

## Принципы построения и пути дальнейшего совершенствования многоканальных многочастотных радиотермографов

### Аннотация

Рассмотрены принципы построения и алгоритм автоматизированного контроля степени рассогласования на границе раздела сред «антенна-биологический объект» в процессе проведения радиотермометрических измерений. Приведены результаты реализации данного алгоритма при разработке пятиканального двухчастотного медицинского радиотермографа. Сформулированы задачи дальнейших исследований, направленных на повышение помехоустойчивости многоканальных многочастотных радиотермографов.

### Введение

Метод неинвазивного измерения глубинных температур тела человека, так называемая микроволновая радиотермометрия, основан на регистрации собственного теплового излучения тканей в микроволновом диапазоне частот. Этот метод позволяет измерять излучение, выходящее с глубины до нескольких сантиметров, интенсивность которого определяется абсолютной температурой в этом слое ткани. Съем информации осуществляется посредством антенн-аппликаторов, установленных на поверхности тела. Данный метод применяется для выявления температурных аномалий, часто обусловленных онкологическими заболеваниями [1]-[10].

При измерении радиометром радиоярких температур чрезвычайно важную роль играет согласование антенны со средой или объектом измерения. В результате рассогласования на границе раздела сред «антенна-биологический объект» возникает частичное отражение падающей волны. Это приводит к тому, что измеряемая радиометром антенная температура будет отличаться от яркостной температуры объекта, отчетливо возникает дополнительная погрешность ее измерения. Величина рассогласования определяется коэффициентом отражения, показывающим, какая часть энергии падающей волны отразилась в обратном направлении. Априорная оценка величины коэффициента отражения не представляется возможной из-за технологического разброса параметров антенн и различия диэлектрических свойств исследуемых объектов и сред.

В настоящей работе рассмотрены принципы построения многоканальных многочастотных радиотермографов и алгоритм автоматизированного контроля степени рассогласования на границе раздела сред «антенна-биологический объект» в процессе проведения радиотермометрических измерений. Приведены результаты использования данного алгоритма при создании пятиканального двухчастотного медицинского радиотермографа, в котором реализована указанная функция. Сформулированы задачи дальнейших исследований, направленных на повышение помехоустойчивости многоканальных многочастотных радиотермографов.

### Основная часть

Многоканальный радиотермограф позволяет снимать температурную информацию последовательно во времени в нескольких зонах тела пациента как с поверхности тела, так и с его глубинных структур. На основе этой информации строятся радиотепловые карты – динамические распределения интенсивности радиотеплового излучения. При этом один радиотермометрический приемник можно использовать для аналоговой обработки сигналов от нескольких антенн-аппликаторов, подключая их последовательно во времени к его входу. Оценка физиологического состояния организма производится посредством анализа радиотепловых карт. Реальная глубина измерения тепловых полей данным методом может составлять несколько сантиметров.

Структурная схема радиотермометрического приемника показана на рис. 1. В состав радиотермометрического приемника входят:

СВЧ-циркулятор, малошумящие усилители (LNA1, LNA2), полосовой фильтр (BPF), амплитудный детектор (Ampl. Det.), генератор шума (NG), согласованная нагрузка  $R_L$  и СВЧ-коммутатор (SW).

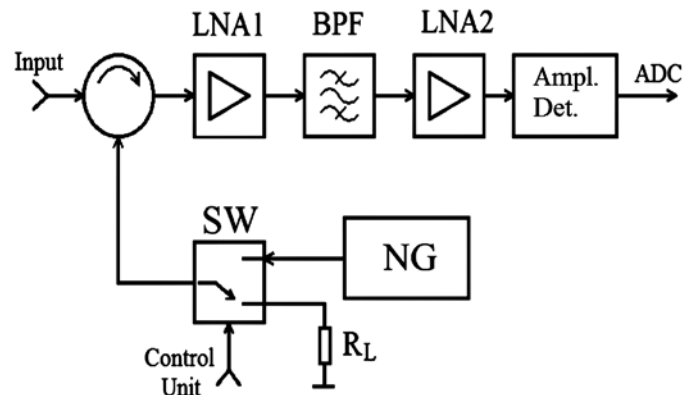


Рис. 1. Структурная схема радиотермометрического приемника

Для осуществления возможности автоматизированного контроля степени рассогласования антенн с биологическим объектом в процессе его работы в определенные части периода модуляции (временные интервалы) в соответствии с сигналами устройства управления (Control Unit) коммутируются антенны-аппликаторы на входе радиотермометрического приемника, а также генератор шума (NG), согласованная нагрузка  $R_L$  на нижнем входе циркулятора. В результате измерения напряжений на выходе радиотермометрического приемника за соответствующие временные интервалы получаем систему уравнений

$$\begin{cases} U_{AL} = [T_B(1-r) + T_L r]K + U_0; \\ U_{NG} = KT_{NG} + U_0; \\ U_L = KT_L + U_0; \\ U_{ANG} = [T_B(1-r) + T_{NG}r]K + U_0, \end{cases}$$

где  $T_B$  – измеряемая радиояркая температура;  $r$  – коэффициент отражения на границе раздела сред «антенна-биологический объект»;  $T_L$  – температура согласованной нагрузки циркулятора;  $K$  – крутизна вольт-градусной характеристики радиотермометрического приемника;  $T_{NG}$  – температура встроенного генератора шума;  $U_0$  – смещение шкалы напряжений на выходе радиотермометрического приемника. Здесь и далее предполагается, что собственными шумами радиотермометрического приемника с учетом радиотермометрического выигрыша можно пренебречь.

Решение системы из четырех уравнений с четырьмя неизвестными дает

$$T_B = \frac{T_{NG}(U_L - U_{AL}) - T_L(U_{NG} - U_{ANG})}{U_{NG} + U_{ANG} - U_L - U_{AL}};$$

$$r = \frac{U_{ANG} - U_{AL}}{U_{NG} - U_L};$$

$$K = \frac{U_{NG} - U_L}{T_{NG} - T_L};$$

$$U_0 = \frac{U_L T_{NG} - U_{NG} T_L}{T_{NG} - T_L}.$$

Таким образом,  $T_B$ ,  $r$ ,  $K$  и  $U_0$  полностью определяются по результатам четырех измерений, при этом автоматически учитывается степень рассогласования антенны с телом человека, что повышает точность измерения радиояростной температуры. По величине измеренного коэффициента отражения на входе радиотермографа можно контролировать исправность антенны и правильность ее установки на биологическом объекте. По полученным данным строится тепловая карта, соответствующая обследуемой области биологического объекта.

Использование в радиотермографе нескольких радиометрических приемников разных частотных диапазонов позволяет получать информацию о температурах биологического объекта на разной глубине и после обработки данных получать объемные распределения тепловых полей. Это способствует более точной локализации тепловых аномалий, которые связаны с наличием патологических изменений тканей. На *рис. 2* представлена структурная схема пятиканального двухчастотного радиотермографа.

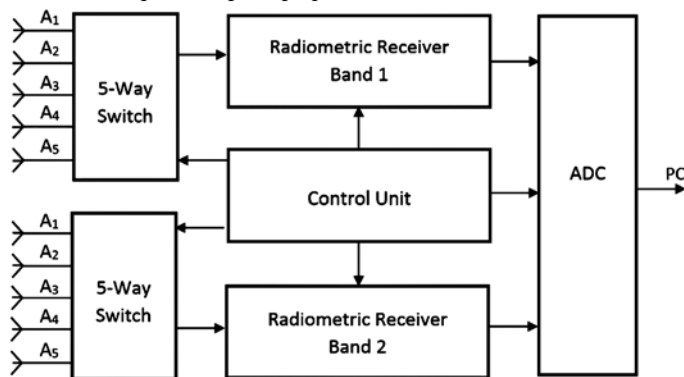


Рис. 2. Структурная схема пятиканального двухчастотного радиотермографа

Радиометрические приемники диапазонов 1 и 2 идентичны (*рис. 2*). Приемники отличаются друг от друга диапазонами частот применяемых циркуляторов и полосовых фильтров. Предполагается, что антенны-аппликаторы, подключаемые ко входам 1...5 пятиканального СВЧ-переключателя (5-Way Switch), являются широкополосными и обеспечивают эффективный прием сигналов от биологического объекта в первом и втором частотных диапазонах. Управление переключением входных СВЧ-переключателей и подключением генератора шума и эталонных нагрузок к циркуляторам радиометрических приемников осуществляется при помощи схемы управления и синхронизации (Control Unit). Вначале при помощи двухканального переключателя (2-Way Switch) к переключателю антенн подключается радиометрический приемник первого диапазона и последовательно во времени «опрашиваются» антенны 1...5, в соответствии с описанным выше алгоритмом формируются сигналы, которые поступают на вход радиометрического приемника. Затем к переключателю антенн (5-Way Switch) подключается радиометрический приемник второго диапазона и на его вход последовательно во времени поступают в соответствии с упомянутым алгоритмом сигналы во втором частотном диапазоне. Сигналы с выходов радиометрических приемников первого и второго диапазонов поступают на аналого-цифровой преобразователь и далее на персональный компьютер, в котором осуществляются дальнейшая их обработка и построение 3D-изображения температурного поля внутри исследуемого органа.

Внешний вид пятиканального двухчастотного радиотермографа представлен на *рис. 3*.

В данном радиотермографе используются два пятиканальных радиометрических приемника диапазонов длин волн 40 и

20 см, выполненные с использованием МИС и печатного монтажа. На *рис. 4* представлены типовые осциллограммы напряжений на выходе радиометрического приемника первого частотного диапазона за два периода модуляции в соответствии с описанным выше алгоритмом при подключении согласованной нагрузки или антенны только к одному из входов радиотермографа. На представленных осциллограммах короткие импульсы большой амплитуды соответствуют отраженной мощности на временном интервале подключения к циркулятору встроенного генератора шума.

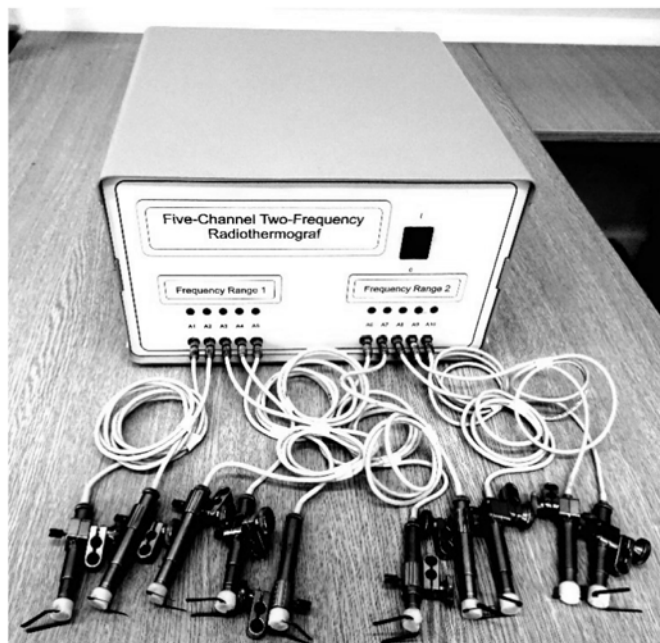


Рис. 3. Внешний вид пятиканального двухчастотного радиотермографа

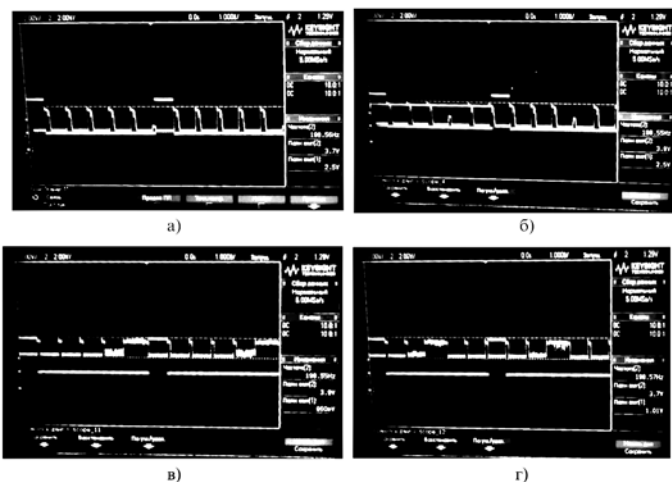


Рис. 4. Типовые осциллограммы напряжений на выходе радиометрического приемника: а) нагрузка 50 Ом подключена к первому антенному входу; б) нагрузка 50 Ом подключена ко второму антенному входу; в) антенна подключена к первому антенному входу; г) антенна подключена к третьему антенному входу

Развитие сетей средств связи и увеличение источников излучения в микроволновом диапазоне привели к заметному ухудшению помеховой обстановки в частотных диапазонах медицинских диагностических приборов, основанных на методе микроволновой радиотермометрии. В работе [9] рассмотрены способы повышения помехозащищенности микроволновых радиотермографов за счет применения поглощающих материалов на внешней поверхности экранирующих корпусов антенн-аппликаторов. Дальнейшее повышение помехоустойчивости медицинских радиотермографов, на наш взгляд, свя-

зано с исследованием характеристик помех в рабочих диапазонах частот и выбором способа их подавления с учетом специфики метода радиотермометрии.

## Заключение

Предложенный алгоритм автоматизированного контроля степени рассогласования антенн с биологическим объектом использован при создании пятиканального двухчастотного радиотермографа, обеспечивающего возможность измерения радиоярких температур биологического объекта на различной глубине с последующей интерполяцией результатов измерений и 3D-визуализацией распределения температур по объему биологического объекта.

Пути дальнейшего совершенствования медицинских радиотермографов являются комплексное исследование помеховой обстановки в рабочих диапазонах частот и выбор метода подавления помех с последующей разработкой алгоритма и программы обработки принимаемых радиометрических сигналов с целью повышения помехоустойчивости радиотермографа.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения соглашения № 19-19-00349-П от 19.05.2022 «Создание методики и многоканального многочастотного СВЧ-радиотермографа на основе монолитных интегральных схем для нахождения 3D-распределения и динамики радиояркой температуры в глубине тела человека».*

### Список литературы:

1. *Bounas P. et al.* Carotid thermal heterogeneity detected by microwave radiometry is associated with thin cap fibroatheroma and plaque rupture in patients presenting with acute myocardial infarction // *Journal of the American College of Cardiology*. 2022. Vol. 79. № 9\_Supplement. PP. 950-950.
2. *Levshinskii V. et al.* Using AI and passive medical radiometry for diagnostics (MWR) of venous diseases // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2022. Vol. 215. P. 106611.
3. *Salvado R. et al.* Textile materials for the design of wearable antennas: A survey // *Sensors*. 2012. Vol. 12. № 11. PP. 15841-15857.
4. *Deaett M.A., Weedon W.H. III* Method for constructing antennas from textile fabrics and components / Patent US. № 2005235482. 2005.
5. *Shi J. et al.* Smart textile-integrated microelectronic systems for wearable applications // *Advanced Materials*. 2019. Vol. 32. № 5. PP. 1-37.
6. *Schneegass S., Amft O.* Introduction to smart textiles // *Smart Textiles: Fundamentals, Design, and Interaction*. – Springer, Cham., 2017. PP. 1-15.

7. *Martinez I. et al.* Compact, low-profile and robust textile antennas with improved bandwidth for easy garment integration // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. PP. 77490-77500.
8. *Kuang Y. et al.* Design and electromagnetic properties of a conformal ultra wideband antenna integrated in three-dimensional woven fabrics // *Polymers*. 2018. Vol. 10. № 8. PP. 1-10.
9. *Leushin V.Yu., Gudkov A.G., Porokhov I.O., Vesnin S.G., Sedankin M.K., Sidorov I.A., Solov'ev Yu.V., Agasieva S.V., Chizhikov S.V.* Possibilities of Increasing the Interference Immunity of Radiothermograph Applicator-Antennas for Brain Diagnostics // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022. Vol. 337. P. 113439.
10. *Vesnin S.G., Sedankin M.K., Ovchinnikov L.M., Gudkov A.G., Leushin V.Yu., Sidorov I.A., Goryanin I.I.* Portable Microwave Radiometer for Wearable Devices // *Sensors and Actuators A: Physical A*. 2021. Vol. 318. P. 112506.

*Виталий Юрьевич Леушин,*  
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,  
*Александр Григорьевич Гудков,*  
д-р техн. наук, профессор,  
*Игорь Александрович Сидоров,*  
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,  
кафедра «Технологии приборостроения»,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,  
*Александр Викторович Королев,*  
ст. научный сотрудник,  
*Сергей Геннадьевич Рыков,*  
ведущий специалист,  
ООО «НПИ ФИРМА «ГИПЕРИОН»,  
*Сергей Владимирович Чижиков,*  
аспирант,  
кафедра «Технологии приборостроения»,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,  
*Светлана Викторовна Агасиева,*  
канд. техн. наук, доцент,  
кафедра нанотехнологий и  
микросистемной техники,  
ФГАОУ ВО «Российский университет  
дружбы народов»,  
*Игорь Олегович Порохов,*  
канд. техн. наук, инженер 1-й категории,  
АО «ЦНИРТИ им. акад. А.И. Берга»,  
г. Москва,  
e-mail: ooo.giperion@gmail.com

**ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ,  
РУКОВОДИТЕЛЕЙ СЛУЖБ ИНФОРМАЦИИ И БИБЛИОТЕК!**

**ПРЕДЛАГАЕМ ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ  
«МЕДИЦИНСКАЯ ТЕХНИКА»**

**НА 2023 ГОД.**

**В редакции можно оформить и оплатить льготную подписку с любого месяца.**

**Стоимость подписки : 1500 руб. – за один номер,**

**4500 руб. – на первое полугодие 2023 года (3 номера), 9000 руб. – на 2023 год (6 номеров).**

**Наши тел.: (495) 695-10-70, 695-10-71.**