является выполнение требования для минимальной длины волноведущих линий между СВЧ-ключом и входом усилителя высоких частот, которая находится из следующего равенства:

$$s_{\min} = c_0 / (2df\sqrt{\varepsilon}),$$

где  $c_0$  — скорость света в вакууме;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость подложки, на которой расположены пассивные высокочастотные элементы и линии передачи входного блока;  $df$  — полоса принимаемых радиотермометром частот.

Для  $df = 500$  МГц,  $\varepsilon = 10$ ,  $c_0 = 3 \cdot 10^8$  м/с получим  $s_{\min} \approx 10$  см. Если применить современную керамику с высокой диэлектрической проницаемостью, например, 80, то  $s_{\min}$  составит 3 см. То же наблюдается для сигнала генератора шума, поступающего на разные выходы вспомогательного канала ответвителя (сигналы  $\beta T_{\text{ГШ}}$  и  $\beta_1 T_{\text{ГШ}}$ ). Для ослабления влияния сигналов друг на друга требуется учитывать разность длин линий прохождения этих сигналов по цепям входного блока до входа усилителя высоких частот, которая должна быть больше  $s_{\min}$ .

Во входном блоке различные шумовые сигналы не коррелированы, поэтому их мощности будут складываться независимо. Энергия взаимодействия этих сигналов крайне мала, что связано с особенностью радиотерметрических систем принимать сигналы в широкой полосе частот, когда значения эффективного времени автокорреляции, равного  $1/df$ , близки к нулю [5]. С другой стороны, в радиотерметрических системах для повышения чувствительности время накопления сигнала, т. е. время одного измерения, выбирают довольно большим, от сотен миллисекунд до нескольких секунд. В результате суммарная средняя интенсивность сигнала, принимаемого инерционной аппаратурой, будет равна сумме средних интенсивностей составляющих её сигналов.

В основе функционирования радиотермометра использован модифицированный нулевой метод измерений [6]. Для данной модификации математическая модель имеет вид [7, 8]:

$$t_{\text{ШИМ}} = (C - B) t_{\text{АИМ}} / (A - B), \quad (4)$$

где  $A, B, C$  — значения сигналов из (1)–(3). Выражение справедливо при отсутствии интерференции.

Через эту модель косвенно определяется измеряемый сигнал антенны по длительности импульса, управляющего широтно-импульсной модуляцией.

После подстановки этих значений в (4) и простых преобразований запишем

$$t_{\text{ШИМ}} = (T_{\text{УВЧ}} + T_{\text{ГШ}}\beta - T) t_{\text{АИМ}} / [T_{\text{ГШ}}(\beta - \beta_1)]. \quad (5)$$

Из (5) выразим сигнал объекта исследований:

$$T = T_{\text{УВЧ}} + T_{\text{ГШ}}\beta - T_{\text{ГШ}} / (\beta - \beta_1) t_{\text{ШИМ}} / t_{\text{АИМ}}. \quad (6)$$

Для крайних значений длительности  $t_{\text{ШИМ}}$  определим границы диапазона измерений:

$$T_{\max} = T_{\text{УВЧ}} + T_{\text{ГШ}}\beta, \quad t_{\text{ШИМ}} = 0; \quad (7)$$

$$T_{\min} = T_{\text{УВЧ}} + T_{\text{ГШ}}\beta_1, \quad t_{\text{ШИМ}} = t_{\text{АИМ}}. \quad (8)$$

Размах диапазона измерений соответствует

$$dT = T_{\max} - T_{\min} = T_{\text{ГШ}}(\beta - \beta_1). \quad (9)$$

Из (7)–(9) следует, что необходимый диапазон измерений можно получать не изменением эффективных температур опорных источников шума, в частности согласованной нагрузки вентиля, как это выполнено в [1], а преобразованием параметров ответвителя, варьируя значения переходного ослабления при передаче сигнала генератора шума из основного канала в выходные плечи вторичного канала. Таким образом, задача расширения или сужения границ диапазона измерений является параметрической и заключается в изменении геометрических размеров ответвителя, обеспечивающих в заданной полосе частот необходимое переходное ослабление. При увеличении  $\beta_1$  диапазон измерений сужается и при  $\beta = \beta_1$ , когда равные мощности сигнала генератора шума будут ответвляться в различных направлениях, сольётся в точку.

Изменения значений переходного ослабления  $\beta, \beta_1$  ответвителя можно выполнить варьированием как длины области связи линий передачи, так и зазора между ними. На рис. 3 показан график зависимости переходного ослабления  $\beta^*$  в связанных полосковых линиях передачи, расположенных на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью 10, если зазор между ними составляет 1–3 мм. График приведён для частоты 3 ГГц в результате моделирования ответвителя в программной среде Microwave Office 2009. Значения  $\beta^*$  были получены для таких длин связанных линий, при которых поступающие в оба плеча вспомогательного канала сигналы одинаковы, т. е. когда выполняется условие равенства значений переходного ослабления  $\beta = \beta_1$ .

При исследовании биологических сред наибольший интерес представляют температуры в интервале 2–50 °С (295–325 К). С позиции радиотерметрических измерительных систем данный диапазон можно классифицировать как узкий. Рассмотрим последовательность определения геометрических характеристик ответвителя для заданных минимальной  $T_{\min}$  и максимальной  $T_{\max}$  границ измерительного диапазона.

В качестве исходной информации для моделирования выберем значение переходного ослабления ответвителя  $\beta^* = -20 \dots -35$  дБ. Предпочтение следует отдавать более слабой связи между линиями, чтобы минимизировать ответвление сигнала из вспомогательного канала в основной и тем самым минимизировать потери полезного антенного сигнала при его прохождении через ответвитель. Влияние переходного ослабления на точность измерений рассмотрим ниже. Для выбранного  $\beta^*$  определим зазор между линиями. Например, для частоты 3 ГГц можно воспользоваться графиком на рис. 3. Аналогичные графики можно построить и для других частот, используя упомянутый выше программный продукт.

После выбора зазора между связанными линиями дальнейшее моделирование параметров ответвителя производится изменением размеров области связи линий передачи методом подбора. Для узкого диапазона измерений параметры  $\beta$ ,  $\beta_1$  имеют близкие значения, поэтому определение размеров начинают от длины, соответствующей выбранному значению  $\beta^*$ , когда выполняется равенство  $\beta = \beta_1$ . В этой точке происходит смена режима работы ответвителя, и он переходит из противонаправленного режима в сонаправленный. Уменьшение длины связанных линий выполняют с шагом 0,01 мм. На каждом шаге с использованием программной среды моделирования Microwave Office определяют пару значений переходного ослабления  $\beta$ ,  $\beta_1$ . На этом же шаге для известной эффективной температуры  $T_{увч}$  собственных шумов линейного измерительного тракта находят расчётное значение  $\beta_{1расч}$  по формуле, выведенной из совместного решения уравнений (7), (8):

$$\beta_{1расч} = \beta (T_{min} - T_{увч}) (T_{max} - T_{увч}). \quad (10)$$

Подставив в (10) значение  $\beta$ , определяют  $\beta_{1расч}$  и сравнивают его с вычисленным в программе значением  $\beta_1$ . Если  $\beta_1 > \beta_{1расч}$ , то переходят к следующему шагу изменения длины связанных линий и выше приведённые операции повторяются. Если  $\beta_1 \approx \beta_{1расч}$ , то процесс моделирования ответвителя завершается.

По данному алгоритму был спроектирован ответвитель на частоту 3 ГГц для согласованного основного канала. Ответвитель разрабатывали для диапазона измеряемых температур 295—325 К и приведённых к входу усилителя высоких частот собственных шумов измерительного тракта с эффективной температурой 70 К. Для значений переходного ослабления  $\beta = -26,05$  дБ,  $\beta_1 = -26,68$  дБ, длина связанных линий составила 13,42 мм при зазоре между ними 2,04 мм.

Ответвитель относится к взаимному реактивному устройству, поэтому в нём происходит не только передача электромагнитной энергии из основного канала во вспомогательный, но и отбор некоторой части распространяющегося во вспомогательном канале высокочастотного сигнала в основной. На рис. 2, б приведена схема направлений ответвления сигнала антенны из вспомогательного канала в основной. На входе усилителя высоких частот измеряемый сигнал уменьшается на величину, пропорциональную  $\gamma = 1 - \beta - \beta_1$ . То же самое имеет место и для других сигналов, распространяющихся в обоих направлениях. В этом случае уровни сформированных во входном узле сигналов будут отличаться от (1)—(3) и для сигналов А, В, С составят, соответственно:

$$\begin{aligned} T(1-R)(1-\beta-\beta_1) + T_{гш}\beta + T_{гш}\beta_1 R(1-\beta-\beta_1) + \\ + T_{увч}R(1-\beta-\beta_1)^2 + T_{увч}; \\ T(1-R)(1-\beta-\beta_1) + T_{гш}\beta R(1-\beta-\beta_1) + \\ + T_{гш}\beta_1 + T_{увч}R(1-\beta-\beta_1)^2 + T_{увч}; \\ T_{гш}\beta(1-\beta-\beta_1) + T_{гш}\beta_1 + T_{увч}(1-\beta-\beta_1)^2 + T_{увч}. \end{aligned}$$

Проведём преобразования, аналогичные рассмотренным выше, и получим выражения для определения длительности соответственно широтно-импульсного и исследуемого сигналов:

$$\begin{aligned} t_{шим} = (1-R)\gamma(T_{увч}\gamma + T_{гш}\beta - T) t_{аим} / [T_{гш}(\beta - \beta_1)(1-R\gamma)]; \\ T = T_{увч}\gamma + T_{гш}\beta - T_{гш}(\beta - \beta_1) [(1-R\gamma)t_{шим} / (1-R)\gamma t_{аим}]. \quad (11) \end{aligned}$$

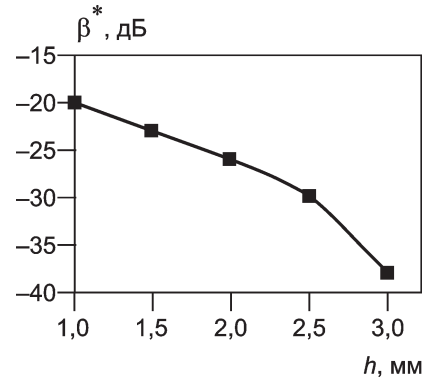


Рис. 3. Зависимость переходного ослабления от зазора между связанными линиями передачи (микрополосковые линии с лицевой связью, расположенные на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью 10)

Максимальная  $T_{max}$  и минимальная  $T_{min}$  границы диапазона измерений соответственно определяют из (11) для  $t_{шим} = 0$ ,  $t_{шим} = t_{аим}$ :

$$T_{max} = T_{увч}\gamma + T_{гш}\beta; \quad (12)$$

$$T_{min} = T_{увч}\gamma + T_{гш}\beta - T_{гш}(\beta - \beta_1) [1 - R\gamma] / [(1 - R)\gamma]. \quad (13)$$

В соотношениях (12), (13) конечное ответвление части сигнала из вторичного канала в первичный непосредственно связано со значением  $\gamma$ . Если  $\gamma \approx 1$  и данным ответвлением сигналов можно пренебречь, то получим формулы (7), (8).

Рассмотрим влияние вторичного канала ответвителя на первичный, а также возникающие при этом погрешности. Для этого вычтем (11) из (6) и определим абсолютную погрешность:

$$\Delta T = T_{увч}(\beta + \beta_1) + T_{гш}(\beta - \beta_1) [t_{шим}(\beta + \beta_1) / \gamma t_{аим}(1 - R)]. \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что абсолютная погрешность зависит от длительности  $t_{шим}$  и при  $t_{шим} = t_{аим}$  принимает максимальное значение, соответствующее нижней границе диапазона измерений:

$$\Delta T_{max} = (\beta + \beta_1)(T_{увч}) + T_{гш}[(\beta - \beta_1)\gamma / (1 - R)]. \quad (15)$$

По формуле (15) можно оценить погрешность для известных шумовых температур усилителя высокой частоты и генератора шума. Для этого надо учесть коэффициенты переходного ослабления сигналов в ответвителе и отражения на границе антенны с объектом. С другой стороны, из этой формулы можно найти такие значения переходного ослабления между связанными линиями, для которых погрешность не выходила бы за заданный предел, определяемый  $\Delta T_{max}$ . Для этого решим равенство (15) относительно коэффициентов переходного ослабления, приняв во внимание, что различия между их значениями небольшие и можно считать, что  $\beta = \beta_1 = \beta^*$ . Используя выражение (9), определим, что переходное ослабление должно удовлетворять следующему неравенству:

$$\beta^* \leq \Delta T_{max} / 2 [\Delta T_{max} + T_{увч} + (T_{max} - T_{min}) / (1 - R)]. \quad (16)$$

Значения коэффициента  $R$  из (16) зависят от многих факторов, таких как диэлектрическая проницаемость биологических тканей и т.д.

ческого объекта в месте приложения аппликаторной антенны, качество контакта и т. д., т. е.  $R$  относится к трудно учитываемым параметрам, который может варьироваться в широких пределах и при каждом измерении принимать различные значения. В частности, при исследовании биологических сред коэффициент  $R$ , как правило, изменяется в диапазоне 0,1—0,5. Из (16) следует, что чем больше коэффициент отражения, тем меньшее значение  $\beta^*$  необходимо выбирать, чтобы обеспечить заданную точность. После подстановки в (16)  $R = 0,5$  запишем окончательное выражение для определения переходного ослабления  $\beta^*$ , заданное в качестве исходной информации в начале моделирования ответвителя:

$$\beta^* \leq \Delta T_{\max} / [2(\Delta T_{\max} + T_{\text{увч}}) + 4(T_{\max} - T_{\min})]. \quad (17)$$

Если  $\beta^*$  будет удовлетворять неравенству (17), тогда влиянием погрешности, возникающей в результате передачи сигналов из вспомогательного канала в основной, можно пренебречь.

При проектировании данного блока номинальную выходную мощность генератора шума (см. рис. 1, элемент 6), выраженную через эквивалентную эффективную шумовую температуру, определяли по формуле, найденной из совместного решения выражений (7), (8):

$$T_{\text{ГШ}} = T_{\max} - T_{\min} / (\beta - \beta_1). \quad (18)$$

После подстановки в (18) переходного ослабления ответвителя выходной сигнал генератора шума составил  $10^5$  К.

После изготовления описанного входного блока потребовалась калибровка радиотермометра, так как собственные шумы высокочастотного усилительного тракта точно не известны. В процессе настройки на выбранный диапазон регулировали выходную мощность сигнала генератора шума. Для этого использовали стенд, описанный в [9]. В термостат заливали водный раствор на основе глицерина, хорошо моделирующий кожно-мышечную ткань. Антенну-аппликатор размещали в верхней части термостата и устанавливали на радиопрозрачном дне водонепроницаемого тубуса. В нижней части находился электронагреватель и перемешивающее устройство. Температуру жидкости измеряли установленным на тубусе контактными термометром, выполненным на основе интегральной схемы DS7505 с абсолютной погрешностью представления результатов  $\pm 0,1$  °С в диапазоне 20—50 °С. Температуру термостата устанавливали равной верхней границе диапазона измерений. При выключенной широтно-импульсной модуляции ( $t_{\text{ШИМ}} = 0$ ) сигнал генератора шума с эффективной шумовой температурой  $T_{\text{ГШ}}$  регулировали до момента исчезновения на выходе радиотермометра сигналов с частотой амплитудно-импульсной модуляции. Аналогичным образом регулировку выходного сигнала генератора шума можно выполнить и по нижней границе диапазона измерений, подавая на антенну сигнал, определяющий нижнюю границу, предварительно установив фиксированную длительность широтно-импульсного сигнала  $t_{\text{ШИМ}} = t_{\text{АИМ}}$ .

После настройки выходного сигнала генератора шума размах диапазона измерений определяется разностью значений переходных ослаблений  $\beta$ ,  $\beta_1$  ответвителя и закладывается в процессе моделирования его характеристик и параметрической оптимизации.

В ходе экспериментальных исследований с применением описанного стенда для различных температур жидкости в термостате была получена калибровочная характеристика. Интегральная погрешность нелинейности характеристики в диапазоне температур 30—50 °С не превысила 1 °С. Было проверено влияние коэффициента отражения на границе антенны с объектом на калибровочную характеристику. Изменения коэффициента отражения варьировались в пределах 0,1—0,6 соответствующим изменением процентного соотношения глицерина в воде. Средние квадратические отклонения в различных точках полученных характеристик не превысили 0,65 °С.

Таким образом, в радиотермометре с установленным на входе вентильным устройством нижнюю границу диапазона измерений определяет термодинамическая температура согласованной нагрузки, и изменить эту границу можно только её нагревом или охлаждением, что требует определённых энергетических затрат. В радиотермометре с модернизированным входным блоком данный недостаток отсутствует, поскольку нижнюю и верхнюю границы можно варьировать в больших пределах коррелирующей характеристик ответвителя.

Научное исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 15-07-04971) и Минобрнауки России в рамках проекта 8.909.2014/К.

## Литература

1. Филатов А. В., Леханов А. Г., Убайчин А. В. Микроволновый радиотермометр для измерения глубинных температур биологических объектов неинвазивным методом // Измерительная техника. 2015. № 4. С. 50—54.
2. Klemetsen Q., Birkelund Y., Jacobsen S. K., Maccarini P. F., Stauffer P. R. Design of medical radiometer front-end for improved performance // Prog. Electromag. Res. 2011. V. 27. P. 289—306.
3. Хоперсков А. В., Храпов С. С., Новочадов В. В., Бурнос Д. В. Влияние особенностей мелкомасштабной структуры молочной железы на распределение глубинной температуры при использовании радиотермометрической диагностики // Вестник Волгоградского государственного университета. 2014. Сер. 1. № 6 (25). С. 60—68.
4. Asimakis N. P., Karanasiou I. S., Uzunoglu N. K. Non-invasive microwave radiometric system for intracranial applications: a study using the conformal L-notch microstrip patch antenna // Prog. Electromag. Res. 2011. V. 117. P. 83—101.
5. Троицкий В. С. К теории контактных радиометрических измерений внутренней температуры тел // Известия вузов. Радиофизика. 1981. Т. 14. № 9. С. 1054—1061.
6. Филатов А. В. Нулевой метод в радиометрических измерениях. Изд-во Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2010.
7. Филатов А. В. Новый подход к построению радиотехнических СВЧ-устройств пассивной локализации на принципе синхронного совмещения двух видов импульсной модуляции // Доклады ТУСУР. 2011. № 2 (24). Ч. 3. С. 20—26.
8. Филатов А. В., Убайчин А. В. Приемный блок нулевого модифицированного микроволнового радиометра для исследования объектов в ближней зоне антенны // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 1. С. 82—86.
9. Маречек С. В., Поляков В. М. Влияние структуры биоткани на результаты СВЧ-термометрических измерений // Успехи современной радиоэлектроники. 2001. № 11. С. 21—30.

Дата принятия: 28.06.2016.