CC BY 4.0

https://doi.org/10.29001/2073-8552-2020-35-4-87-94
УДК 612.014.423/.426:004.942

Исследование возможности измерений диэлектрической проницаемости органов и тканей человека средствами радиолокационного зондирования и математического моделирования

Б.И. Авдоченко[1], В.Д. Репенко[1], А.В. Убайчин[1], А.В. Фатеев[1], Н.Д. Хатьков[1], V. Issakov[2]

[1] Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 40

[2] Университет Отто фон Герике в Магдебурге,
2, Universitätsplatz, Magdeburg, D-39106, Deutschland

Аннотация

Цель работы. Для решения проблемы доступности цифровых технологий в низовых звеньях, развития профилактической медицины и телемедицины возможно применение малогабаритных радиолокационных систем с высоким временным разрешением.

Метод исследования. Использование коротких зондирующих видеоимпульсов, стробоскопических приемных устройств и ноутбуков со специализированным программным обеспечением позволяет создать недорогую диагностическую медицинскую установку. Эксплуатация подобной установки не требует участия высококвалифицированных специалистов медицинского и радиотехнического профиля.

Материалы исследований. Описан состав установки и методика эксперимента, показана возможность получения пространственного разрешения внутреннего строения органов и тканей человека с миллиметровой точностью. Приведена математическая модель взаимодействия радиоимпульса с внутренними неоднородностями и принцип обработки отраженного сигнала.

Результаты. Полученные результаты измерений представлены в виде последовательности временных вейвлет-томограмм, а использование различных сечений вейвлета в частотной области позволяет диагностировать состояние органов по его спектральным характеристикам.

Заключение. Цифровое представление результатов диагностики дает возможность моделировать состояние организма, создавать базы данных состояния пациентов и обмениваться ими.

Ключевые слова:	радиолокация в медицине, доступность цифровых технологий, цифровые базы данных.
Конфликт интересов:	авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Прозрачность финансовой деятельности:	никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.
Соответствие принципам этики:	все научные эксперименты были проведены с согласия вовлеченного в них человека.
Для цитирования:	Авдоченко Б.И., Репенко В.Д., Убайчин А.В., Фатеев А.В., Хатьков Н.Д., Issakov V. Исследование возможности измерений диэлектрической проницаемости органов и тканей человека средствами радиолокационного зондирования и математического моделирования. *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины.* 2020;35(4):87–94. https://doi.org/10.29001/2073-8552-2020-35-4-87-94.

Авдоченко Борис Иванович, e-mail: AvdochenkoBI@rss.tusur.ru.

On the capability of measuring the dielectric constant of human organs and tissues by radar sensing and mathematical modeling

Boris I. Avdochenko[1], Vladislav D. Repenko[1], Anton V. Ubaychin[1], Aleksey V. Fateev[1], Nikolay D. Khatkov[1], Vadim Issakov[2]

[1]Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin ave., 634050, Tomsk, Russian Federation

[2]Otto-von-Guericke Universität Magdeburg,
Universitätsplatz 2, D-39106 Magdeburg

Abstract

Purpose of work. An implementation of small-sized high-resolution radar systems is proposed to solve both the problem of access to digital technologies and the development of preventive medicine and telemedicine.

Method of research. The use of ultra-wideband video pulses, stroboscopic receivers, and laptops with specialized software allows to create an inexpensive diagnostic medical device. Working with such a diagnostic medical device does not require participation of highly qualified medical and radio engineering specialists.

Research materials. The block diagram of the diagnostic device and experimental methodology are described. Preliminary tests of the diagnostic device are carried out. A capability to provide a millimeter-accuracy spatial resolution of a human body internal structure is presented. The mathematical model of interaction between the radio pulse and internal in homogeneities in the human body and the principle of processing the reflected signal are described.

Results. The results of obtained measurements are presented as a sequence of time wavelet tomograms where the different wavelet cross-sections in the frequency domain allow to diagnose the state of internal organs based on the spectral characteristics.

Conclusion. Digital representation of diagnostic results makes it possible to model health state and to create and exchange patient databases.

Keywords:	radars in medicine, availability of digital technologies, digital databases.
Conflict of interest:	the authors do not declare a conflict of interest.
Financial disclosure:	no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.
Adherence to ethical standards:	all scientific experiments have been carried out with consent of the person involved.
For citation:	Avdochenko B.I., Repenko V.D., Ubaychin A.V., Fateev A.V., Khatkov N.D., Issakov V. On the capability of measuring the dielectric constant of human organs and tissues by radar sensing and mathematical modeling. *The Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine.* 2020;35(4):87–94. https://doi.org/10.29001/2073-8552-2020-35-4-87-94.

Введение

За последние годы радиолокационные устройства нашли широкое и разнообразное применение в различных областях науки и практики. Бурное развитие микро- и наноэлектроники значительно повысило разрешающую способность, уменьшило габариты, вес и стоимость локационных систем, что создало предпосылки для их эффективного применения в исследованиях живых объектов и биологических сред. Активно развиваются методы радиоволновой томографии [1], очевидным преимуществом которых перед классическими методами диагностики онкологических заболеваний (рентген, томография с применением радиоконтрастных препаратов и т. д.) является их безвредность для человека.

Проведенные исследования в области ранней медицинской диагностики на основе оценки скорости метаболизма тканей путем пассивного измерения их собственного шумового излучения в диапазоне сверхвысоких частот позволяют на клинически ранней стадии (до структурного изменения клеток) повысить вероятность обнаружения онкологического заболевания [2]. Для оценки скорости метаболизма внутренних тканей по их собственному излучению радиолокационным методом необходимо решить обратную задачу радиолокации – восстановить глубинные профили температур [3]. Несмотря на известную структуру слоев исследуемой среды, решение обратной задачи усложняется из-за широких пределов изменения электродинамических характеристик слоев, что приводит к ухудшению точности восстановления глубинных профилей температуры [4].

Применение субнаносекундных сигналов уже сейчас позволяет исследовать внутреннюю структуру человека и создавать радиофизические модели внутреннего строения с разрешением 10^{-2}–10^{-3} м. Сверхширокий спектр

таких сигналов, от сотен мегагерц до десятков гигагерц, дает возможность получать огромный объем информации для диагностики и оценки состояния биологических сред [5]. Достигнутый уровень разрешающей способности и передовые методы формирования объемных и квазиобъемных изображений позволяют решать многие перспективные задачи по исследованию биологических сред, в том числе в целях медицинской диагностики.

Проведенное исследование подтверждает возможности создания локационных систем с достаточным пространственным разрешением для получения информации о внутренней структуре человека и ее электродинамических свойствах для решения широкого ряда задач ранней неинвазивной медицинской диагностики.

Цель работы: исследование возможности измерений диэлектрической проницаемости органов и тканей человека средствами радиолокационного зондирования и математического моделирования для дальнейшей оценки их состояния.

Метод исследования

На данном этапе проводится оценка возможности применения метода зондирования короткими субнаносекундными импульсами для измерения внутренней структуры человека и определение разрешающей способности метода.

На рисунке 1 представлена структурная схема проведенных экспериментов, на которых человек располагался перед зондирующей и приемной антеннами.

Короткий зондирующий импульс локализуется на малом участке исследуемого объекта. После взаимодействия с этим участком отраженный сигнал характеризует отражающие свойства объекта. По временной зависимости отраженного сигнала определяется внутренняя структура объекта.

Математическое моделирование

Рассмотрим типовой метод измерения диэлектрической проницаемости материалов, основанный на анализе прохождение сигналом участка слоистой среды с изменением диэлектрической проницаемости (рис. 2), с целью адаптации его для исследования человека.

Простейшие одномерные радиолокационные системы позволяют получить квазиплоские модели внутреннего строения, представляя взаимодействие волны с плоским фронтом со слоистой плоской средой, перпендикулярной направлению зондирующего сигнала.

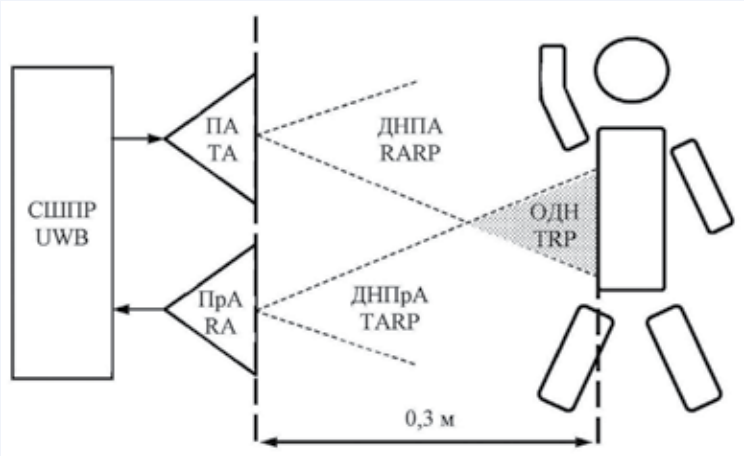

Рис. 1. Расположение человека перед антеннами
Примечание: СШПР – сверхширокополосный радиолокатор, ПА – передающая антенна, ПрА – приемная антенна, ДНПА и ДНПрА – диаграммы направленности передающей и приемной антенн соответственно, ОДН – общая диаграмма направленности антенн.
Fig. 1. The location of a person in front of the antennas
Note: UWR – ultra-wideband radar, TA – transmitting antenna, RA – receiving antenna, TARP and RARP – radiation patterns of transmitting and receiving antennas, TRP – total radiation pattern of antennas

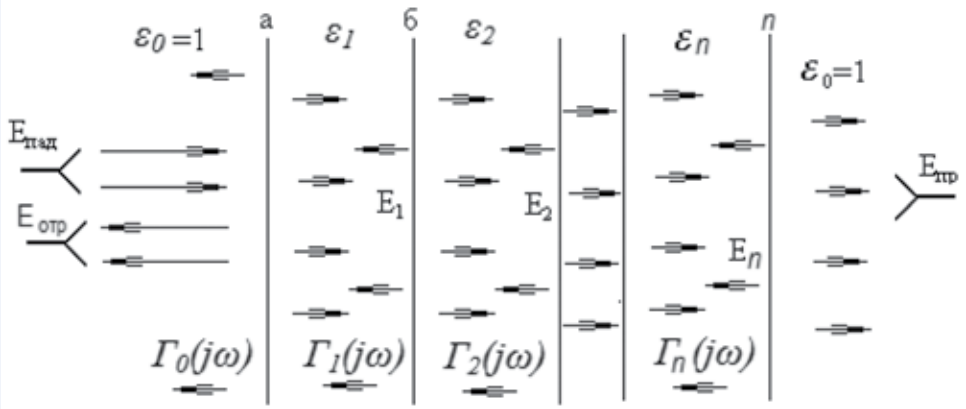

Рис. 2. Взаимодействие сигнала со слоистой средой
Fig. 2. The propagation of a radio signal in a layered medium

Отражение от границ среды описывается известным соотношением [6]:

$$\Gamma(j\omega) = \Gamma_0(j\omega) + \frac{\sum_{p=1}^{m} \Gamma_p(j\omega)\exp(-j2\beta \cdot lp) + \sum_{p=2}^{m} 2\Gamma_p(j\omega)\,\Gamma_{p-1}(j\omega)\exp(-j2\beta \cdot l_{p+1})}{1 - \sum_{p=1}^{m}\sum_{q=1}^{m} \Gamma_p(j\omega)\,\Gamma_q(j\omega)\exp(-j2\beta \cdot l_{pq})}$$

где l_1–l_m – расстояние от передней границы среды до соответствующей неоднородности; l_{pq} – расстояние между неоднородностями *p* и *q*; $\Gamma_0(j\omega)$ – $\Gamma_m(j\omega)$ – комплексные коэффициенты отражения от неоднородностей; $\beta = 2\pi/\lambda$ – фазовая постоянная; λ – длина волны в среде.

При регистрации отраженного сигнала от внутренней структуры человека получаем временную зависимость комплексного коэффициента отражения от неоднородностей.

С учетом того, что расстояние $l_i = \frac{c \cdot t_i}{2\sqrt{\varepsilon}}$, получаем выражение, моделирующее пространственную структуру органов и тканей человека следующего вида:

$$\Gamma(j\omega) = \Gamma_0(j\omega) + \frac{\sum_{p=1}^{m} \Gamma_p(j\omega)\exp(-j\omega \cdot p) + \sum_{p=2}^{m} 2\Gamma_p(j\omega)\,\Gamma_{p-1}(j\omega)\exp(-j\omega \cdot t_{p+1})}{1 - \sum_{p=1}^{m}\sum_{q=1}^{m} \Gamma_p(j\omega)\,\Gamma_q(j\omega)\exp - j\omega \cdot t_{pq}}$$

Во временную зависимость входят отражения от границ неоднородностей и вторичные отражения внутри исследуемого объекта, что необходимо учитывать при обработке отраженного сигнала.

Влияние вторичных отражений можно учесть при разделении сигналов, после выполнении условия $t_{фр} << t_i$, где $t_{фр}$ – длительность фронта зондирующего сигнала.

Обработка результатов

Первичная обработка результатов проводится с целью определения комплексных коэффициентов отражения от неоднородностей $\Gamma_i(j\omega)$ и временного положения этой неоднородности *ti* по временной зависимости уровня отраженного сигнала от исследуемой среды. Полученные результаты измерений представляются в виде последовательности временных вейвлет-томограмм, в которых коэффициент отражения в выбранный момент времени отображается градациями яркости, цветом, либо зависимостью диэлектрической проницаемости среды от расстояния до поверхности исследуемого объекта.

Для выделения временного участка объекта *ln* – *lm* используется метод «скользящего окна» с выбором масштаба и местоположения анализируемого временного интервала отраженного сигнала. Поскольку биологический объект имеет сложную меняющуюся структуру, то в обработке сигнальной информации используется несколько настраиваемых в процессе измерений алгоритмов. С целью компенсации ограничения на разрешающую способность оборудования, в зависимости от числа элементов входного вектора данных во временной области, применены окна Блэкмана, Хемминга.

Использование различных сечений MHAT-вейвлета и оконного преобразования Фурье в частотных областях дает возможность выделить требуемую временную зависимость сигнала, отраженного от выделенного участка объекта, несущую информацию о его строении и влиянии на спектр сигнала. Разработанная программа обработки позволяет применять несколько разных алгоритмов обработки, а также проводить фильтрацию вейвлет-спектра с последующим выбором градаций уровней отраженного сигнала цветом с целью визуальной индикации

Установка для экспериментальных исследований

В состав экспериментальной установки входят: две сверхширокополосные антенны с диапазоном частот 1–12 ГГц; генератор импульсов АКИП-3308/1 амплитудой 5 В с фронтом 50 пс и частотой повторения 1 МГц; USB стробоскопический осциллограф с полосой пропускания 12 ГГц, ноутбук с программным обеспечением.

Материалы исследований

В исследованиях использовались специализированные антенны для передачи импульсов с пикосекундными фронтами, с линейными фазовыми характеристикими, в которых сочетались электрический и магнитный излучатели с уголковым отражателем [7]. Радиопоглощающий материал между антеннами с затуханием более 26 дБ применялся для уменьшения прямого прохождения между передающей и приемной антеннами.

Фотография экспериментальной установки показана на рисунке 3.

Рис. 3. Фотография экспериментальной установки
Fig. 3. The photo of experimental facility

В процессе экспериментальных исследований человек размещался перед антеннами на расстоянии 25–30 см, как это представлено на рисунке 4.

Результаты экспериментальных исследований

Форма отраженного от человека сигнала определялась путем вычитания из отраженного сигнала прямого прохождения сигнала.

На рисунке 5 показаны временные зависимости уровня отраженного сигнала от внутренних органов человека, отображаемые на экране компьютера при параллельном и перпендикулярном расположении антенн.

Различие в уровнях и формах отраженных сигналов при различных расположениях антенн подтверждает перспективность применения поляризационных методов обработки.

Рис. 4. Процесс проведения экспериментальных исследований
Fig. 4. The process of conducting the experimental research

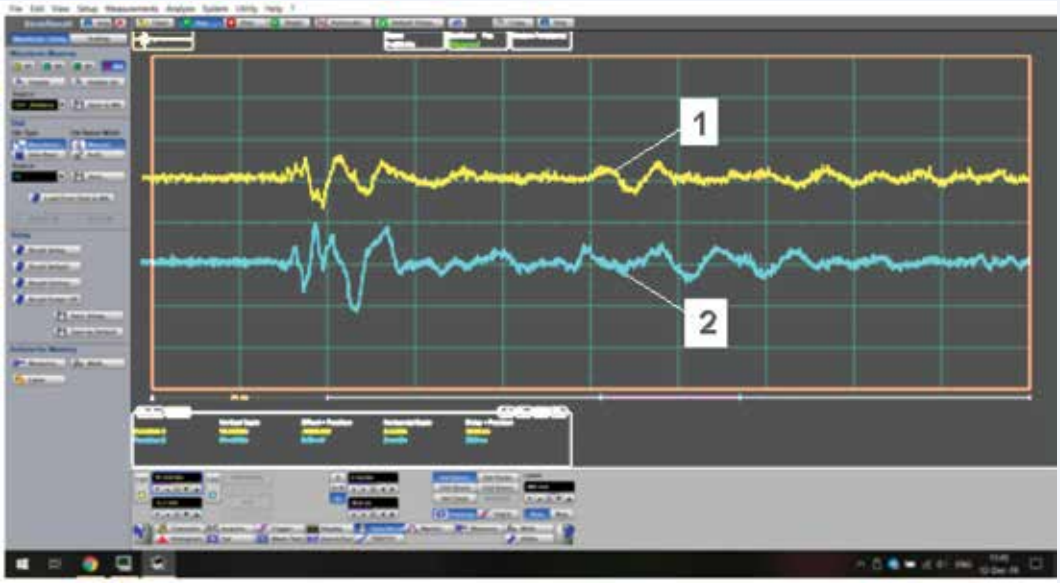

Рис. 5. Отражение зондирующего сигнала от внутренних неоднородностей человека: 1 – при параллельном расположении антенн, 2 – при перпендикулярном расположении антенн
Fig. 5. The reflections of probing signal from the internal heterogeneities in human body: 1 – with a parallel arrangement of antennas, 2 – with a perpendicular arrangement of antennas

Рассмотрим начальный участок отраженного сигнала на интервале времени до 3 нс, что соответствует глубине зондируемого участка от поверхности до 4 см (с учетом усредненной диэлектрической проницаемости), показанный на рисунке 6.

Обсуждение результатов

Начальная обработка результатов зондирования временным методом позволяет выделить характерные участки со значительными перепадами диэлектрической проницаемости (кожное покрытие с участками повышенной диэлектрической проницаемости, жировой слой с уменьшенной диэлектрической проницаемостью), детальное рассмотрение дает возможность выделить отражения от крупных сосудов, костей, внутренних органов. Отметим, что в данном исследовании время измерений составляет порядка единиц микросекунд. Непрерывная регистрация в течение длительного времени в дальнейшем позволит по изменению отраженных сигналов во времени выделить отражения от нестационарных неоднородностей (пульсации сердца, крупных сосудов, прохождение и переработка пищи и пр.).

Рассмотрим возможности спектрального метода обработки. На рисунке 7 показана цветовая зависимость уровня отраженного сигнала от глубины распространения после фильтрации для области нижних частот (до 3 ГГц), на рисунке 8 – та же зависимость после фильтрации в диапазоне частот 3–10 ГГц. Высокочастотная часть спектра отраженного от неоднородностей сигнала $Г_i(j\omega)$ дает возможность детализировать радиолокационное изображение внутреннего строения человека. Кожный покров разделяется на отдельные участки толщиной 1–3 мм, в пределах которых коэффициент отражения слабо изменяется.

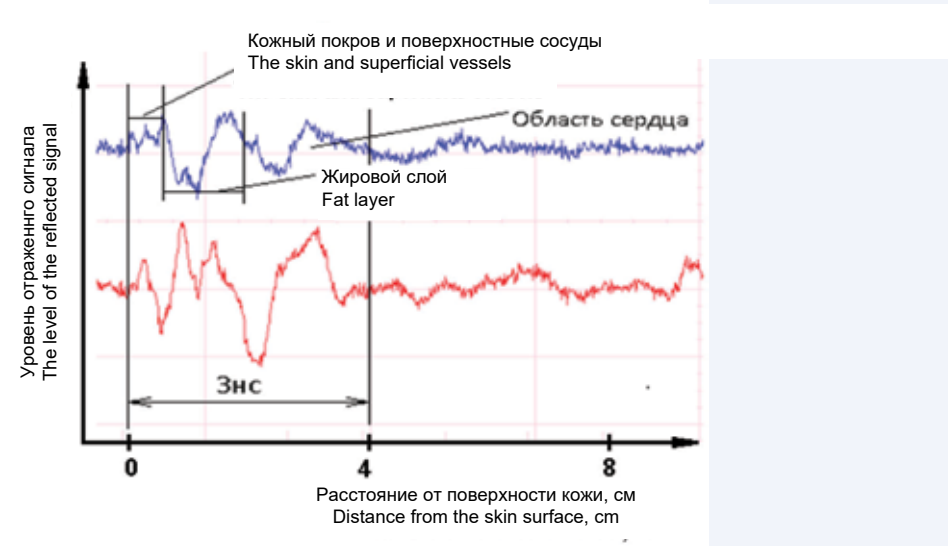

Рис. 6. Начальный участок отраженного сигнала от тела человека
Fig. 6. The initial part of a signal reflected from the human body

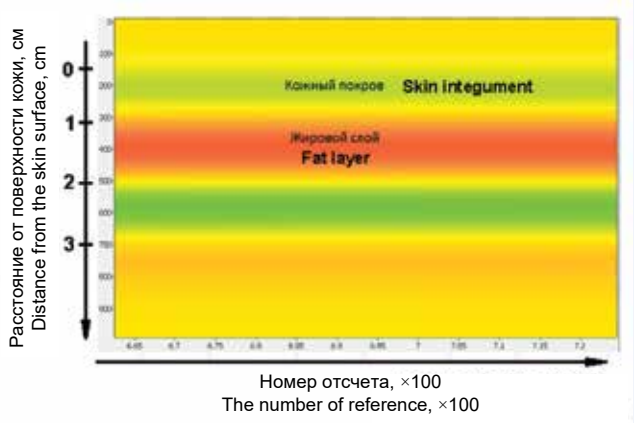

Рис. 7. Цветовое представление зависимости коэффициента отражения от времени в полосе частот до 3 ГГц
Fig. 7. Color representation of the reflection coefficient versus time in the frequency band up to 3 GHz

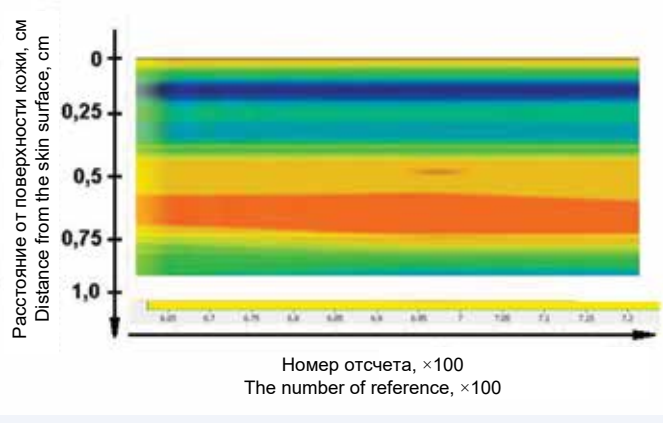

Рис. 8. Цветовое представление зависимости коэффициента отражения от времени выделенного участка в полосе частот 3–10 ГГц
Fig. 8. Color representation of the reflection coefficient versus time of selected area in the frequency band 3–10 GHz

На расстоянии от поверхности 4–12 см неоднородности внутреннего строения менее выражены.

Анализ отраженного сигнала от задней границы объекта позволяет сделать заключение о значительных затуханиях высокочастотных составляющих спектра на участке, соответствующем расстоянию 4–20 см и потере разрешающей способности.

Перспективные направления дальнейших исследований

Для расширения возможностей исследования человека радиолокационным методом нужно, в первую очередь, модернизировать антенную систему. Необходимо сформировать узкую диаграмму направленности антенн для локализации сигналов в зоне работы отдельных органов путем применения поглощающих материалов.

Перспективным направлением для получения пространственного изображения является использование многоканального приема на пространственно разнесенные антенны. В качестве приемных антенн можно применять датчики Холла (ДХ) [7, 8]. Для компенсации низкой чувствительности ДХ нужно использовать увеличение мощности генераторов импульсов. Возможно применение формирователей на лавинных S-диодах, позволяющих увеличить мощность на 3–4 порядка [9].

Заключение

Применение радиолокационных методов для исследования человека будет расширяться с развитием радиоэлектронной базы и методов обработки сигналов. Преимуществами методов являются безопасность (спектральная плотность сигналов на порядки ниже излучений сотовых телефонов), возможность дистанционного исследования человека, работа в реальном масштабе времени, низкая стоимость оборудования. Использование метода в сочетании с хорошим программным обеспечением позволяет проводить диагностику без участия высококвалифицированных специалистов медицинского и радиотехнического профиля.

Литература

1. Bassi M., Caruso M., Khan M.S., Bevilacqua A., Capobianco A., Neviani A. An integrated microwave imaging radar with planar antennas for breast cancer detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2013;61(5):2108–2118. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2247052.
2. Маречек С.В., Поляков В.М., Тищенко Ю.Г. Радиометрические методы исследования температурного режима приповерхностного слоя биоткани. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника.* 2003;(8):57–65.
3. Ubaichin A., Bespalko A., Filatov A., Alexeev E., Zhuk G. Patch antenna for measuring the internal temperature of biological objects using the near-field microwave radiometric method. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016;671(1):18. DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012006.
4. Маречек С.В., Поляков В.М. Возможности оценки приповерхностной структуры биологической ткани по измерению коэффициента отражения на отдельных частотах СВЧ-диапазона. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника.* 2005;(11–12):4–11.
5. Caruso M., Bassi M., Bevilacqua A., Neviani A. A 2–16 GHz 65 nm CMOS stepped-frequency radar transmitter with harmonic rejection for high-resolution medical imaging applications. *IEEE Trans. Circuits and Syst. I Regul. Pap*. 2015;62(2):413–421.
6. Глебович Г.В., Андрианов А.В., Введенский Ю.В. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов; под ред. Г.В. Глебовича. М.: Радио и связь; 1984:255.
7. Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Кошелев В.И. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы; под ред. В.И. Кошелева. Новосибирск: Наука; 2015:484.
8. Авдоченко Б.И., Карлова Г.Ф., Цырендоржиева А.М. Разработка элемента фазированной антенной решетки для системы активной магнитной локации на основе полупроводниковых преобразователей Холла. *Известия высших учебных заведений. Физика.* 2017;60(12/2):230–234.
9. Avdochenko B.I., Karlova G.F. Using hall-effect sensors for weak pulsed magnetic fields measurement. Sibcon–2019.Proceedings. The Tomsk IEEE Chapter @ Student Branch. Tomsk, Russia, April 18–20, 2019. IEEE Catalog Number: CFP17794-CDR.
10. Авдоченко Б.И., Прудаев И.А., Толбанов О.П., Чумерин П.Ю., Юрченко В.И. Твердотельный субнаносекундный СВЧ-коммутатор. *Известия высших учебных заведений. Физика.* 2016;59(8):55–59.

References

1. Bassi M., Caruso M., Khan M.S., Bevilacqua A., Capobianco A., Neviani A. An integrated microwave imaging radar with planar antennas for breast cancer detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2013;61(5):2108–2118. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2247052.
2. Marechek S.V., Polyakov V.M., Tishchenko Yu.G. Radiometric methods for studying the temperature of the surface layer of biological tissue. *Biomedical Technologies and Radioelectronics.* 2003;(8):57–65 (In Russ.).
3. Ubaichin A., Bespalko A., Filatov A., Alexeev E., Zhuk G. Patch antenna for measuring the internal temperature of biological objects using the near-field microwave radiometric method. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016;671(1):18. DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012006.
4. Marechek S.V., Polyakov V.M. Opportunities for assessing the near-surface structure of biological tissue by measuring the reflection coefficient at different frequencies of microwave range. *Biomedical Technologies and Radioelectronics*. 2005;(11–12):4–11 (In Russ.).
5. Caruso M., Bassi M., Bevilacqua A., Neviani A. A 2–16 GHz 65 nm CMOS stepped-frequency radar transmitter with harmonic rejection for high-resolution medical imaging applications. *IEEE Trans. Circuitsaand Syst. I Regul. Pap*. 2015;62(2):413–421.
6. Glebovich G.V., Andrianov A.V., Vvedenskiy Y.V. Research objects using picosecond pulses; ed. G.V. Glebovich. Moscow: Radio and Communications; 1984:255 (In Russ.).
7. Belichenko V.P., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I. Ultrawideband pulse radio systems; ed. V.I. Koshelev. Novosibirsk: Nauka; 2015:484 (In Russ.).
8. Avdochenko B.I., Karlova G.F., Tsyrendorjieva A.M. The development of phased array antenna element for active magnetic positioning system based on semiconductor Hall-effect. *Russian Physics Journal*. 2017;60(12/2):230–234 (In Russ.).
9. Avdochenko B.I., Karlova G.F. Using hall-effect sensors for weak pulsed magnetic fields measurement. Sibcon–2019. Proceedings. The Tomsk IEEE Chapter @ Student Branch. Tomsk, Russia, April 18–20, 2019. IEEE Catalog Number: CFP17794-CDR.
10. Avdochenko B.I., Prudaev I.A., Tolbanov O.P., Chumerin P.Y., Yurchenko V.I. A solid-state sub-nanosecond microwave switch. *Russian Physics Journal*. 2016;59(8):1187–1191.

Информация о вкладе авторов

Авдоченко Б.И. разработал видеоимпульсный локатор с высоким временным разрешением.

Репенко В.Д. провел сбор и первичную обработку информации отраженных от человека сигналов.

Убайчин А.В. обосновал применение радиолокационного метода для диагностики состояния внутренних органов.

Фатеев А.В. оказал помощь в разработке и определении характеристик экспериментальной установки.

Хатьков Н.Д. разработал программное обеспечение по обработке радиолокационного изображения человека.

Issakov V. оказал помощь в разработке радиочастотного тракта экспериментальной установки.

Все авторы дали окончательное согласие на подачу рукописи и согласились нести ответственность за все аспекты работы, ручаясь за их точность и безупречность.

Information on author contributions

Avdochenko B.I. developed the video pulse locator with high time resolution.

Repenko V.D. conducted the collection and pre-processing of signals reflected from human body.

Ubaychin A.V. substantiated the use of radar method for diagnostics of internal organ conditions.

Fateev A.V. assisted in the development and characterization of experimental rig.

Khatkov N.D. developed the software for processing human radar images.

Issakov V. assisted in the development of receiver and transmitter for the experimental rig.

All authors gave their final consent to submit the manuscript and agreed to be responsible for all aspects of the work, vouching for their accuracy and impeccability.

Сведения об авторах

Авдоченко Борис Иванович, д-р техн. наук, профессор кафедры радиоэлектроники и систем связи, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. ORCID 0000-0002-4320-130X.

E-mail: AvdochenkoBI@rss.tusur.ru.

Репенко Владислав Дмитриевич, лаборант, кафедра радиоэлектроники и систем связи, Томский государственный университет систем

Information about the authors

Boris I. Avdochenko, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Department of Radioelectronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. ORCID 0000-0002-4320-130X.

E-mail: AvdochenkoBI@rss.tusur.ru.

Vladislav D. Repenko, Laboratory Assistant, Department of Radioelectronics and Communication Systems; Student, Group No. 146-2,

управления и радиоэлектроники, студент группы 146-2 радиотехнического факультета. ORCID 0000-0002-8793-4927.
E-mail: repvlad@mail.ru.

Убайчин Антон Викторович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, кафедра радиоэлектроники и систем связи, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. ORCID 0000-0001-6284-4645.
E-mail: avubaychin@rss.tusur.ru.

Фатеев Алексей Викторович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой радиоэлектроники и систем связи, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. ORCID 0000-0003-4068-3590.
E-mail: fateev@tusur.ru.

Хатьков Николай Данилович, канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектроники и систем связи, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. ORCID 0000-0003-0999-5246.
E-mail: sydney@t-sk.ru.

Issakov Vadim, заведующий кафедрой электроники, Ph.D., Университет Отто фон Герике в Магдебурге. ORCID 0000-0003-3450-8745.
E-mail: Vadim.Issakov@ovgu.de.

Авдоченко Борис Иванович, e-mail: AvdochenkoBI@rss.tusur.ru.

Поступила 11.03.2020

Radio Engineering Faculty, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. ORCID 0000-0002-8793-4927.
E-mail: repvlad@mail.ru.

Anton V. Ubaychin, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Senior Research Scientist, Department of Radioelectronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. ORCID 0000-0001-6284-4645.
E-mail: avubaychin@rss.tusur.ru.

Aleksey V. Fateev, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Radioelectronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. ORCID 0000-0003-4068-3590.
E-mail: fateev@tusur.ru.

Nikolay D. Khatkov, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Radioelectronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. ORCID 0000-0003-0999-5246.
E-mail: sydney@t-sk.ru.

Vadim Issakov, Ph.D., Chairholder, Chair for Electronics, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg. ORCID 0000-0003-3450-8745.
E-mail: Vadim.Issakov@ovgu.de.

Boris I. Avdochenko, e-mail: AvdochenkoBI@rss.tusur.ru.

Received March 11, 2020