М.К. Седанкин, В.Ю. Леушин, С.В. Агасиева, А.Г. Гудков, С.Г. Веснин, И.О. Порохов, Е.А. Гудков, А.В. Осипова, А.Ю. Антоненкова

Медицинские антенны для микроволновой радиотермометрии биологических объектов

Аннотация

Представлены результаты аналитического обзора различных антенн, применяемых в медицине. Обсуждаются вопросы современной микроволновой радиотермометрии, связанные с разработкой новых антенн, а также возможные пути их решения. Сформулированы задачи дальнейших исследований, направленных на создание новых конструкций конформных антенн и антенных решеток, обеспечивающих существенное расширение функциональных возможностей и улучшение характеристик медицинских радиотермографов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00113, https://rscf.ru/project/22-19-00113/.

Введение

Важной задачей медицинской диагностики является поиск высокочувствительных методов и технологий, позволяющих диагностировать заболевания на ранних клинических стадиях. Температура является маркером патологических изменений в организме человека: канцерогенеза, воспаления, сосудистой патологии и др. [1]. Метод микроволновой радиотермометрии (МР) позволяет при помощи относительно недорогого прибора (медицинского радиотермографа) неинвазивно получать информацию о температуре внутренних тканей на основе измерения интенсивности их собственного теплового излучения в микроволновом диапазоне. В качестве датчиков микроволнового излучения используются антенны, располагаемые непосредственно на поверхности биологического объекта (БО) и подключаемые к входу высокочувствительного радиометрического приемника. Использование многоканальных антенных решеток, работающих в нескольких диапазонах частот, позволяет проводить динамические исследования глубинных температур БО с реконструкцией трехмерных распределений температуры.

Целью настоящей работы является проведение аналитического обзора современной научно-технической литературы в области разработки и исследования антенн для микроволновых радиометрических приборов ранней диагностики патологических изменений в организме человека и на основе полученной информации формулирование задач дальнейших исследований, направленных на создание новых конструкций конформных антенн и антенных решеток, обеспечивающих существенное расширение функциональных возможностей и улучшение характеристик медицинских радиотермографов. Решение этих задач будет способствовать повышению эффективности ранней диагностики и лечения таких социально значимых заболеваний, как злокачественные новообразования, а также поражения легких и других органов человека вследствие COVID-19.

Основная часть

Так как собственное излучение БО в микроволновом диапазоне является сверхслабым, важно повысить эффективность антенн и уменьшить влияние внешних электромагнитных помех за счет оптимизации конструкций антенн. Можно сформулировать ряд основных технических требований, которым должны удовлетворять антенны и антенные решетки, используемые в медицинских радиотермографах: минимальное влияние на температуру поверхности БО; оптимальное согласование на границе раздела сред антенна-БО; приемлемые функциональные характеристики (глубина измерения, объем и размеры области измерения, разрешающая способность и др.); минимальные размеры антенн для применения в многоканальных радиотермографах; широкая полоса рабочих частот для применения в многочастотных радиотермографах; приемлемая помехозащищенность; соответствие конструкции антенн и антенных решеток сложной форме БО; нагрев антенн для обеспечения приближенного теплового равновесия с БО; контроль температуры антенн для компенсации погрешности измерения; контроль прилегания антенны к поверхности БО; технологичность изделия в серийном производстве и соответствие санитарно-гигиеническим нормам; достаточные механическая прочность, износостойкость и электрогерметичность конструкции. Применяемые в настоящее время конструкции антенн и антенных решеток не в полной мере отвечают этим требованиям. Актуальной задачей является создание новых конструкций антенн и антенных решеток, которые позволят осуществлять трехмерную визуализацию внутренней температуры обширных зон организма человека, а также обеспечивать существенное расширение функциональных возможностей и улучшение характеристик медицинской диагностики.

Сегодня известно несколько типов антенн, применяющихся в медицине в ходе МР БО: печатные [2]-[4], волноводные [5], [6], вибраторные или рамочные [7], а также внутриполостные антенны различных типов [8]. Волноводные антенны для МР представляют собой отрезок волновода, заполненного диэлектриком. Наибольшее распространение получили антенны, построенные на основе круглого волновода [5], хотя использовались и прямоугольные волноводы [6]. Открытый конец волновода контактирует с БО, а противоположный конец подключен к входу радиометра. Для обеспечения согласования с БО волноводы заполняют материалом с высоким значением диэлектрической проницаемости ($\varepsilon = 10\ldots80$). Возбуждение волновода, как правило, осуществляется при помощи металлического штыря, который устанавливается внутри волновода вдоль линий электрического поля. В качестве системы запитки круглых волноводных антенн используются щелевые излучатели в форме «бабочки». Особенностями волноводных антенн являются их значительный вес, высокая теплоемкость, а также высокая стоимость и большие продольные размеры. Для проведения МР использовались также вибраторные или рамочные антенны [7]. Основной недостаток таких антенн, препятствующий их широкому использованию, – низкая помехозащищенность, так как они не имеют экрана и помехи наводятся на незащищенный излучатель. Обычно вибраторные антенны изготавливаются из тонкой пружинной проволоки, но возможна реализация вибраторной антенны в печатном исполнении [9], [10]. В отличие от волноводных антенн, у которых между излучателем и апертурой антенны расположен отрезок волновода, у печатных антенн излучатель напечатан непосредственно на диэлектрическом основании. Печатные антенны легче волноводных, дешевле, оказывают меньшее влияние на температуру кожи и могут иметь гибкую конструкцию. Можно выделить следующие виды печатных антенн: антенны со спиральным излучателем [11], [12]; антенны с эллиптическим излучателем [2], [13]; антенны с прямоугольным излучателем или излучателем сложной формы [14], [15]; антенны с щелевым излучателем [3], [16]; дипольные или вибраторные печатные антенны [9], [10].

В [9] предложено для мониторинга температуры в процессе гипертермии использовать замкнутые щелевые печатные антенны. Прямоугольная антенна предназначена для работы в диапазоне 1,5…2 ГГц, круглая – на частоте 900 МГц. Металлизация нанесена на диэлектрическую подложку из материала «Rogers 4003» (ε_r = 3,55, tg δ = 0,027) толщиной 1,524 мм. В [10] представлена антенна, способная работать как в режиме излучения (0,9 ГГц), так и в режиме приема (3,7 ГГц). Антенна изготовлена на подложке из RO4003C (ε_r = 3,38; tg δ = 0,0027) толщиной t = 1,524 мм и имеет квадратную форму со стороной 52 мм; в качестве согласующего слоя используется силиконовый каучук («GE Silicone», США) толщиной 2 мм. Для передачи используется квадратный контурный щелевой излучатель размерами 42 х 42 мм и толщиной зазора 2 мм, для приема – круглый щелевой излучатель диаметром 20 мм и толщиной зазора 1,5 мм. В работе [11] предложена печатная антенна с излучателем в форме логарифмической спирали для измерения температуры при диагностике пузырно-мочеточникового рефлюкса. Антенна работает на частоте 1,375 ГГц с полосой 550 МГц (S_{11} < –15 дБ в диапазоне 1…4 ГГц) и имеет погрешность измерений температуры 0,03 °С. Антенна имеет диаметр 80 мм и выполнена на подложке RO4350B (t = 1,524 мм). В работе [12] представлена печатная спиральная широкополосная антенна для измерения внутренней температуры БО. Антенна выполнена с использованием двух слоев подложки RO4003C (ε_r = 3,55; tg δ = 0,0027; t = 0,813 мм). Слои соединены вместе при помощи тонкого слоя поливинилацетатного клея (t = 50 мкм, ε_r = 3,3). Витки спирали имеют толщину 0,675 мм при расстоянии между витками 1,5 мм; внутренний радиус спирали принят равным 1,93 мм для соответствия частотам около 8 ГГц; внешний радиус равен 17,17 мм и соответствует частотам около 0,9 ГГц. В работе [17] описано разработанное авторами портативное устройство для неинвазивного измерения температуры БО. Устройство состоит из широкополосной антенны, многочастотного радиометра и блока цифровой обработки. Разработка позволяет проводить 2D- и 3D-визуализацию распределения температуры, используя разные частотные диапазоны в пределах от 1 до 4 ГГц. Разработанная биконическая патч-антенна состоит из медной заземляющей пластины размером 40 х 20 мм и толщиной 0,5 мм. В качестве излучателя выбраны две треугольные пластины с основанием 10 мм и высотой 20 мм в форме «бабочки». В работах [18], [19] представлен радиометр, работающий в полосе частот 1,4 ГГц. Показано, что радиометр отслеживает температуру слоя мышечной ткани под слоями жира и кожи с точностью до долей градуса; также показано, что помехи можно уменьшить за счет использования второго зонда и адаптивной обработки [18]. Зонд имеет прямоугольную форму и размеры 4 х 4 см. Печатная антенна, используемая в радиометре, имеет диаметр 1,55 см и подключена к заземляющей пластине. Подложка и согласующий слой выполнены из материала RO6010 (ε_r = 10,2; t = 1,27 мм). В [20] представлена печатная антенна с излучателем в виде логарифмической спирали, работающая в диапазоне 2,5…3 ГГц, для неинвазивного долговременного мониторинга метаболической активности бурой жировой ткани. Разработанная антенна позволяет регистрировать изменения температуры для малых объемов (2…6 мл) бурой жировой ткани, находящейся на глубине 4,5…20 мм в надключичной области. В работе [21] представлена печатная щелевая антенна, которая выполнена в виде двух перекрещивающихся Н-образных щелей, расположенных под углом 90°, имеющая диаметр 2,5 см. Гибкая подложка выполнена из материала RO3003 (ε_r = 3; tg δ = 0,0013; t = 0,76 мм). В работе [22] описан прототип радиометра для выявления локальных изменений температуры в экспериментах с фантомом мозга, работающий в диапазоне частот 1,5 ± 0,05 ГГц. Приемник имеет четыре входа, по одному на каждую используемую антенну. Радиометрическая система основана на 4-элементной решетке унипланарных эллиптических антенн (5 х 4 см). Коэффициент отражения выбранных антенн составляет –20 дБ в диапазоне 1,45…1,55 ГГц при излучении в БО. Антенны способны эффективно сканировать области мозга на глубине до 3 см. В работе [23] описывается широкополосная радиометрическая печатная антенна для измерения температуры мозга. Предложенная антенна имеет диаметр 20 мм и высоту 4,56 мм и работает в диапазоне частот 2,75…5,032 ГГц при коэффициенте отражения S_{11} < 10 дБ. Подложка выполнена из материала RO3010 (ε_r = 10,2; tg δ = 0,0022). Антенна может применяться в составе многоканальных систем для мониторинга температуры БО. Отдельным классом антенн для МР являются внутриполостные антенны, используемые для выявления тепловых аномалий внутренних органов посредством термометрии через биологические полости [7], [24].

Для увеличения глубины измерения желательно увеличить размеры апертуры антенны, но в некоторых случаях использовать антенны большого диаметра невозможно. Следует также иметь в виду, что при уменьшении диаметра наряду со снижением глубины измерения повышается разрешающая способность и уменьшается область усреднения температуры. Это в конечном счете должно привести к повышению чувствительности радиотермографа. Антенная техника постоянно развивается. Появляются новые решения, которые находят применение не только в промышленности, но и в медицине. Применение инновационных технологий позволяет усовершенствовать существующие антенны и повысить качество диагностики. Интерес вызывает применение новых материалов для изготовления антенн. В работе [25] предлагается использовать в качестве материала излучателя графен вместо меди. Конструкция антенны состоит из круглого патч-излучателя, выполненного из графена, и подложки размером 96 х 96 мм, которая может быть изготовлена из стеклотекстолита, бумаги и полиэстера. Подложка очень тонкая: толщина для бумаги – 0,255 мм, для полиэстера – 0,1 мм. Рабочая частота антенны – 2,45 ГГц. Проведенные испытания образцов показали, что антенны могут изгибаться в соответствии со сложной поверхностью тела и это не влияет на диаграмму направленности. Такие антенны являются легкими и гибкими и подходят для медицинского применения в целях постоянного контроля температуры пациентов. Отдельным направлением, затрагивающим область антенных систем, является применение в конструкциях антенн метаматериалов – искусственно сформированных и особым образом структурированных сред, обладающих электромагнитными свойствами, недостижимыми в природе [26]. В работе [27] описано применение метаматериалов для разработки двухслойных круглых патч-антенн для медицинских целей. Представлена компактная круглая микрополосковая антенна с кольцевыми резонаторами. Антенна напечатана на подложке с диэлектрической проницаемостью ε_r = 2,2 (tg δ = 0,002; t = 1,6 мм). Излучатель состоит из круглой накладки с восемнадцатью кольцевыми резонаторами. Диаметр антенны составляет 36 мм, диаметр резонатора – 5,2 мм, рабочая частота антенны – 2,6 ГГц. Расстояние между резонаторами может варьироваться от 0 до 8 мм для расширения полосы пропускания от 5 до 10 %. Применение метаматериалов позволяет достичь миниатюризации и сверхширокой полосы рабочих частот.

Как видно из обзора, наиболее распространенным материалом для подложки антенн являются СВЧ-материалы для печатных плат, но в последнее время набирают популярность текстильные и резиноподобные материалы для создания антенн. Текстильные материалы являются легкодоступными и дешевыми, а значит, наиболее перспективными для конструирования антенн. Некоторые исследователи изучили и рассмотрели свойства текстильных материалов для антенн [28]-[31]. В целом наиболее привлекательными материалами для создания носимых антенн были признаны такие текстильные ткани, как проводящий нейлон и ткани с медным покрытием [32]-[35]. В [36] была описана спроектированная и изготовленная конформная сверхширокополосная антенна, интегрированная в трехмерное тканое полотно. Рабочий диапазон частот предложенной антенны – от 3,1 до 10,6 ГГц. В качестве излучателя использован прямоугольный патч размером 18,3 х 15,8 мм, питаемый через микрополосковую линию, на конец которой припаян коаксиальный разъем. Проводящие части и изолирующая подложка антенны изготовлены из медных и арамидных нитей соответственно. Подложка размером 56,2 x 160 мм^2 имеет диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_r = 1{,}96$ (tg $\delta = 0{,}042$; $t = 1{,}7$ мм). По результатам испытания на изгиб выявлено, что условие изгиба мало влияет на характеристики антенны. Это свойство делает антенну подходящей для применения на поверхностях БО, имеющих сложную форму. Методы создания антенн на основе текстильных материалов представлены в работах [37], [38]. Кроме текстильных материалов с тканевой основой в носимых технических системах нашли применение резиноноподобные материалы с керамическим наполнителем (Ceramic Polymer Composite). Наибольшее распространение для изготовления СВЧ-подложек получил материал полидиметилсилоксан (polymer Sylgard-184, PDMS, компания «Dow Corning», США). Некоторые производители используют T2 Silastic компании «Dow Corning», другие производители – RTC6166f компании «GE Plastic» (США). Эти материалы имеют низкие электрические потери, поэтому могут использоваться на частотах в несколько гигагерц. Подобные материалы состоят из двух компонентов: основной полимер (base prepolymer) и соединяющий агент (cross-linking agent). В большинстве работ при изготовлении подложек соотношение двух компонентов составляет 1:10 (по весу). Для повышения диэлектрической проницаемости используют различные керамические наполнители: $BaTiO_3$, Mg-Ca-Ti, $SrTiO_3$ и пр. Диэлектрическая проницаемость $BaTiO_3$ может изменяться от десяти единиц до нескольких тысяч в зависимости от размера зерна, его формы и др. Многие авторы усовершенствовали производственные процессы изготовления подобных антенн, с чем можно ознакомиться в работах [39], [40]. Попытки создать антенны одновременно на основе текстильных и резиноподобных материалов для МР уже предпринимались. Результаты этих исследований представлены в работе [41]. На основании вышеизложенного можно констатировать, что несмотря на то что разработкой антенн для МР занимается широкий круг ученых и специалистов, ряд важнейших проблем остается нерешенным.

Заключение

На основе проведенного анализа современного состояния научных исследований в области разработки и исследования антенн для микроволновых радиометрических приборов ранней диагностики патологических изменений в организме человека сформулированы следующие задачи дальнейших исследований: разработать тепловые модели и провести теплофизическое моделирование конформных антенн с целью уменьшения их влияния на температуру БО; разработать технические решения повышения помехозащищенности антенн для использования радиотермографов вне экранированных помещений; разработать новые типы конформных антенн и антенных решеток на основе современных композиционных материалов, метаматериалов, текстильных или резиноподобных материалов; исследовать возможность повышения чувствительности и помехоустойчивости радиотермографов за счет применения активных антенн с высокими энергетическими характеристиками; создать антенные решетки из малогабаритных антенн, работающих в нескольких частотных диапазонах, для применения в радиотермометрических приборах с функцией 3D-визуализации распределения и динамики изменения радиояркостной температуры БО. В итоге можно сделать вывод о необходимости проведения комплекса исследований, направленных на создание нового класса конформных антенн и антенных решеток на основе новых материалов и технологий, обеспечивающих существенное расширение функциональных возможностей и улучшение характеристик медицинских радиотермометрических приборов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00113, https://rscf.ru/project/22-19-00113/.

Список литературы:

1. *Gautherie M., Gros C.M.* Breast Thermography and Cancer Risk Prediction // Cancer. 1980. Vol. 45. № 1. PP. 51-56.
2. *Klemetsen Ø., Jacobsen S.* Improved radiometric performance attained by an elliptical microwave antenna with suction // IEEE Trans. on Biom. Eng. 2011. Vol. 59. № 1. PP. 263-271.
3. *Beaucamp-Ricard C. et al.* Temperature measurement by microwave radiometry: Application to microwave sintering // IEEE Trans. on Inst. and Meas. 2009. Vol. 58. № 5. PP. 1712-1719.
4. *Leushin V.Yu. et al.* Possibilities of increasing the noise immunity of radiothermograph antenna applicators for brain diagnostics // Sensors and Actuators A: Physical. 2022. Vol. 337. № 16. Art. ID 113439. PP. 1-10.
5. *Sedankin M.K. et al.* Modeling of thermal radiation by the kidney in the microwave range // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53. № 1. PP. 60-65.
6. *Hand J.W. et al.* Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modelling // Physics in Medicine & Biology. 2001. Vol. 46. № 7. PP. 1885-1903.
7. *Lee J.W. et al.* Experimental investigation of the mammary gland tumor phantom for multifrequency microwave radiothermometers // Medical and Biological Engineering and Computing. 2004. Vol. 42. № 5. PP. 581-590.
8. *Sedankin M.K. et al.* Intracavity thermometry in medicine // Biomedical Engineering. 2021. Vol. 55. № 3. PP. 224-229.
9. *Tofighi M.R.* Characterization of biomedical antennas for microwave heating, radiometry, and implant communication applications / WAMICON Conference Proceedings. IEEE, 18-19 Apr. 2011, Clearwater Beach, FL, USA. 2011. PP. 1-6.
10. *Tofighi M.R., Pardeshi J.R.* Interference enhanced biomedical antenna for combined heating and radiometry application // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2017. Vol. 16. PP. 1895-1898.
11. *Arunachalam K. et al.* Detection of vesicoureteral reflux using microwave radiometry – System characterization with tissue phantoms // IEEE Trans. on Biomed. Eng. 2011. Vol. 58. № 6. PP. 1629-1636.
12. *Abufanas H. et al.* New approach for design and verification of a wideband Archimedean spiral antenna for radiometric measurement in biomedical applications / German Micr. Conf., IEEE. 16-18 Mar. 2015, Nuremberg, Germany. PP. 127-130.
13. *Klemetsen Ø., Jacobsen S., Birkelund Y.* Radiometric temperature reading of a hot ellipsoidal object inside the oral cavity by a shielded microwave antenna put flush to the cheek // Physics in Medicine & Biology. 2012. Vol. 57. № 9. PP. 2633-2652.
14. *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 // Progress in Elect. Res. 2011. Vol. 117. PP. 83-101.
15. *Oikonomou A., Karanasiou I., Uzunoglu N.* Phased-array near field radiometry for brain intracranial applications // Prog. in Electr. Res. 2010. Vol. 109. PP. 345-360.
16. *Sedankin M. et al.* Development and optimization of an ultra wideband miniature medical antenna for radiometric multi-channel multi-frequency thermal monitoring // Eureka: Physics and Engineering. 2020. № 6. PP. 71-81.
17. *Livanos N.A. et al.* Design and interdisciplinary simulations of a hand-held device for internal-body temperature sensing using microwave radiometry // IEEE Sensors Journal. 2018. Vol. 18. № 6. PP. 2421-2433.
18. *Momenroodaki P. et al.* Noninvasive internal body temperature tracking with near-field microwave radiometry // IEEE Trans. on Micr. Theory and Techniques. 2017. Vol. 66. № 5. PP. 2535-2545.
19. *Momenroodaki P., Haines W., Popovic Z.* Non-invasive microwave thermometry of multilayer human tissues / IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). 4-9 June 2017, Honololu, HI, USA. 2017. PP. 1387-1390.

20. *Rodrigues D.B., Stauffer P.R., Maccarini P.F.* Monitoring brown fat metabolic activity using microwave radiometry: antenna design and frequency selection / IEEE Benjamin Franklin Symposium on Microwave and Antenna Sub-systems for Radar, Telecommunications, and Biomedical Applications (BenMAS). 26-26 Sept. 2014, Philadelphia, PA, USA. PP. 1-3.
21. *Leon G. et al.* Wideband epidermal antenna for medical radiometry // Sensors. 2020. Vol. 20. № 7. PP. 1-10.
22. *Groumpas E. et al.* Sensing local temperature and conductivity changes in a brain phantom using near-field microwave radiometry / International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT). IEEE, 2017. 1-3 March 2017, Athens, Greece. PP. 293-295.
23. *Ullah H. et al.* A wearable radiometric antenna for non-invasive brain temperature monitoring / 18th Inter. Symp. on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, IEEE. 19-22 Aug. 2018, Waterloo, ON, Canada. PP. 1-2.
24. *Sedankin M.K. et al.* Microwave radiometry of the pelvic organs // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53. № 4. PP. 288-292.
25. *Ram P. et al.* Design and testing of graphene-based screen printed antenna on flexible substrates for wireless energy harvesting applications // IETE Journal of Research. 2021. Published online. PP. 1-12 / https://doi.org/10.1080/03772063.2021.1934127.
26. *Elakkiya A. et al.* An ultrathin microwave metamaterial absorber for C, X, and Ku band applications // J. of Elect. Materials. 2021. Vol. 50. № 12. PP. 7275-7282.
27. *Sabban A.* New compact wearable metamaterials circular patch antennas for IoT, medical and 5G applications // Applied System Inn. 2020. Vol. 3. № 4. PP. 1-24.
28. *Bal K., Kothari V.K.* Measurement of dielectric properties of textile materials and their applications // Indian J. Fibre. Text. 2009. Vol. 34. PP. 191-199.
29. *Morton W.E., Hearle W.S.* Physical properties of textile fibres / 4th ed. – Cambridge. UK: Woodhead Publishing, 2008. 775 p.
30. *Sankaralingam S., Bhaskar G.* Determination of dielectric constant of fabric materials and their use as substrates for design and development of antennas for wearable applications // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2010. Vol. 59. PP. 3122-3130.
31. *Shi J. et al.* Smart textile-integrated microelectronic systems for wearable applications // Advanced Materials. 2019. Vol. 32. № 5. Art. ID 1901958. PP. 1-37.
32. *Hertleer C. et al.* Influence of relative humidity on textile antenna performance // Text. Res. J. 2009. Vol. 80. PP. 177-183.
33. *Zhu S., Langley R.* Dual-band wearable antennas over EBG substrate // Electr. Lett. 2007. Vol. 43. PP. 141-142.
34. *Matthews J.C.G., Pettitt G.* Development of flexible, wearable antennas / Proceedings of EuCAP 2009: 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, Germany, 23-27 March 2009. PP. 273-277.
35. *Scarpello M.L.* Stability and efficiency of screen-printed wearable and washable antennas // IEEE Anten. Wireless Propag. Lett. 2012. Vol. 11. PP. 838-841.
36. *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. P. 861.
37. *Salvado R. et al.* Textile materials for the design of wearable antennas: A survey // Sensors. 2012. № 12. PP. 15841-15857.
38. *Deaett M.A., Weedon W.H.* Method for constructing antennas from textile fabrics and components / Patent US 2005235482. Pub. Date: 27.11.2005.
39. *Babar A.A. et al.* Performance of high-permittivity ceramic-polymer composite as a substrate for UHF RFID tag antennas // International Journal of Antennas and Propagation. 2012. Vol. 2012. Art. ID 905409. PP. 1-8.
40. *Locher I. et al.* Design and characterization of purely textile patch antennas // IEEE Trans. Adv. Pack. 2006. Vol. 29. PP. 777-788.
41. *Sedankin M.K. et al.* Development of patch textile antenna for medical robots / International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). IEEE, 27-28 Sept. 2018, Saratov, Russia. PP. 413-420.

Михаил Константинович Седанкин,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
лаборатория анализа техногенных рисков,
ФГБУ «ГНЦ ФМБЦ
им. А.И. Бурназяна ФМБА России,
доцент,
кафедра биокибернетических систем
и технологий,
РТУ МИРЭА,
ст. научный сотрудник,
Центр НТИ «Фотоника»,
ФГАОУ ВО «Российский университет
дружбы народов»,
Виталий Юрьевич Леушин,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
Центр НТИ «Фотоника»,
Светлана Викторовна Агасиева,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра нанотехнологий и
микросистемной техники,
ФГАОУ ВО «Российский университет
дружбы народов»,
Александр Григорьевич Гудков,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра «Технологии приборостроения»,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,
Сергей Георгиевич Веснин,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
Игорь Олегович Порохов,
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,
Центр НТИ «Фотоника»,
ФГАОУ ВО «Российский университет
дружбы народов»,
Евгений Алексеевич Гудков,
мл. научный сотрудник,
лаборатория анализа техногенных рисков,
ФГБУ «ГНЦ ФМБЦ
им. А.И. Бурназяна ФМБА России,
Александра Владимировна Осипова,
магистр 2-го года обучения,
кафедра биокибернетических систем
и технологий,
РТУ МИРЭА,
Анна Юрьевна Антоненкова,
ассистент,
кафедра нанотехнологий и
микросистемной техники,
ФГАОУ ВО «Российский университет
дружбы народов»,
г. Москва,
e-mail: msedankin@yandex.ru