

ОРГАНИЗАЦИЯ СЛУЖБЫ

УДК 616-71, 616.073.75

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО АППАРАТА НЕИНВАЗИВНОЙ ЛУЧЕВОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ¹М. К. Мерданов, ¹М. Д. Алехин, ¹А. П. Зарецкий, ¹С. М. Гаджиева, ²А. В. Пинчук, ²А. Г. Балкаров¹Научно-производственное объединение «Электронное приборостроение», Москва, Россия²Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н. В. Склифосовского, Москва, Россия**ORIGINS OF DEVELOPMENT OF PERSPECTIVE APPARATUS FOR NON-INVASIVE RADIATION DIAGNOSTICS BASED ON MICROWAVES**¹M. K. Merdanov, ¹M. D. Alekhin, ¹A. P. Zaretskiy, ¹S. M. Gadzhieva, ²A. V. Pinchuk, ²A. G. Balkarov¹Research and Production Association «Electronic Instrumentation», Moscow, Russia²Sklifosovsky Research Institute of Emergency Medicine, Moscow, Russia

© Коллектив авторов, 2016 г.

Обоснована возможность создания перспективного аппаратного комплекса неинвазивной медицинской лучевой диагностики функционального состояния внутренних органов и тканей на основе применения методов микроволнового зондирования и визуализации в неионизирующей области электромагнитного спектра с безопасной дозой излучения для организма человека, реализуемых на практике с помощью использования адаптивной цифровой антенной решетки. Перспективный диагностический комплекс будет иметь ранее недостижимые функциональные технологические свойства, в частности, возможность высокоразрешающей визуализации органов и тканей без использования контрастных веществ, обладая при этом более низкой стоимостью по сравнению с существующими системами компьютерной, магнитно-резонансной, позитронно-эмиссионной томографии на рынке.

Ключевые слова: томография, лучевая диагностика, визуализация органов и тканей, микроволновое излучение, адаптивная цифровая антенная решетка.

Background for development of perspective apparatus for non-invasive medical radiation diagnostics of functional state of inner organs and tissues on the base of application of microwave sensing and visualization techniques in non-ionizing range of electromagnetic spectrum safe for human organism, practically implemented using smart antenna array, is given. Perspective medical apparatus will have previously unachievable functional technological characteristics, particularly — principal possibility of high-resolution visualization of organs and tissues without using any contrast agents and costing less in comparison with existing systems of computer, magnetic resonance and positron emission tomography on the market.

Key words: tomography radiation diagnostics, visualization of organs and tissues, microwaves, smart antenna array.

Введение. На современном этапе развития медицинских технологий произошли кардинальные изменения в области диагностической визуализации внутренних органов и тканей человека. Сегодня в Российской Федерации более половины всех диагнозов устанавливаются на основании результатов применения методов неинвазивной лучевой медицинской диагностики (НЛМД) [1].

В настоящее время в клинической практике используются следующие методы НЛМД, каждый из которых обладает своими преимуществами

и недостатками [2]: рентгенодиагностика; ультразвуковое исследование; компьютерная томография; магнитно-резонансная томография; радионуклидная визуализация.

Предлагаемый новый метод НЛМД функционального состояния органов и тканей человека на основе применения неинвазивных методов микроволнового зондирования и визуализации (НММЗВ) в неионизирующей области электромагнитного спектра, реализуемых на практике с помощью использования адаптивной цифровой антенной

решетки (АЦАР) [3], расширит возможности диагностического подхода в скрининге социально-значимых заболеваний, сделав доступными для визуализации практически все органы и системы организма человека с высоким разрешением без применения дорогостоящих контрастных веществ, которые в ряде случаев являются токсичными.

Методы микроволнового зондирования и визуализации в медицине. Неинвазивные методы микроволнового зондирования и визуализации (НММЗВ) органов и тканей организма человека являются относительно новыми в медико-биологической практике, но имеют широкие перспективы клинического применения. Преимуществами микроволновых методов НЛМД являются:

- неинвазивность исследования;
- отсутствие необходимости контакта с объектом зондирования;
- отсутствие необходимости использования контрастных веществ;
- отображение физиологического состояния биообъектов;
- визуализация диэлектрического контраста в органах и тканях;
- безопасность используемого неионизирующего излучения для пациента;
- малая мощность излучения;
- простота проведения исследования для врача и пациента.

Одним из главных достоинств НММЗВ является возможность получения изображений с высоким пространственным разрешением, отражающих физиологическое состояние органов и тканей организма, без дополнительного использования контрастных веществ. Это связано с тем, что диэлектрические свойства биотканей зависят от их текущего физиологического состояния. Например, опухолевые ткани имеют диэлектрические свойства (комплексная относительная диэлектрическая проницаемость), существенно отличные от нормальных здоровых тканей организма [4].

Информативность исследования таких характеристик органов и тканей организма человека как комплексная относительная диэлектрическая проницаемость (ДП) была обоснована ранними работами, в которых отмечается, что изменения электрических параметров биотканей вызывается резонансным поглощением мощности электромагнитного поля полярными молекулами тканей (главным образом, белка и воды). Исследования биофизических свойств биообъекта при использовании НММЗВ показали, что на их диэлектрические характеристики существенное влияние оказывает степень гидратации [5].

Чрезвычайно важной с практической точки зрения приложения НММЗВ органов и тканей является безопасность используемого вида их электромагнитного излучения для организма человека. Это связано как с использованием неионизирующей обла-

сти спектра, так и с тем, что уровни и дозы диагностического излучения малы (сравнимы с мощностью обычного мобильного телефона). Все это позволяет максимально широко использовать НММЗВ в диагностических целях медико-биологической практики, не опасаясь передозировок излучения и кумулятивных, в том числе канцерогенных, эффектов. При этом открывается возможность осуществлять более ранний и регулярный скрининг социально-значимых заболеваний при патологиях внутренних органов среди широких групп населения [6].

Одним из диагностических приложений НММЗВ биообъекта является детекция наличия воды и других жидкостей, накопленных в различных органах и тканях. Например, скрининговая диагностика отека легких, практическая реализуемость которой была продемонстрирована на реалистичных фантомах и органах животных. Использовалась система микроволновой визуализации на основе массива широкополосных антенн в диапазоне от 0,7 до 1,0 ГГц [7].

Целью применения НММЗВ для исследования головного мозга является детекция и локализация поврежденных участков в результате ишемического или геморрагического инсультов, характеризующихся наличием кровяного тромба или области кровоизлияния в мозг, что проявляется в разнице диэлектрических свойств тканей белого и серого веществ головного мозга и крови человека. В эксперименте с использованием реалистичного фантома для анализа были выбраны частоты в диапазоне от 0,5 до 2,5 ГГц, что позволило успешно зафиксировать наличие участка повреждения ткани головного мозга размером в пределах 2 см [7].

На сегодняшний день одним из наиболее распространенных применений НММЗВ биообъекта является ранняя диагностика рака молочной железы, что возможно в силу высокого диэлектрического контраста между раковыми и здоровыми тканями груди. Использование частотного диапазона от 3,1 до 10,6 ГГц позволило зафиксировать на конфокальном изображении наличие опухоли диаметром 2 мм на глубине 3,1 см от поверхности зондирования [7].

Использование НММЗВ для исследования костных тканей имеет место для случая скрининговой диагностики лейкемии костного мозга, а также определения плотности костной ткани при выявлении остеопороза. Лейкемия вызывает неконтролируемый рост популяции клеток в кости, что приводит к повышению диэлектрической проницаемости и уменьшению проводимости соответствующих участков. В ходе эксперимента были получены реалистичные изображения, в целом соответствующие снимкам компьютерной томографии на частотах 0,8 и 1,3 ГГц [7].

Перспективной областью практического применения НММЗВ является также бесконтактная диагностика крови внутри сосудов. Одной из важных задач в этом направлении является неинвазивный мониторинг уровня глюкозы. В эксперименте для

измерения диэлектрической проводимости и проницаемости крови в диапазоне от 1,0 до 10,0 ГГц использовался векторный анализатор цепей. Следует отметить, что подход на основе использования НММЗВ применим при детекции содержания и других аналитов и веществ в крови, обладающих выраженным диэлектрическим контрастом [8].

Исследования диэлектрических свойств компонентов крови на основе применения НММЗВ для случая инфаркта миокарда показали, что изменения биофизических свойств крови проявляются раньше, нежели изменения морфологических, биохимических, гистохимических показателей [8].

Ощутимые изменения диэлектрических показателей крови наблюдаются в случаях заметного изменения количественного или качественного состава крови. Это характерно, например, при проведении лечебного плазмафереза, когда из сосудистого русла удаляется определенное количество плазмы с содержащимися в ней белковыми конгломератами или при проведении заместительной терапии белковыми препаратами [8].

Таким образом, перспективные медицинские технологии на основе НММЗВ при определении комплексной относительной диэлектрической проницаемости и проводимости в исследовании свойств крови могут использоваться не только в комплексе ранних скрининговых диагностических мероприятий, но и в качестве методов контроля эффективности проводимого лечения.

Предпосылки создания перспективного аппарата неинвазивной лучевой медицинской диагностики на основе микроволнового излучения. Практическая реализация НММЗВ возможна на основе использования планарной адаптивной цифровой антенной решетки (АЦАР), состоящей из массива антенных элементов Вивальди, работающих на прием и передачу микроволнового излучения (МИ). В этом случае изображение биологических структур организма формируется следующим образом [9]. Исследуемый орган облучается под разными углами последовательностью сверхширокополосных электромагнитных импульсов сверхмалой мощности с высоким временным разрешением. При этом один антенный элемент АЦАР работает на передачу МИ, а остальные включены на прием отраженного сигнала в процессе его прохождения через толщу биологических тканей. Процедура переключения на передачу МИ, когда остальные работают на прием, повторяется для каждого антенного элемента АЦАР. Амплитуда и время задержки отраженного сигнала используются для построения профиля диэлектрической проницаемости (ДП) биологической ткани с заданного угла наблюдения антенных элементов АЦАР. При этом участки с более высокими значениями ДП характеризуются более высокими значениями амплитуды отраженного сигнала. Однородные по ДП участки биологических тканей отображаются в виде плоских участков с равномерным затуханием, а границы раздела сред с раз-

личными значениями ДП отображаются в виде характерных пиков. Использование множества антенных элементов АЦАР, работающих на прием при регистрации отраженного сигнала позволяет осуществлять пространственную фокусировку и формировать сетку изображения в соответствии с профилем распределения ДП при последовательном переключении антенных элементов, работающих на передачу МИ.

Ожидаемыми функциональными характеристиками создаваемого перспективного аппаратно-программного комплекса НЛМД на основе МИ являются:

- пространственное разрешение — до 1 мм;
- временное разрешение — 100 Гц;
- предельная глубина зондирования — от 30 см;
- диапазон частот зондирования — от 1 до 12 ГГц;
- ширина диаграммы направленности (по азимуту) — до 15°;
- ширина диаграммы направленности (по углу места) — до 15°;
- пиковая мощность излучения одного антенного элемента — 8 мВт;
- средняя мощность излучения одного антенного элемента — 1 мВт;
- ширина одного импульса в пачке — 0,1 нс;
- количество импульсов в одной пачке — 64;
- коэффициент усиления антенного элемента — 30 дБ.

Ожидается, что при использовании аппаратно-программного комплекса НЛМД на основе МИ станет возможен скрининг следующих основных групп патологий внутренних органов (сердце, почки, печень, легкие, головной мозг и др.) и тканей человека с высоким разрешением без применения контрастных веществ:

- структурные нарушения;
- нарушения кровоснабжения;
- инфекционно-воспалительные процессы;
- опухолевые процессы.

Перспективный КНМД функционального состояния биообъекта на основе НММЗВ будет обеспечивать решение следующих функциональных задач медицинской диагностики в скрининге социально-значимых заболеваний:

- неинвазивная диагностика патологий сердца:
 - структурные нарушения сердца (гипертрофия и дистрофия отделов сердца);
 - нарушения кровоснабжения сердца (ишемическая болезнь сердца, кровотечения и кровоизлияния);
 - инфекционно-воспалительные процессы в сердце (эндокардиты, миокардиты, перикардиты);
 - опухоли в сердце (доброкачественные опухоли, злокачественные опухоли);
- неинвазивная диагностика патологий печени:
 - структурные нарушения печени (склеротическое, гипертрофическое, дистрофическое, фиброзное изменения, гепатомегалия, цирроз);

- нарушение кровоснабжения печени (нарушения воротного кровообращения, нарушения внутрипеченочного кровообращения);
- инфекционно-воспалительные процессы в печени (гепатиты);
- опухоли в печени (доброкачественные опухоли, злокачественные опухоли);
- неинвазивная диагностика патологий почек:
 - структурные нарушения почек (нарушения в размерах, утолщения слоев, нарушения сосудистой архитектоники);
 - нарушение кровоснабжения почек (токсическая почка, тромбоз почечной артерии, стеноз почечной артерии, острая почечная недостаточность, кровотечения и кровоизлияния);
 - инфекционно-воспалительные процессы в почках (инфицирования почек, пиелонефрит, гломерулонефрит);
 - опухоли в почках (доброкачественные опухоли, злокачественные опухоли);
- неинвазивная диагностика патологий легких:
 - структурные нарушений легких (пневмосклероз, эмфизема, ателектаз);
 - нарушения кровоснабжения легких (отек легких, тромбоэмболия ветвей легочной артерии, кровотечения и кровоизлияния);
 - инфекционно-воспалительные процессы (грибковые, бактериальные, вирусные процессы, абсцесс, пневмония);
 - опухоли в легких (доброкачественные опухоли, злокачественные опухоли);

- неинвазивная диагностика патологий головного мозга:
 - структурные патологии головного мозга (киста головного мозга, артериовенозная мальформация);
 - нарушения кровоснабжения головного мозга (инсульт геморрагический, инсульт ишемический, дисциркуляторной энцефалопатии, хронические нарушения кровообращения, кровотечения и кровоизлияния);
 - инфекционно-воспалительные процессы в головном мозге (энцефалиты, энцефаломиелиты, менингиты);
 - опухоли в головном мозге (доброкачественные опухоли, злокачественные опухоли).

Выводы. Таким образом, перспективный аппаратный комплекс неинвазивной медицинской диагностики функционального состояния внутренних органов и тканей на основе применения методов микроволнового зондирования и визуализации (в неионизирующей области электромагнитного спектра и с безопасной дозой излучения для организма человека), реализуемых на практике с помощью использования адаптивной цифровой антенной решетки, будет иметь ранее недоступимые функциональные технологические свойства, в частности, возможность высокоразрешающей визуализации органов и тканей без использования контрастных веществ, обладая при этом существенно более низкой стоимостью по сравнению с существующими системами компьютерной, магнитно-резонансной, позитронно-эмиссионной томографии на рынке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т. Н., Карлова Н. А., Бойцова М. Г. Современные стандарты лучевой диагностики в системе обязательного медицинского страхования // *Лучевая диагностика и терапия*. — 2016. — № 1. — С. 103–105.
2. Синицын В. Е., Терновой С. К. Новые технологии лучевой диагностики // *Врач*. — 2005. — № 4. — С. 28–32.
3. Beadaa J. M. Design and Implementation of Microwave Imaging Systems for Medical Applications // A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. — University of Queensland, 2014. — 206 p.
4. Семенов С. Ю. Микроволновая томография биологических объектов: дис. ... доктора физ.-мат. наук в форме научного доклада. — М., 1999. — 51 с.
5. Feldman Y., Ermolina I., Hayashi Y. Time domain dielectric spectroscopy study of biological systems // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. — 2003. — Vol. 10. — Iss. 5. — P. 728–753.
6. Бугаев А. С., Ивашов С. И., Иммореев И. Я. Биорадиолокация. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 396 с.
7. Rezaeieh S., Zamani A., Bialkowski K., Mahmoud A., Abbosh A. Feasibility of Using Wideband Microwave System for Non-Invasive Detection and Monitoring of Pulmonary Oedema // *Nature Scientific Reports*. — 2015. — Article number #14047 (online).
8. Chandra R., Zhou H., Balasingham I., Narayanan R. On the Opportunities and Challenges in Microwave Medical Sensing and Imaging // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. — 2015. — Vol. 62, Iss. 7. — P. 1667–1682.
9. Li X., Hagness S. A Confocal Microwave Imaging Algorithm for Breast Cancer Detection // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. — 2001. — Vol. 11, Iss. 3 — P. 130–132.

REFERENCES

1. Trofimova T. N., Karlova N. A., Bojcova M. G., *Luchevaya diagnostika i terapiya*, 2016, No. 1, pp. 103–105.
2. Sinicyn V. E., Ternovoj S. K., *Vrach*, 2005, No. 4, pp. 28–32.
3. Beadaa J. M. *Design and Implementation of Microwave Imaging Systems for Medical Applications, A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy*, University of Queensland, 2014, 206 p.

4. Semenov S. Yu. *Mikrovolnovaya tomografiya biologicheskikh obekтов: dis. ... doktora fiz.-mat. nauk v forme nauchnogo doklada*, Moscow, 1999, 51 p.
5. Feldman Y., Ermolina I., Hayashi Y., *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, vol. 10, Iss. 5, pp. 728–753.
6. Bugaev A. S., Ivashov S. I., Immoreev I. Ya. *Bioradiolokaciya*, Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2010, 396 p.
7. Rezaeieh S., Zamani A., Bialkowski K., Mahmoud A., Abbosh A., *Nature Scientific Reports*, 2015, Article number #14047 (online).
8. Chandra R., Zhou H., Balasingham I., Narayanan R., *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2015, vol. 62, Iss. 7, pp. 1667–1682.
9. Li X., Hagness S., *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2001, vol. 11, Iss. 3, pp. 130–132.

Поступила в редакцию: 14.09.2016 г.

Контакт: Алехин Максим Дмитриевич, maksim.alekhin@gmail.com

Сведения об авторах:

Мерданов Мердан Казимагомедович — кандидат технических наук, генеральный директор — генеральный конструктор Научно-производственного объединения «Электронное приборостроение», 107014, Москва, Боевская 2-я улица, д. 2;
Алехин Максим Дмитриевич — кандидат технических наук, начальник отдела биомедицинской техники и технологии Научно-производственного объединения «Электронное приборостроение», 107014, Москва, Боевская 2-я улица, д. 2, тел.: +7 916 792-38-15;
e-mail: maksim.alekhin@gmail.com;
Зарецкий Алексей Петрович — кандидат технических наук, заместитель начальника отдела биомедицинской техники и технологии Научно-производственного объединения «Электронное приборостроение», 107014, Москва, Боевская 2-я улица, д. 2;
Гаджиева Саида Мердановна — ведущий научный сотрудник отдела биомедицинской техники и технологии Научно-производственного объединения «Электронное приборостроение», 107014, Москва, Боевская 2-я улица, д. 2;
Пинчук Алексей Валерьевич — кандидат медицинских наук, заведующий отделением трансплантации почки и поджелудочной железы Научно-исследовательского института скорой помощи им. Н. В. Склифосовского, 129010, Москва, Большая Сухаревская пл. д. 3;
Балкаров Аслан Галиевич — кандидат медицинских наук, врач-хирург отделения трансплантации почки и поджелудочной железы Научно-исследовательского института скорой помощи им. Н. В. Склифосовского, Россия, 129010, Москва, Большая Сухаревская пл. д. 3.



XI Всероссийский национальный конгресс лучевых диагностов и терапевтов

Радиология–2017

23–25 мая 2017 года
г. Москва, МВЦ «Крокус Экспо»

Подробная информация на сайте <http://www.radiology-congress.ru/>