

## Микроминиатюризация многоканальных многочастотных радиотермографов

### Аннотация

Разработка сложных технических систем требует перехода от проектирования составных частей системы к комплексному проектированию всей системы. Система, созданная из оптимальных частей, не является оптимальной в целом, поэтому переход от радиотермографа на обычной элементной базе к конструктивному исполнению с использованием монолитной интегральной схемы СВЧ приведет к расширению его функциональных возможностей и существенному уменьшению размеров. В настоящей статье обсуждается вопрос применения доступных и недорогих приборов для ранней диагностики различных заболеваний, а также их использование в персонализированной медицине.

### Введение

Радиотермометры или радиотермографы, позволяющие регистрировать микроволновое излучение биологических тканей, строятся в основном на базе модифицированной или усовершенствованной схемы R. Dicke, предложенной им в 1946 году [1], или схемы приемника прямого усиления [2]. В 1975 году А. Vargot первым предложил использовать для медицинской диагностики информацию о микроволновом излучении биологических тканей, в частности для выявления рака молочной железы [3].

В настоящее время микроволновые радиотермометры используются для диагностики и контроля лечения заболеваний молочных желез [4], [5], обследования сонных артерий с целью выявления воспаленных атеросклеротических бляшек и пациентов с высоким риском инсульта [6], для измерения температуры головного мозга [7], [8], в том числе при лечении инсульта и черепно-мозговых травм [9], и для мониторинга температуры головного мозга в процессе гипотермии [10], а также для диагностики воспалительных заболеваний суставов [11], диагностики пузырно-мочеточникового рефлюкса у детей [12], для оценки функциональной активности бурого жира [13], для диагностики и мониторинга лечений болей в пояснице [14], [15], для диагностики и мониторинга лечения пациентов с легочными заболеваниями при COVID-19 [16]. 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 [17]-[21]. В частности, Z. Rorovic в статье, посвященной перспективам создания носимых беспроводных радиотермометров [19], 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 [22]. Нарушение циркадного ритма может привести к сезонным аффективным расстройствам [23], диабету [24], сердечным заболеваниям [25]. 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 и тепловому удару и обуславливает необходимость мониторинга внутренней температуры тела [4], [26], [27].

Другие технологии для измерения внутренней температуры, как правило, инвазивны, неудобны, могут вызывать дискомфорт и дать большую ошибку измерения, до  $6^\circ\text{C}$  [28], [29], либо имеют высокую стоимость. Однако и разработанные радиотермометры имели ряд недостатков: недостаточные чувствительность и точность измерения температуры, низкую помехозащищенность, значительный вес и большие габарит-

ные размеры. Попытки решения этих проблем предпринимались в [17], [19] за счет разработки компактной версии радиотермометра на основе схемы R. Dicke [30], [31].

По данным работы [19], монолитная интеграция возможна, но именно на монолитных интегральных схемах (МИС) GaAs. 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 гибридно-интегральной схемой (ГИС) с квази-монолитным исполнением. Для повышения эффективности микроволновой радиотермометрии (МР) в медицинской практике необходимо создание миниатюрного многоканального многочастотного радиотермографа, обеспечивающего получение информации о внутренних температурах и динамике их изменения во времени в нескольких точках на различной глубине одновременно. Это позволит перейти к динамической МР внутренних тканей и органов и проводить оценку их состояния под влиянием различных нагрузок и функциональных проб.

### Развитие метода микроволновой радиотермометрии

Развитие метода связано с развитием средств приема излучения нагретых тел в микроволновом диапазоне и, в частности, с работами R. Dicke для нужд радиоастрономии. Совершенствование элементной базы позволило создавать микроволновые радиотермометры существенно меньших размеров, что позволило размещать их на спутниках и в самолетах. Это дало возможность развивать методы дистанционного зондирования Земли. Дальнейшая миниатюризация радиотермометров позволила разместить их на борту беспилотных летательных аппаратов и в наземных машинах. Для решения задач сельского хозяйства на базе многочастотных поляриметрических радиотермометрических систем создаются дистанционные картографирующие системы [32]. Одновременно разрабатываются специализированные радиотермометрические системы для поиска подземных протечек в земляных дамбах и оценки рисков ситуаций [33]. В [19] приведены результаты успешного применения радиотермометра на основе комплементарной структуры металл-оксид-полупроводник в диапазоне микроволновых частот для обнаружения пожаров.

Опыт, накопленный авторами настоящей статьи при решении обозначенных задач, стал основой для разработки микроволновых радиотермометрических систем медицинского назначения для решения задач ранней диагностики злокачественных опухолей и других заболеваний, связанных с внутренней локальной гипертермией [34]. В работе [35] описан прибор, реализованный с использованием СВЧ-монолитных интегральных схем, которые можно приобрести в свободной продаже. В [36] представлена информация о первом коммерческом одноканальном радиотермометре, разработанном под руководством Веснина С.Г., являющегося одним из авторов данной статьи. В [37] представлен миниатюрный вариант радиотермометра. Причем параметры миниатюрного микроволнового радиотер-

ра, характеризующие точность измерения, не уступают параметрам стационарных приборов, а его размеры и вес сократились в сотни раз. Габаритные размеры миниатюрного радиометра составляют  $23 \times 31 \times 15 \text{ мм}^3$ , а масса – 50 г, в то время как масса стационарного прибора составляет 4,5 кг, а габариты –  $450 \times 500 \times 210 \text{ мм}^3$ . При усреднении сигнала в течение 4 с стандартное отклонение  $\delta$  прибора составило  $0,052 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Прибор обеспечивает высокую точность даже при наличии сильных отражений от антенны. В частности, при наличии отражений на входе ( $R^2 = 0,25$ ) погрешность измерения радиояркой температуры составила 0,2 К. То есть если 25 % мощности отражаются от антенны и не поступают в радиометр, то погрешность измерения мощности шумового сигнала изменяется на 0,07 %. Слабое влияние рассогласования антенны на результаты измерения обусловлено тем, что в радиометре используется запатентованная в нескольких странах схема построения миниатюрного балансного нуль-радиометра со следующей схемой компенсации отражений от антенны [38].

На рис. 1 представлена топология СВЧ-части радиометра.

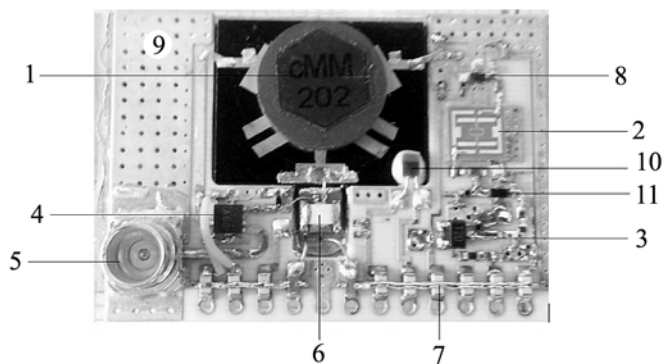


Рис. 1. СВЧ-модуль радиотермометра: 1 – циркулятор; 2 – полосо-пропускающий фильтр (ППФ); 3 – детектор; 4 – SPDT-переключатель; 5 – СВЧ-разъем; 6 – термоэлектрический модуль; 7 – фильтр низких частот; 8, 11 – малошумящий усилитель; 9 – плата радиометра; 10 – датчик температуры

Так же, как и в традиционном радиометре, построенном на основе схемы R. Dicke, в предлагаемой схеме SPDT-переключатель подключает к приемнику либо антенну, либо эталонный источник шума. В качестве опорного источника шума используется миниатюрная СВЧ-нагрузка, установленная на элементе Пельтье. Измеряя ток, проходящий через элемент Пельтье, можно менять температуру СВЧ-нагрузки. Поскольку для согласованной нагрузки шумовая температура совпадает с термодинамической, задача измерения шумовой температуры сводится к измерению температуры согласованной нагрузки, которая осуществляется при помощи платинового резистора, установленного на плату СВЧ-нагрузки. Таким образом, в приборе имеются два датчика температуры. Один датчик измеряет температуру СВЧ-нагрузки, которая установлена на термоэлектрическом модуле. Второй датчик измеряет

температуру СВЧ-модуля радиометра. Также на элементе Пельтье установлена нагрузка циркулятора, что позволяет повысить температуру шумового сигнала, который поступает от циркулятора в антенну. Источник опорного шумового сигнала имеет размер  $2 \times 2 \text{ мм}^2$  (поз. 6 на рис. 1).

При отрицательной обратной связи напряжение на выходе синхронного детектора приближается к нулю, а температура согласованной нагрузки приближается к температуре антенны. Таким образом, задача нахождения температуры шумового сигнала сводится к минимизации напряжения на выходе синхронного детектора и измерению температуры согласованной нагрузки при помощи обычного датчика температуры.

СВЧ-модуль был реализован на основе технологий печатных плат с использованием монолитных интегральных микросхем. В частности, двухкаскадный малошумящий усилитель реализован с использованием монолитной микросхемы VMMK-3803 компании «Avago Technologies» (США). В качестве ППФ был разработан 4-резонаторный фильтр с полюсами затухания на конечных частотах за счет параллельно каскадного включения резонаторов. Фильтр реализован на подложке с габаритами  $4 \times 4 \times 0,5 \text{ мм}^3$  с высоким значением диэлектрической проницаемости ( $\epsilon = 100$ ). Генератор опорного напряжения, синхронный детектор, селективный усилитель, ограничитель, линия задержки реализованы на микросхеме AN231E04-QFN-44 компании «Anadigm Inc» (США). Эта микросхема работает с аналоговым сигналом, но позволяет в цифровом формате при помощи персонального компьютера изменять параметры коэффициента усиления селективного усилителя, значения постоянной времени и других параметров. Можно изменять структурную схему устройства как в процессе регулировки, так и в ходе работы. Сигнал с датчика температур поступает на 8-канальный аналого-цифровой преобразователь, реализованный на микросхеме AD7194BCPZ компании «Analog Devices» (США). В качестве микроконтроллера используется микросхема PIC18F46J50.I/PT компании «Microchip Technology Inc» (США).

Использование МИС для создания приемных модулей радиотермографа позволит снизить коэффициент шума приемного тракта, уменьшить потери мощности сигнала от антенн к усилителю, уменьшить габариты и массу устройства, что позволит обеспечить оптимальные характеристики прибора [35], [39], [40].

Основой многоканального радиотермографа является высокочувствительный радиометрический приемник, к входу которого подключаются антенны-аппликаторы. Были разработаны пятиканальные радиометрические приемники 40- и 20-сантиметровых диапазонов в ГИС-исполнении с частичным использованием МИС. На рис. 2 представлен внешний вид пятиканального радиометрического приемника.

Центральная рабочая частота радиометрического приемника  $F_1$  40-сантиметрового диапазона выбрана равной 830 МГц при полосе пропускания 100 МГц, а центральная частота радиометрического приемника  $F_2$  20-сантиметрового диапазона составляет 1 420 МГц при полосе пропускания 200 МГц. Радиометрический приемник представляет собой приемник пря-

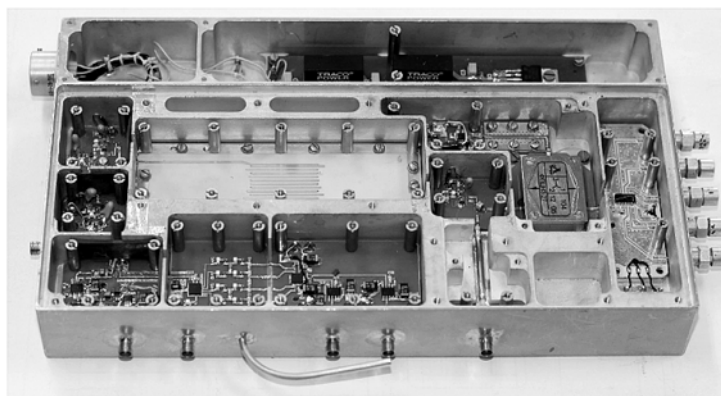


Рис. 2. Внешний вид пятиканального радиометрического приемника в ГИС-исполнении с частичным использованием МИС

мого усиления, в котором осуществляются коммутация входных сигналов, поступающих от пяти антенн-аппликаторов, усиление и фильтрация сигналов, принятых антенной в рабочей полосе частот, детектирование, фильтрация и усиление до заданного уровня. Входной коммутатор входных каналов выполнен на микросхеме НМС252QS24 компании «Hittite Microwave Corporation» (США), на плате из диэлектрика «Arlon AD-1000» компании «Arlon Materials for Electronics» (США), с малыми диэлектрическими потерями ( $\text{tg}\delta = 0,0023$ ). Малошумящие усилители выполнены на микросхемах МГА-62563 компании «Agilent (Hewlett-Packard)» (США). Полосовой СВЧ-фильтр, ограничивающий помехи, установлен после первого малошумящего усилителя, что практически устраняет влияние потерь в фильтре на чувствительность приемника. В качестве детектора применена микросхема AD8362 компании «Analog Devices» (США), работающая в диапазоне от 50 Гц до 3,8 ГГц и обладающая высокой стабильностью характеристик в широком диапазоне температур. Выходной усилитель модуля выполнен на дифференциальных усилителях AD8000, AD8002 компании «Analog Devices» (США), с широкой полосой пропускания и высоким коэффициентом подавления синфазного сигнала.

На рис. 3 представлены результаты измерений теплового поля головы человека на частотах  $F_1$  и  $F_2$ , полученные при помощи 5-канального двухчастотного радиотермографа, представленного на рис. 2.

Возможность одновременного измерения внутренних температур в различных точках тела существенно расширяет перечень выявляемых заболеваний, а измерение с использованием нескольких различных частотных диапазонов позволяет более точно локализовать патологический процесс по глубине. При этом обеспечивается получение информации о характере распределения температуры по глубине за счет построения послойных изображений или трехмерных полей температур.

Метод МР может использоваться там, где другие методы сложно или невозможно эксплуатировать: в космосе, Арктике, судебной медицине, спорте, носимых устройствах, включая персональную медицину. Космонавты, спортсмены, пожарники, военнослужащие и моряки при работе в сложных условиях и активных тренировках могут иметь аномальную температуру, что приводит к переохлаждению, гипертермии и тепловому удару, обуславливая необходимость мониторинга внутренних температур.

## Заключение

В статье представлено исследование по объединению в радиометрическом комплексе многоканальности и многочастотности. Применение МИС с малогабаритными помехозащищенными широкополосными антеннами позволяет в дальнейшем создавать менее громоздкие схемы радиометров, которые могут найти более широкое коммерческое применение.

При использовании в качестве дополнительного устройства МР может повысить информативность комплексного обследования в сочетании с рентгеновской и ультразвуковой диагностикой для выявления заболеваний на ранней стадии развития. Следует отметить, что обследование при помощи МР дешевле магнитно-резонансной томографии. Особенно ценным

является тот факт, что МР может использоваться для диагностики ранних воспалительных процессов, которые могут перейти в более серьезные заболевания.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00349-П).*

## Список литературы:

1. Dicke R. The measurement of thermal radiation at microwave frequencies // Review Science Instruments. 1946. Vol. 17. № 7. PP. 268-275.
2. Park W., Jenq J. Total power radiometer for medical sensor application using matched and mismatched noise sources // Sensors. 2017. Vol. 17. № 9. P. 2105.
3. Barrett A., Myers P.C., Sadowsky N.L. Detection of breast cancer by microwave radiometer // Radio Sci. 1977. Vol. 12. № 68. PP. 167-171.
4. Carr K.L. Microwave radiometry: Its importance to the detection of cancer // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 1989. Vol. 37. № 12. PP. 1862-1869.
5. Goryanin I., Sergey K., Shevelev C., Tarakanov A., Redpath K., Vesnin S., Ivanov Y. Passive microwave radiometry in biomedical studies // Drug Discovery Today. 2020. Vol. 25. № 4. PP. 757-763.
6. Toutouz K., Benetos G., Koutagiari I., Barampoutis N., Mitropoulou F., Davlouros P., Sfrikakis P., Alexopoulos D., Stefanadis C., Siores E., Tousoulis D. 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. 2017. Vol. 262. PP. 25-30.
7. Groumpas E., Koutsoupidou M., Karanasiou I., Papageorgiou C., Uzunoglu N. Real-time passive brain monitoring system using near-field microwave radiometry // IEEE Trans. on Biomedical Engineering. 2019. Vol. 67. № 1. PP. 158-165.
8. Gudkov A., Leushin V., Sidorov I., Vesnin S., Porokhov I., Sedankin M., Agasieva S., Chizhikov S., Gorkacheva E., Lazarenko M., Shashurin V. Use of multichannel microwave radiometry for functional diagnostics of the brain // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53. № 2. PP. 108-111.
9. Petrova M., Saidov Sh., Gudkov A., Agasieva S., Gorkacheva E., Vesnin S. Therapeutic Hypothermia Systems // Biomedical Engineering. 2021. Vol. 54. № 2. PP. 397-401.
10. Rodrigues D., Stauffer P., Pereira P., Maccarini P. Microwave radiometry for noninvasive monitoring of brain temperature in Emerging electromagnetic technologies for brain diseases diagnostics, monitoring and therapy. – Springer, 2018. PP. 87-127.
11. Laskari K., Pentazos J., Pitsilka D., Raftakis J., Konstantonis G., Toutouz K., Siores E., Tektonidou M., Sfrikakis P. Joint microwave radiometry for inflammatory arthritis assessment // Rheumatology. 2020. Vol. 59. № 4. PP. 839-844.
12. Arumachalam K., Maccarini P., Luca V., Tognolatti P., Bardati F., Snow B., Stauffer P. Detection of vesicoureteral reflux using microwave radiometry – System characterization with tissue phantoms // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2011. Vol. 58. № 6. PP. 1629-1636.
13. Crandall J., Joo H., Gajwani P., Leal J., Mawhinney D., Sterzer F., Wahl R. Measurement of brown adipose tissue activity using

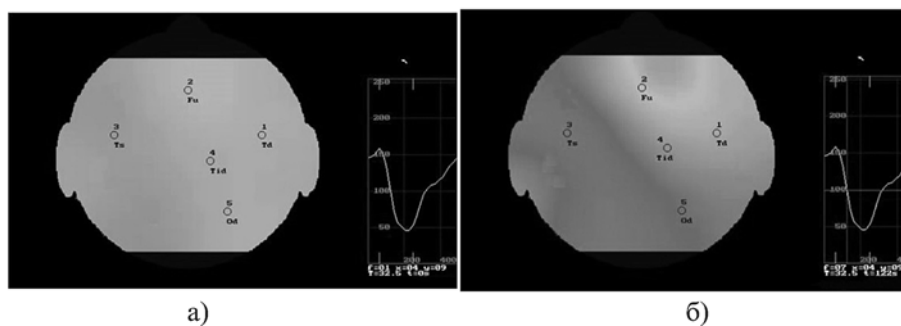


Рис. 3. Результат экспериментального исследования головы человека на частоте  $F_1$  (а) и частоте  $F_2$  (б)

- microwave radiometry and 18F-FDG PET/CT // Journal of Nuclear Medicine. 2018. Vol. 59. № 8. PP. 1243-1248.
14. *Andreev V.V., Barantsevich E.R.* Treatment of acute and chronic pain syndromes in lumbosacral radiculopathy effect // Pharmacother. 2018. № 4. PP. 42-49.
  15. *Tarakanov A., Vesnin S., Efremov V., Goryanin I., Roberts N.* Microwave Radiometry (MWR) temperature measurement is related to symptom severity in patients with Low Back Pain (LBP) // Journal of Bodywork and Movement Therapies. 2021. № 26. PP. 548-552.
  16. *Osmonov B., Ovchinnikov L., Galazis C., Emilov B., Karaibragimov M., Seitov M., Vesnin S., Losev A., Levshinskiy V., Popov I., Mustafin C., Kasymbekov T., Goryanin I.* Passive Microwave Radiometry for the Diagnosis of Coronavirus Disease 2019 Lung Complications in Kyrgyzstan // Diagnostics. 2021. Vol. 11 (2). P. 259.
  17. *Momenroodaki P.* Noninvasive internal body temperature tracking with near-field microwave radiometry // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2018. Vol. 66. № 5. PP. 2535-2545.
  18. *Haines W., Momenroodaki P., Berry E., Fromandi M., Popovic Z.* Wireless system for continuous monitoring of core body temperature / IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). 2017. PP. 541-543.
  19. *Popovic Z., Momenroodaki P., Scheeler R.* Toward wearable wireless thermometers for internal body temperature measurements // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. № 10. PP. 118-125.
  20. *Ravi V.M., Arunachalam K.A.* Low noise stable radiometer front-end for passive microwave tissue thermometry // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2019. Vol. 33. № 6. PP. 743-758.
  21. *Maccarini P., Shah A., Palani S., Pearce D., Vardhan M., Stauffer P., Rodrigues D., Salahi S., Oliveira T., Reudink D., Snow B.* A novel compact microwave radiometric sensor to noninvasively track deep tissue thermal profiles / European Microwave Conference (EuMC). 2015. PP. 690-693.
  22. *Kräuchi K., Cajochen C., Werth E., Wirz-Justice A.* Functional link between distal vasodilation and sleep-onset latency? // Integr. Comparative Physiol. 2020. Vol. 278. № 3. PP. R741-R748.
  23. *Rosenthal N., Levendosky A., Skwerer R., Joseph-Vanderpool J., Kelly K., Hardin T., Kasper S., Dellabella P., Wehr T.* Effects of light treatment on core body temperature in seasonal affective disorder // Biol. Psychiatry. 1990. Vol. 27. № 1. PP. 39-50.
  24. *Gale J., Cox H., Qian J., Block G., Colwell C., Matveyenko A.* Disruption of circadian rhythms accelerates development of diabetes through pancreatic beta-cell loss and dysfunction // J. Biol. Rhythms. 2011. Vol. 26. № 5. PP. 423-433.
  25. *Jeyaraj D., Haldar S., Wan X. et al.* Circadian rhythms govern cardiac repolarization and arrhythmogenesis // Nature. 2012. Vol. 483. № 7387. PP. 96-99.
  26. *Shaeffer J., El-Mahdi A., Hamwey A., Carr K.* Detection of extravasation of antineoplastic drugs by microwave radiometry // Cancer Lett. 1986. Vol. 31. № 3. PP. 285-291.
  27. *Han J., Leeuwen G., Mizushina S., Van de Kamer J., Maruyama K., Sugiura T., Azzopardi D., Edwards A.* Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modelling // Phys. Med. Biol. 2001. Vol. 46. № 7. PP. 1885-1903.
  28. *Wilkinson D., Carter J., Richmond V., Blacker S., Rayson M.* The effect of cool water ingestion on gastrointestinal pill temperature // Med. Sci. Sports Exercise. 2008. Vol. 40. № 3. PP. 523-528.
  29. *Galiana G., Branca R., Jenista E., Warren W.* Accurate temperature imaging based on intermolecular coherences in magnetic resonance // Science. 2008. Vol. 322. № 5900. PP. 421-424.
  30. *Kraus J.D.* Radio Astronomy 2nd ed. – Ohio: ITU, 1976. PP. 1-3, 20-23, 66.
  31. *Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K.* Microwave Remote Sensing: Active and Passive // Artech. House. 1981. Vol. 1. PP. 1-3, 20-24, 93-94, 112, 122-23.
  32. *Верба В.С., Гуляев Ю.В., Шутко А.М., Крапивин В.Ф.* СВЧ-радиометрия земной и водной поверхностей: от теории к практике. – София: Академическое издательство имени проф. Марины Дриновой, 2013. С. 296.
  33. *Shutko A.M. et al.* Practical Microwave Radiometric Risk Assessment. – Professor Marin Drinov Academic Publishing House, 2010. P. 88.
  34. *Novichikhin E., Agasieva S., Gorlacheva E., Leushin V., Gudkov A., Sidorov I.* Detection of a local source of heat in the depths of the human body by volumetric radiothermography // RENSIT. 2020. Vol. 12. № 2. PP. 305-312.
  35. *Gudkov A., Leushin V., Vesnin S., Sidorov I., Sedankin M., Solov'ev Yu., Agasieva S., Chizhikov S., Gorbachev D., Vidyakin S.* Studies of a Microwave Radiometer Based on Integrated Circuits // Biomedical Engineering. 2020. Vol. 53. № 6. PP. 413-416.
  36. Первый коммерческий одноканальный радиотермометр / <http://www.resltd.ru/eng/rtrm/training.php> (дата обращения: 09.11.2021).
  37. *Vesnin S., Sedankin M., Ovchinnikov L., Gudkov A., Leushin V., Sidorov I., Goryanin I.* Portable microwave radiometer for wearable devices. Sensors and Actuators // Nexa Revista Cientifica. 2021. Vol. 34. № 04. PP. 1431-1447.
  38. *Vesnin S.G.* Microwave radiometer / U.S. Patent Application. № 15/801,419. 2018.
  39. *Chizhikov S.V., Solov'ev Yu.V.* Element base of microwave MIC for microwave radiometry // Nanotechnology: Development and Application. 2020. Vol. 12. № 2. PP. 48-57.
  40. *Chizhikov S.V., Solov'ev Yu., Gudkov A.* Application of developed MIC LNA in microwave radiometry equipment // Journal of Physics Conference Series. 2020. Vol. 1695 (1).

Александр Григорьевич Гудков,  
д-р техн. наук, профессор,  
кафедра «Технологии приборостроения»,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,  
генеральный директор,  
ООО «НПИ ФИРМА «ГИПЕРИОН»,  
Сергей Георгиевич Веснин,  
канд. техн. наук, генеральный директор,  
ООО «Фирма «РЭС»,  
Виталий Юрьевич Леушин,  
канд. техн. наук, зам. генерального директора,  
ООО «НПИ ФИРМА «ГИПЕРИОН»,  
Игорь Александрович Сидоров,  
канд. техн. наук, доцент,  
кафедра «Технологии приборостроения»,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,  
г. Москва,  
Юрий Владимирович Соловьев,  
канд. техн. наук, начальник ОР и ПП на основе АЗВ5 и А4В4,  
АО «Светлана-Электронприбор»,  
Владимир Геннадьевич Тихомиров,  
канд. техн. наук, доцент,  
кафедра микроволновой электроники,  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),  
г. С.-Петербург,  
Михаил Константинович Седанкин,  
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,  
лаборатория анализа техногенных рисков,  
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России,  
доцент,  
кафедра биокрибернетических систем и технологий,  
РТУ – МИРЭА,  
Сергей Владимирович Чижиков,  
аспирант,  
кафедра «Технологии приборостроения»,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,  
г. Москва,  
e-mail: ooo.giperion@gmail.com