

УДК 621.382

## Перспективы микроминиатюризации многоканальных многочастотных радиотермографов

<sup>1</sup> Гудков А. Г., <sup>1</sup> Веснин С. Г., <sup>1,2</sup> Соловьев Ю. В.,

<sup>3</sup> Тихомиров В. Г., <sup>2</sup> Попов В. В.

<sup>1</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана (национальный университет)  
ул. 2-я Бауманская, д. 5, Москва, 105005, Российская Федерация  
profgudkov@gmail.com

<sup>2</sup> АО «Светлана-Электронприбор»  
просп. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Российская Федерация

<sup>3</sup> СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
ул. проф. Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

Получено: 20 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

**Аннотация:** Настоящая работа посвящена решению фундаментальной научной задачи — разработке научных основ и методологии создания прототипа аппаратно-программного комплекса неинвазивного выявления и локализации патологий живых тканей человека на основе динамического радиотермокартирования, предназначенного для ранней диагностики онкологических заболеваний и мониторинга процессов их лечения, а также может использоваться в персонализированной медицине. Использование современного программного обеспечения и технологии монолитных интегральных схем СВЧ позволят применить новые подходы к разработке принципиально нового устройства — многоканального многочастотного радиотермографа на основе технологии МИС.

**Ключевые слова:** радиотермометрия, радиотермограф, многоканальность, многочастотность.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Перспективы микроминиатюризации многоканальных многочастотных радиотермографов / А. Г. Гудков и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 4. С. 531—547.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018):** Перспективы микроминиатюризации многоканальных многочастотных радиотермографов / А. Г. Гудков, С. Г. Веснин, Ю. В. Соловьев и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 531—547.

## 1. Введение

В настоящее время микроволновые радиотермографы используются для диагностики и контроля лечения заболеваний молочных желез [1—3], для обследования сонных артерий с целью выявления воспаленных атеросклеротических бляшек и пациентов с высоким риском инсульта [4—5], для измерения температуры головного мозга [6—8], в том числе при лечении инсульта и черепно-мозговых травм [9—10], для мониторинга температуры головного мозга в процессе гипотермии [11], для диагностики воспалительных заболеваний суставов [12—13], для диагностики пузырно-мочеточникового рефлюкса у детей [14—15], для оценки функциональной активности бурого жира [16], для диагностики и мониторинга лечений болей поясницы [17—29], для диагностики и мониторинга лечения пациентов с легочными заболеваниями при COVID-19 [20]. К сожалению, стационарные микроволновые радиотермометры невозможно использовать в процессе активной жизнедеятельности человека. Вместе с тем, в последние годы это направление очень востребовано и появились статьи по разработке миниатюрных носимых приборов, которые можно устанавливать на теле человека для проведения динамического мониторинга внутренней температуры [21—27]. В частности, *Z. Popovic* в статье, посвященной перспективам создания носимых беспроводных радиотермометров [24], отмечает, что миниатюризация с использованием монолитной интеграции возможна.

Что касается физиологических особенностей распределения температуры в организме человека, то разница между температурой органов, например, сердца, и кожи варьируется до  $\pm 2^\circ \text{C}$  в течение циркадного цикла для условно здорового человека [28]. Нарушение циркадного ритма может привести к сезонным аффективным расстройствам [29], диабету [30], сердечным заболеваниям [31]. Космонавты, спортсмены, пожарные, солдаты и моряки при работе в сложных условиях и при активных тренировках могут подвергаться воздействию неблагоприятных факторов внешней среды, что приводит к переохлаждению, гипертермии, тепловому удару и обуславливает необходимость мониторинга внутренней температуры тела [1, 32—35].

Другие технологии для измерения внутренней температуры, как правило, инвазивны, неудобны, могут вызывать дискомфорт и дать большую ошибку измерения до  $6^\circ \text{C}$  [36—39], либо имеют высокую стоимость. Однако и разработанные радиотермографы имели ряд недостатков: недостаточная чувствительность и точность измерения температуры, низкая помехозащищенность, значительный вес и большие габаритные размеры. Попытки решения этих проблем предпринимались в [21, 24] за счет разработки компактной версии радиометра на основе схемы *R. Dicke* [40, 41].

По данным работы [24] монолитная интеграция возможна, но именно на монолитных интегральных схемах *GaAs* (*MMICs*). Все компоненты могут быть интегрированы в один небольшой чип. Готовые микросхемы имеют небольшие размеры и могут быть установлены и соединены на гибкой подложке с зондом. Следует заметить, что это не является чипом, т. е. МИС, а лишь ГИС с квазимонолитным исполнением. Для повышения эффективности МР в медицинской практике необходимо создание миниатюрного многоканального многочастотного радиотермографа, обеспечивающего получение информации о внутренних температурах и динамики их изменения во времени в нескольких точках на различной глубине одновременно. При этом ставится задача получения информации о характере распределения температуры по глубине исследуемой области организма за счет построения послойных термокарт или трехмерных температурных полей. Это позволит перейти к динамической МР внутренних тканей и органов и проводить оценку их состояния под влиянием различных нагрузок и функциональных проб.

## 2. Основная часть

Проведенные исследования показали, что построение многочастотного многоканального радиотермографа зависит от ряда факторов: от возможности использования современных технологий МИС СВЧ, от физических параметров исследуемых тканей и органов человека, вида заболевания, а также условий эксплуатации, помеховой обстановки и требований, предъявляемых к разрешающей способности и точности метода. Метод МР можно использовать там, где другие методы сложно или невозможно эксплуатировать: космос, МЧС, Арктика, судебная медицина, спорт, носимые устройства, включая персональную медицину и т. д.

Исследования проводились по следующим направлениям:

1. Поиск оптимальных принципов построения медицинского радиотермографа, предназначенного для измерения радиояркостных температур при диагностике новообразований на ранних стадиях развития и который бы позволил в реальном масштабе времени оценивать изменение температуры по глубине.

2. Исследования по созданию медицинских антенн различных видов для построения многоканальных микроволновых антенных решеток, работающих на нескольких частотах и предназначенных для съема сигналов собственного излучения тела человека в многоканальных многочастотных радиотермографах.

3. Разработка алгоритма работы и программного обеспечения 3D-визуализации данных измерений в многоканальных и многочастотных режимах радиометрии. Разработка алгоритма и программы интерполяции в пространстве 3D распределения и радиояркой температуры в глубине тела человека с учетом специфики параметров многоканального и многочастотного радиометрического приемника.

4. Разработка, изготовление, проведение исследовательских испытаний и апробации прототипа многоканального многочастотного радиотермографа на основе монолитных интегральных схем для нахождения 3D распределения и динамики радиояркой температуры в глубине тела человека.

Результаты характеризуются представленными ниже данными. На рис. 1 показана структурная схема унифицированного электронного модуля многоканального СВЧ тракта для систем радиотермокартирования.

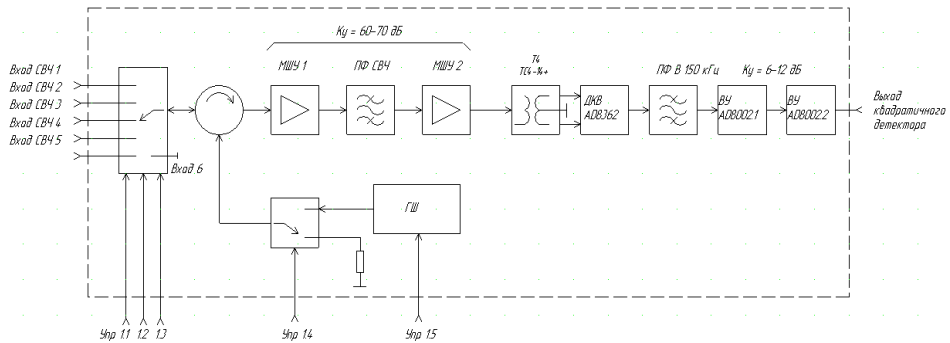


Рис. 1. Структурная схема унифицированного электронного модуля многоканального СВЧ тракта для систем радиотермокартирования.

Fig. 1. Structural diagram of a unified electronic module of a multichannel microwave path for radio thermal mapping systems

На рис. 2 представлена структурная схема прототипа трехканально-двухчастотного радиотермографа.

На рис. 3 представлена структурная схема миниатюрного радиометрического приемника.

На рис. 4—5 представлены поля температур головного мозга, полученных с помощью прототипа многоканального многочастотного радиотермографа и антенн-аппликаторов с применением разработанного программного обеспечения 3D-визуализации данных измерений в многоканальных и многочастотных режимах радиометрии.

Для дальнейшего развития метода МР необходимо решить задачи по следующим направлениям:

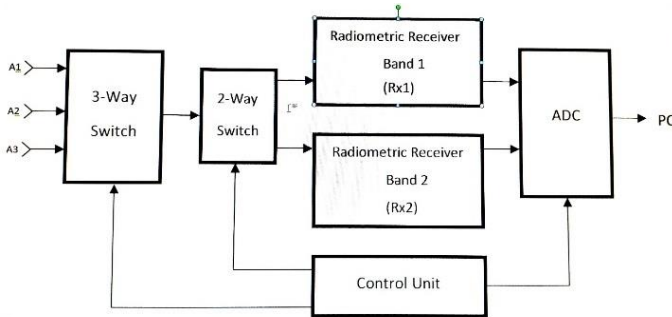


Рис. 2. Структурная схема прототипа трехканального двухчастотного радиотермографа.  
 Fig. 2. Structural diagram of the prototype three-channel dual-frequency radiothermograph

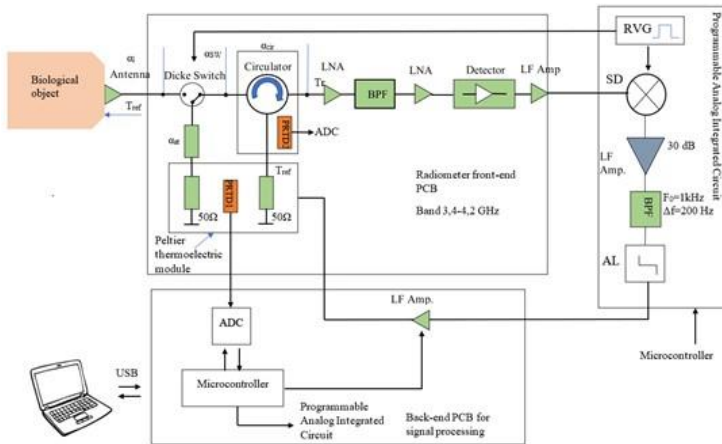


Рис. 3. Структурная схема миниатюрного радиометрического приемника: SD — synchronous detector, SA — selective amplifier; BPF — band-pass filter; RVG — reference voltage generator, PRTD — platinum resistance temperature sensor, LF amp — low frequency amplifier.

Fig. 3. Structural diagram of a miniature radiometric receiver: SD – synchronous detector, SA – selective amplifier; BPF – band-pass filter; RVG – reference voltage generator, PRTD – platinum resistance temperature sensor, LF amp – low frequency amplifier

1. Комплексное исследование помеховой обстановки, выбор метода подавления помех с последующей разработкой алгоритмов и программ обработки принимаемых радиометрических сигналов, обеспечивающих помехоустойчивость радиотермографа;

2. Исследование процессов тепловыделения и теплопередачи в глубине тела человека и разработка методики повышения точности определения радиоярких температур при 3D-визуализации температурных полей в процессе выявления злокачественных новообразований методом микроволновой радиотермометрии;

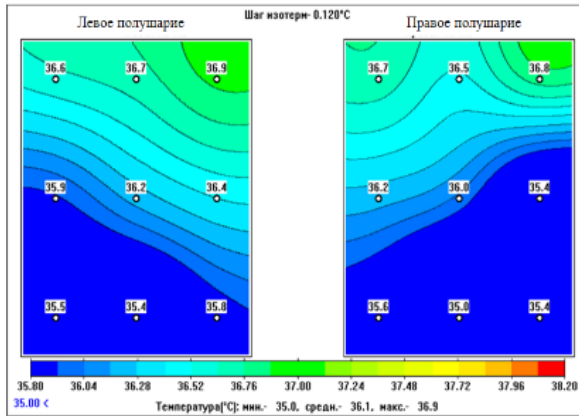


Рис. 4. Поле температуры головного мозга здорового мужчины.

Fig. 4. Temperature field of the brain of a healthy man

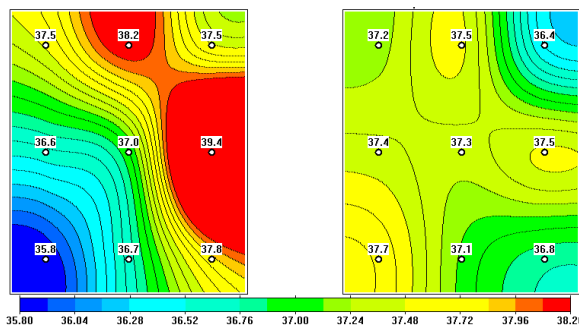


Рис. 5. Поле температуры мозга пациента с ишемическим инсультом.

Fig. 5. Temperature field of the brain of a patient with ischemic stroke

3. Исследование процессов тепловыделения в радиометрическом приемнике на основе МИС технологий, проведение теоретических и экспериментальных исследований по снижению энергопотребления радиометрических приемников на основе МИС, снижению собственных шумов, оценке динамического диапазона в условиях помех и выбор оптимальных схем построения и конструктивных решений.

К важнейшим ожидаемым результатам реализации проекта по первому направлению относятся: результат комплексных исследований на стенде помеховой обстановки с записью спектрограмм помех в частотных диапазонах радиотермометрии; разработанный алгоритм и программный модуль подавления помех при проведении радиотермометрических измерений; скорректированная программа 3D-визуализации температурных полей по глубине биологического объекта с интегрированием в нее модуля подавления помех.

К важнейшим ожидаемым результатам реализации проекта по второму направлению относятся: результат исследований влияния неоднородности диэлектрической проницаемости тканей человека, включая кожу, на точность измерения внутренней температуры; смоделированные процессы тепловыделения и теплопередачи в глубине тела человека при наличии злокачественных новообразований; разработанные методики повышения точности измерения радиоярких температур с помощью многоканального многочастотного радиотермографа на основе совершенствования методов калибровки с применением специального стенда; разработанный фантом злокачественного новообразования для измерения 3D-поля температур внутри тела человека методом микроволновой радиотермометрии; разработанный алгоритм восстановления термодинамической температуры на основе результатов измерения радиояркой температуры на нескольких частотах для построения 3D-поля температур внутри тела пациента; результат комплексных исследований с использованием фантома злокачественного новообразования и стенда, направленных на повышение точности измерения радиояркой температуры многоканального многочастотного радиотермографа на глубине.

К важнейшим ожидаемым результатам реализации проекта по третьему направлению относятся: результат исследования процессов тепловыделения в радиометрическом приемнике на основе МИС технологий; результат исследования влияния погрешностей изготовления на параметры транзисторов для монолитных интегральных схем СВЧ и выявление ключевых факторов, определяющих стабильность работы транзистора для МИС СВЧ в составе миниатюрного радиотермографа; результат численного моделирования перспективных транзисторных гетероструктур в системе широкозонных полупроводниковых материалов группы  $A^3B^5$  для использования в составе активных элементов монолитных микроволновых интегральных схем (МИС СВЧ) энергоэффективного малошумящего усилителя; результат численного моделирования основных параметров малошумящего транзистора с низким потреблением для энергоэффективного усилителя в составе миниатюрного радиотермографа; создание экспериментального образца малошумящего транзистора.

Следует отметить, что даже при полученных сокращениях в размерах прибора тепловыделение сократилось незначительно: температура самого прибора повысилась до 40—50 °С. Это приводит к нагреву окружающих тканей и может исказить картину реального поля внутренних температур биообъекта. Наиболее значимым источником тепловыделения является малошумящие усилители, у которых потребление может достигать сотен милливольт при усилении 20 дБ. Другим значительным источников тепла в

миниатюрном радиометре является референсный источник шума, реализованный на базе согласованной нагрузки, установленной на элементе Пельтье. При высоком коэффициенте усиления петли обратной связи температура согласованной нагрузки в определенные моменты времени может достигать  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что безусловно повышает общую температуру радиометра. Таким образом, для дальнейшей миниатюризации микроволновых радиотермометров необходимо разработка новых подходов к построению радиометров и разработки малошумящих усилителей с низким потреблением, которые обеспечат существенное снижение тепловыделения изделия.

К усилительному тракту радиотермографа традиционно предъявляются чрезвычайно высокие требования. Радиотермографы для медицинского применения имеют, кроме того, еще ряд особенностей (требования высокой миниатюрности; низкой стоимости; погрешности определения температуры тела, не превышающей десятые доли кельвина; рекордно низкого уровня собственных шумов в СВЧ диапазоне и пр.), что еще более ужесточает характеристики усилительного тракта [42—44]. Даже при использовании самых современных схемотехнических решений в области построения медицинских радиотермографов, которые решают многие проблемы предыдущих реализаций, в области требований к самому усилительному тракту не происходит радикального упрощения. Более того, при построении миниатюрного медицинского радиотермографа, возникают дополнительные ограничения.

Одним из существенных ограничений, связанных с наличием внешних активных помех, является требование к динамическому диапазону радиометрического приемника. Это связано с тем, что внешние помехи могут привести к перегрузке усилительных каскадов, возникновению перекрестных помех, и, в конечном счете, к существенным ошибкам измерения уровней собственного излучения тела человека. Известно, что при уменьшении тока потребления уменьшается динамический диапазон малошумящих усилителей, характеризующийся относительным уровнем интермодуляционных искажений (или точкой пересечения третьего порядка). Это приводит к необходимости поиска компромисса между уменьшением энергопотребления и уменьшением динамического диапазона. В рамках продолжения проекта планируется поиск оптимальных соотношений между указанными параметрами.

Низкий уровень принимаемых сигналов собственного излучения тела человека приводит к необходимости обеспечения коэффициента усиления приемного тракта порядка 80 дБ при минимальных уровнях собственных шумов. Построение такого тракта даже на самых современных монолитных МШУ производства ведущих мировых фирм требует нескольких



микросхем с общим потреблением тока в рабочем режиме порядка сотен миллиампер. Такое потребление тока усилительных каскадов в миниатюрном корпусе радиотермографа при существующим на сегодня КПД этих микросхем приводит к значительному повышению температуры внутри корпуса с находящимся там опорным источником шума. Это является значительной проблемой для конструкторов современных миниатюрных медицинских радиотермографов. Существующую проблему можно решить созданием новых активных элементов специализированных монолитных СВЧ микросхем — мал шумящих транзисторов, для которых уже при проектировании гетероструктур будут учитываться требования высокой энергоэффективности, прежде всего низкого тепловыделения в окружающее пространство, малого уровня шумов и достаточного коэффициента усиления [45, 46].

Перспективной системой материалов для решения указанной выше задачи можно вполне обоснованно считать гетероструктуры полупроводников группы  $A^3B^5$ . Накопленный авторами опыт успешного математического моделирования и практической реализации гетероструктурных СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов [47, 48] позволяет говорить об обоснованной вероятности успешного решения поставленной выше проблемы создания специального мал шумящего СВЧ транзистора с пониженным тепловыделением.

### 3. Заключение

Таким образом, проведен анализ по решению фундаментальной научной задачи — разработке научных основ и методологии создания не имеющего аналогов в мире прототипа аппаратно-программного комплекса неинвазивного выявления и локализации патологий живых тканей человека на основе динамического радиотермокартирования, предназначенного для ранней диагностики онкологических заболеваний и мониторинга процессов их лечения, что внесет реальный вклад в решение проблемы разработки и организации производства прибора для персонализированной медицины.

Представленные новые подходы к разработке принципиально нового устройства — многоканального многочастотного радиотермографа на основе технологии МИС — требуют применения современного программного обеспечения и технологии монолитных интегральных схем СВЧ.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения соглашения № 19-19-00349-П.

**Список литературы**

1. Carr K. L. Microwave radiometry : Its importance to the detection of cancer // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 1989ю Vol. 37, no. 12, P. 1862—1869.
2. Modern microwave thermometry for breast cancer. *Journal of Molecular Imaging & Dynamics* / S.Vesnin et al. 2017. URL: <https://www.longdom.org/open-access/modern-microwave-thermometry-for-breast-cancer-2155-9937-1000136.pdf>.
3. Passive microwave radiometry in biomedical studies / I. Goryanin et al. // *Drug Discovery Today.* 2020. Vol. 25(4). P. 757—763.
4. Noninvasive detection of increased carotid artery temperature in patients with coronary artery disease predicts major cardiovascular events at one year : Results from a prospective multicenter study // K. Toutouzas et al. // *Atherosclerosis* 2017. Vol. 262. P. 25—30.
5. The role of microwave radiometry in carotid artery disease. Diagnostic and clinical prospective / M. Drakopoulou et al. // *Current Opinion in Pharmacology.* 2018. Vol. 39. P. 99—104.
6. Real-time passive brain monitoring system using near-field microwave radiometry / E. Groumpas et al. // *IEEE Trans. on Biomedical Engineering.* 2019. Vol. 67, no.1. P. 158—165.
7. Kublanov V. S., Borisov V. I. Biophysical evaluation of microwave radiation for functional research of the human brain // *Proc. IFMBE.* 2017. P. 1045—1048.
8. Use of multichannel microwave radiometry for functional diagnostics of the brain / A. G. Gudkov et al. // *Biomedical Engineering.* 2019. Vol. 53, no.2. P. 108—111.
9. Diagnostic opportunities of noninvasive brain thermomonitoring / D.V. Cheboksarov et al. // *Anesteziologija i Reanimatologija.* 2015. Vol. 60 (1). P. 66—69.
10. Therapeutic Hypothermia Systems / O. A. Shevelev et al. // *Biomed. Eng.* 2021. Vol. 54. P. 397—401.
11. Microwave radiometry for noninvasive monitoring of brain temperature / D. B. Rodrigues et al. In : *Emerging electromagnetic technologies for brain diseases diagnostics, monitoring and therapy.* Springer, Cham, 2018. P. 87—127.
12. Joint microwave radiometry for inflammatory arthritis assessment / K. Laskari et al. // *Rheumatology.* 2020. Vol.59 (4). P. 839—844.
13. Ravi V. M., Sharma A. K., Arunachalam K. Pre-clinical testing of microwave radiometer and a pilot study on the screening inflammation of knee joints // *Bioelectromagnetics.* 2019. Vol. 40, no. 6. P. 402—411.
14. Detection of vesicoureteral reflux using microwave radiometry—system characterization with tissue phantoms / Arunachalam K. et al. // *IEEE Transactions on biomedical engineering.* 2011. Vol. 58, no. 6. P. 1629—1636.
15. Jacobsen S., Klemetsen Ø., Birkelund Y. Vesicoureteral reflux in young children: a study of radiometric thermometry as detection modality using an ex vivo porcine model // *Physics in Medicine & Biology.* 2012. Vol. 57, no. 17. P. 5557—5573.
16. Measurement of brown adipose tissue activity using microwave radiometry and 18F-FDG PET/CT / J. P. Crandall et al. // *Journal of Nuclear Medicine.* 2018. Vol. 59, no. 8. P. 1243—1248.
17. Andreev V. V., Barantsevich E. R. Treatment of acute and chronic pain syndromes in lumbosacral radiculopathy // *Effect. Pharmacother.* 2018. Vol. 4. P. 42—49.
18. Influence of Ambient Temperature on Recording of Skin and Deep Tissue Temperature in Region of Lumbar Spine / A. V. Tarakanov et al. // *European Journal of Molecular & Clinical Medicine.* 2020. Vol. 7(1). P. 21—26.
19. Microwave Radiometry (MWR) temperature measurement is related to symptom severity in patients with Low Back Pain (LBP) / A. V. Tarakanov et al. // *Journal of Bodywork and Movement Therapies.* 2021. Vol. 26. P. 548—552.

20. Passive Microwave Radiometry for the Diagnosis of Coronavirus Disease 2019 Lung Complications in Kyrgyzstan / B. Osmonov et al. // *Diagnostics*. 2021. No. 11(2). P. 259.
21. Momenroodaki P. Noninvasive internal body temperature tracking with near-field microwave radiometry // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2018. Vol. 66 (5). P. 2535—2545.
22. Stable microwave radiometry system for long term monitoring of deep tissue temperature / P. R. Stauffer et al. // *Proc. SPIE* 2013, P. 8584.
23. Wireless system for continuous monitoring of core body temperature / W. Haines et al. // *Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. June 4–9, 2017, Honolulu, USA. 2017. P. 541—543.
24. Popovic Z., Momenroodaki P., Scheeler R. Toward wearable wireless thermometers for internal body temperature measurements // *IEEE Communications Magazine*. 2014. Vol. 52 (10). P. 118—125.
25. Momenroodaki P., Haines W., Popovic Z. Non-invasive microwave thermometry of multi-layer human tissues. In *Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, June 4–9, 2017. Honolulu, USA. P. 1387—1390.
26. Ravi V. M., Arunachalam, K. A low noise stable radiometer front-end for passive microwave tissue thermometry // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 33(6). P. 743—758.
27. Maccarini P.F. et al. A novel compact microwave radiometric sensor to noninvasively track deep tissue thermal profiles. In *2015 European Microwave Conference (EuMC)*. 2015, pp. 690-693.
28. Functional link between distal vasodilation and sleep-onset latency? / K. Kräuchi et al. // *Amer. J. Physiol. – Reg., Integr. Comparative Physiol.* 2000. Vol. 278, no. 3, P. R741—R748.
29. Effects of light treatment on core body temperature in seasonal affective disorder / N. E. Rosenthal et al. // *Biol. Psychiatry*. 1990. Vol. 27, no. 1. P. 39—50.
30. Disruption of circadian rhythms accelerates development of diabetes through pancreatic beta-cell loss and dysfunction / J. E. Gale et al. // *J. Biol. Rhythms*. 2011. Vol. 26, no. 5. P. 423—433.
31. Circadian rhythms govern cardiac repolarization and arrhythmogenesis / D. Jeyaraj et al. // *Nature*. 2012. Vol. 483, no. 7387. P. 96—99.
32. Detection of extravasation of antineoplastic drugs by microwave radiometry / J. Shaeffer et al. // *Cancer Lett.* 1986. Vol. 31, no. 3. P. 285—291.
33. Jacobsen S., Stauffer P. R. Multifrequency radiometric determination of temperature profiles in a lossy homogeneous phantom using a dual-mode antenna with integral water bolus // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2002. Vol. 50, no. 7. P. 1737—1746.
34. Non-invasive temperature profiling using multi-frequency microwave radiometry in the presence of water-filled bolus / S. Mizushima et al. // *IEICE Trans. Electron.* 1991. Vol. 74, no. 5. P. 1293—1302.
35. Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modelling / J. W. Hand et al. // *Phys. Med. Biol.* 2001. Vol. 46, no. 7. P. 1885—1903.
36. Moran D. S., Mendal L. Core temperature measurement // *Sports Med.* 2002. Vol. 32, no. 14. P. 879—885.
37. Byrne C., Lim C. L. The ingestible telemetric body core temperature sensor : A review of validity and exercise applications // *Brit. J. Sports Med.* 2007. Vol. 41, no. 3. P. 126—133.
38. The effect of cool water ingestion on gastrointestinal pill temperature / D. M. Wilkinson et al. // *Med. Sci. Sports Exercise*. 2008. Vol. 40, no. 3. P. 523—528.

39. Accurate temperature imaging based on intermolecular coherences in magnetic resonance / G. Galiana et al. // *Science*. 2008. Vol. 322, no. 5900. P. 421—424.
40. Kraus J. D. *Radio Astronomy*, 2<sup>nd</sup> ed. Cygnus-Quasar Books, 1976, P. 1—3, 20—23, 66.
41. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. *Microwave Remote Sensing : Active and Passive*, Vol. 1 : *Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*. Artech House, 1981, P. 1—3, 20—24, 93—94, 112, 122—123.
42. Klemetsen O. Design and evaluation of a medical microwave radiometer for observing temperature gradients subcutaneously in the human body : PhD thesis. University of Tromso, faculty of science department of physics and technology. Tromso, 2011. 92 p.
43. Development of a miniature microwave radiothermograph for monitoring the internal brain temperature / M. Sedankin et al. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2018. Т. 3(5). С. 26—36.
44. Chupina D. N., Sedankin M. K., Vesnin S. G. Application of modern technologies of mathematical simulation for the development of medical equipment. In 2017 IEEE 11<sup>th</sup> International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). P. 1—5.
45. Gawande R., Bradley R. Low-Noise Amplifier at 2.45 GHz // *Microwave Magazine*. 2009. Vol 11. P. 122—126.
46. A ultrawideband 3–10 GHz low-noise amplifier MMIC using inductive-series peaking technique / Chia-Song Wu et al. // *Electric Information and Control Engineering IEEE*. 2020. Vol. 2. P. 5667—5670.
47. Increasing efficiency of GaN HEMT transistors in equipment for radiometry using numerical simulation / V. Tikhomirov et al. // *Semiconductors*. 2016. Vol. 50, no. 2. P. 244—248.
48. Increasing efficiency of GaN HEMT transistors in equipment for radiometry using numerical simulation / V G. Tikhomirov et al. // *Journal of Physics Conference Series*. 2019. Vol. 1410. Iss. 1. P. 012191.

### Информация об авторах

**Гудков Александр Григорьевич**, профессор Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

**Веснин Сергей Георгиевич**, старший научный сотрудник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

**Соловьев Юрий Владимирович**, заместитель директора по науке АО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

**Тихомиров Владимир Геннадьевич**, доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

**Попов Владимир Васильевич**, президент ПАО «Светлана», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

# Prospects of Microminiaturization of Multichannel Multi-Frequency Radiothermographs

A. G. Gudkov<sup>1</sup>, S. G. Vesnin<sup>1</sup>, Yu. V. Solov'ev<sup>1,2</sup>,  
V. G. Tikhomirov<sup>3</sup>, and V. V. Popov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Bauman Moscow State Technical University*  
5, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russian Federation  
chigikov95@mail.ru

<sup>2</sup> *JSC "Svetlana-Electronpribor"*  
5, Prof. Popov st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation

<sup>3</sup> *St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*  
27, Engels ave., St. Petersburg, 194156, Russian Federation

Received: May 20, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

**Abstract:** *This work is devoted to solving a fundamental scientific problem – the development of scientific foundations and methodology for creating a prototype of a hardware and software complex for noninvasive detection and localization of pathologies of living human tissues based on dynamic radiothermic mapping, designed for early diagnosis of oncological diseases and monitoring of their treatment processes, and can also be used in personalized medicine. The use of modern software and technology of monolithic integrated microwave circuits will allow us to apply new approaches to the development of a fundamentally new device – a multi-channel multi-frequency radiothermograph based on MIC technology.*

**Keywords:** *radiothermometry, radiothermograph, multi-channel, multi-frequency.*

**For citation (IEEE):** A. G. Gudkov, S. G. Vesnin, Yu. V. Solov'ev, V. G. Tikhomirov, and V. V. Popov, "Prospects of Microminiaturization of Multichannel Multi-Frequency Radiothermographs," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 531–547, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.38. (In Russ.).

## Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation under agreement No. 19-19-00349-II.

## References

- [1] K. L. Carr, "Microwave radiometry: its importance to the detection of cancer," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 37, no. 12, pp. 1862–1869, 1989, doi: 10.1109/22.44095.

- [2] S. Vesnin et al., “Modern microwave thermometry for breast cancer,” *Journal of Molecular Imaging & Dynamics*, 2017. URL: <https://www.longdom.org/open-access/modern-microwave-thermometry-for-breast-cancer-2155-9937-1000136.pdf>.
- [3] I. Goryanin et al., “Passive microwave radiometry in biomedical studies,” *Drug Discovery Today*, vol. 25, no. 4, pp. 757–763, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.drudis.2020.01.016.
- [4] K. Toutouzas et al., “Noninvasive detection of increased carotid artery temperature in patients with coronary artery disease predicts major cardiovascular events at one year: Results from a prospective multicenter study,” *Atherosclerosis*, vol. 262, pp. 25–30, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.atherosclerosis.2017.04.019.
- [5] M. Drakopoulou, C. Moldovan, K. Toutouzas, and D. Tousoulis, “The role of microwave radiometry in carotid artery disease. Diagnostic and clinical prospective,” *Current Opinion in Pharmacology*, vol. 39, pp. 99–104, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.coph.2018.02.008.
- [6] E. Groupas, M. Koutsoupidou, I. S. Karanasiou, C. Papageorgiou, and N. Uzunoglu, “Real-Time Passive Brain Monitoring System Using Near-Field Microwave Radiometry,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 67, no. 1, pp. 158–165, Jan. 2020, doi: 10.1109/tbme.2019.2909994.
- [7] V. S. Kublanov & V. I. Borisov, “Biophysical evaluation of microwave radiation for functional research of the human brain”, in *Proc. IFMBE*, pp.1045–1048, 2017.
- [8] A. G. Gudkov et al., “Use of Multichannel Microwave Radiometry for Functional Diagnostics of the Brain,” *Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 108–111, Jul. 2019, doi: 10.1007/s10527-019-09887-z.
- [9] D. V. Cheboksarov et al., “Diagnostic opportunities of noninvasive brain thermomonitoring”, *Anesteziologija i Reanimatologija*, vol. 60 (1), pp. 66–69, 2015
- [10] O. A. Shevelev et al., “Therapeutic Hypothermia Systems,” *Biomedical Engineering*, vol. 54, no. 6, pp. 397–401, Mar. 2021, doi: 10.1007/s10527-021-10048-4.
- [11] D. B. Rodrigues et al., “Microwave radiometry for noninvasive monitoring of brain temperature” in *Emerging electromagnetic technologies for brain diseases diagnostics, monitoring and therapy*, Springer, Cham, 2018.
- [12] K. Laskari et al., “Joint microwave radiometry for inflammatory arthritis assessment,” *Rheumatology*, vol. 59, no. 4, pp. 839–844, Sep. 2019, doi: 10.1093/rheumatology/kez373.
- [13] V. M. Ravi, A. K. Sharma, and K. Arunachalam, “Pre-Clinical Testing of Microwave Radiometer and a Pilot Study on the Screening Inflammation of Knee Joints,” *Bioelectromagnetics*, Jul. 2019, doi: 10.1002/bem.22203.
- [14] K. Arunachalam et al., “Detection of Vesicoureteral Reflux Using Microwave Radiometry—System Characterization With Tissue Phantoms,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 58, no. 6, pp. 1629–1636, Jun. 2011, doi: 10.1109/tbme.2011.2107515.
- [15] S. Jacobsen, Ø. Klemetsen, and Y. Birkelund, “Vesicoureteral reflux in young children: a study of radiometric thermometry as detection modality using an ex vivo porcine model”, *Physics in Medicine & Biology*, vol. 57, no.17, p. 5557, 2012.
- [16] J. P. Crandall et al., “Measurement of Brown Adipose Tissue Activity Using Microwave Radiometry and 18F-FDG PET/CT,” *Journal of Nuclear Medicine*, vol. 59, no. 8, pp. 1243–1248, Feb. 2018, doi: 10.2967/jnumed.117.204339.
- [17] V. V. Andreev, and E. R. Barantsevich, “Treatment of acute and chronic pain syndromes in lumbosacral radiculopathy,” *Effect. Pharmacother.*, vol. 4, pp. 42–49, 2018.
- [18] A. V. Tarakanov et al., “Influence of Ambient Temperature on Recording of Skin and Deep Tissue Temperature in Region of Lumbar Spine,” *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*, vol. 7(1), pp. 21–26, 2020.

- [19] A. V. Tarakanov, A. A. Tarakanov, S. Vesnin, V. V. Efremov, I. Goryanin, and N. Roberts, "Microwave Radiometry (MWR) temperature measurement is related to symptom severity in patients with Low Back Pain (LBP)," *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, vol. 26, pp. 548–552, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jbmt.2021.02.005.
- [20] B. Osmonov et al., "Passive Microwave Radiometry for the Diagnosis of Coronavirus Disease 2019 Lung Complications in Kyrgyzstan," *Diagnostics*, vol. 11, no. 2, p. 259, Feb. 2021, doi: 10.3390/diagnostics11020259.
- [21] P. Momenroodaki, W. Haines, M. Fromandi, and Z. Popovic, "Noninvasive Internal Body Temperature Tracking With Near-Field Microwave Radiometry," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 5, pp. 2535–2545, May 2018, doi: 10.1109/tmmt.2017.2776952.
- [22] P. R. Stauffer et al., "Stable microwave radiometry system for long term monitoring of deep tissue temperature" *Energy-based Treatment of Tissue and Assessment VII. – International Society for Optics and Photonics*, vol. 8584, p. 85840R, 2013.
- [23] W. Haines et al., "Wireless system for continuous monitoring of core body temperature", in *Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Honolulu, USA, June 4–9, 2017.
- [24] Z. Popovic, P. Momenroodaki, and R. Scheeler, "Toward wearable wireless thermometers for internal body temperature measurements," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 10, pp. 118–125, Oct. 2014, doi: 10.1109/mcom.2014.6917412.
- [25] P. Momenroodaki, W. Haines, Z. Popovic, "Non-invasive microwave thermometry of multi-layer human tissues" in *Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Honolulu, USA, June 4–9, 2017.
- [26] V. M. Ravi, and K. Arunachalam, "A low noise stable radiometer front-end for passive microwave tissue thermometry," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 33(6), pp. 743–758, 2019.
- [27] P. F. Maccarini et al., "A novel compact microwave radiometric sensor to noninvasively track deep tissue thermal profiles," in *2015 European Microwave Conference (EuMC)*, pp. 690–693, 2015.
- [28] K. Kräuchi et al., "Functional link between distal vasodilation and sleep-onset latency?" *Amer. J. Physiol. — Reg., Integr. Comparative Physiol.*, 2000, vol. 278, no. 3, pp. R741–R748.
- [29] N. E. Rosenthal et al., "Effects of light treatment on core body temperature in seasonal affective disorder," *Biological Psychiatry*, vol. 27, no. 1, pp. 39–50, Jan. 1990, doi: 10.1016/0006-3223(90)90018-w.
- [30] J. E. Gale, H. I. Cox, J. Qian, G. D. Block, C. S. Colwell, and A. V. Matveyenko, "Disruption of Circadian Rhythms Accelerates Development of Diabetes through Pancreatic Beta-Cell Loss and Dysfunction," *Journal of Biological Rhythms*, vol. 26, no. 5, pp. 423–433, Sep. 2011, doi: 10.1177/0748730411416341.
- [31] D. Jeyaraj et al., "Circadian rhythms govern cardiac repolarization and arrhythmogenesis," *Nature*, vol. 483, no. 7387, pp. 96–99, Feb. 2012, doi: 10.1038/nature10852.
- [32] J. Shaeffer, A. M. El-Mahdi, A. E. Hamwey, and K. L. Carr, "Detection of extravasation of antineoplastic drugs by microwave radiometry," *Cancer Letters*, vol. 31, no. 3, pp. 285–291, Jun. 1986, doi: 10.1016/0304-3835(86)90149-7.
- [33] S. Jacobsen and P. R. Stauffer, "Multifrequency radiometric determination of temperature profiles in a lossy homogeneous phantom using a dual-mode antenna with integral water bolus," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 7, pp. 1737–1746, Jul. 2002, doi: 10.1109/tmmt.2002.800424.

- [34] S. Mizushina et al., “Non-invasive temperature profiling using multi-frequency microwave radiometry in the presence of water-filled bolus,” *IEICE Trans. Electron.*, vol. 74, no. 5, pp. 1293–1302, May 1991.
- [35] J. W. Hand et al., “Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modelling,” *Physics in Medicine and Biology*, vol. 46, no. 7, pp. 1885–1903, Jun. 2001, doi: 10.1088/0031-9155/46/7/311.
- [36] D. S. Moran and L. Mendal, “Core Temperature Measurement,” *Sports Medicine*, vol. 32, no. 14, pp. 879–885, 2002, doi: 10.2165/00007256-200232140-00001.
- [37] C. Byrne and C. L. Lim, “The ingestible telemetric body core temperature sensor: a review of validity and exercise applications,” *British Journal of Sports Medicine*, vol. 41, no. 3, pp. 126–133, Mar. 2007, doi: 10.1136/bjism.2006.026344.
- [38] D. M. Wilkinson, J. M. Carter, V. L. Richmond, S. D. Blacker, and M. P. RAYSON, “The Effect of Cool Water Ingestion on Gastrointestinal Pill Temperature,” *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 40, no. 3, pp. 523–528, Mar. 2008, doi: 10.1249/mss.0b013e31815cc43e.
- [39] G. Galiana, R. T. Branca, E. R. Jenista, and W. S. Warren, “Accurate Temperature Imaging Based on Intermolecular Coherences in Magnetic Resonance,” *Science*, vol. 322, no. 5900, pp. 421–424, Oct. 2008, doi: 10.1126/science.1163242.
- [40] J. D. Kraus, *Radio Astronomy*, 2<sup>nd</sup> ed. Cygnus-Quasar Books, 1976.
- [41] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume 1: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*, Artech House, 1981.
- [42] O. Klemetsen, *Design and evaluation of a medical microwave radiometer for observing temperature gradients subcutaneously in the human body*: PhD thesis. University of Tromsø, faculty of science department of physics and technology, Tromsø, 2011.
- [43] M. Sedankin, D. Chupina, S. Vesnin, I. Nelin, and V. Skuratov, “Development of a miniature microwave radiothermograph for monitoring the internal brain temperature,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 5 (93), pp. 26–36, Jun. 2018, doi: 10.15587/1729-4061.2018.134130.
- [44] D. N. Chupina, M. K. Sedankin, S. G. Vesnin, “Application of modern technologies of mathematical simulation for the development of medical equipment,” in *2017 IEEE 11<sup>th</sup> International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, p. 1–5, 2017.
- [45] R. Gawande and R. Bradley, “Low-Noise Amplifier at 2.45 GHz [TC Contests,” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 11, no. 1, pp. 122–126, Feb. 2010, doi: 10.1109/mmm.2009.935619.
- [46] Chia-Song Wu, Tahyeong Lin, Chien-Huang Chang, and Hsien-Ming Wu, “A ultrawide-band 3–10 GHz low-noise amplifier MMIC using inductive-series peaking technique,” *Electric Information and Control Engineering*, vol. 2, pp. 5667–5670, 2020.
- [47] V. G. Tikhomirov et al., “Optimization of the parameters of HEMT GaN/AlN/AlGaIn heterostructures for microwave transistors using numerical simulation,” *Semiconductors*, vol. 50, no. 2, pp. 244–248, Feb. 2016, doi: 10.1134/s1063782616020263.
- [48] V. G. Tikhomirov, A. G. Gudkov, S. V. Agasieva, D. D. Dynaiev, M. K. Popov, and S. V. Chizhikov, “Increasing efficiency of GaN HEMT transistors in equipment for radiometry using numerical simulation,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1410, no. 1, p. 012191, Dec. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1410/1/012191.

### Information about the authors

**Alexander G. Gudkov**, professor at Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.



**Sergey G. Vesnin**, senior researcher at Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Yuriy V. Solov'ev**, Deputy Director for Science at JSC «Svetlana-Electronpribor», Saint Petersburg, Russian Federation.

**Vladimir G. Tikhomirov**, associate Professor at Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russian Federation.

**Vladimir V. Popov**, president at PJSC «Svetlana», Saint Petersburg, Russian Federation.