

УДК 621.37:616-71

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ТРЕХМЕРНОЙ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ ЧЕЛОВЕКА

А. В. Демьяненко¹, Я. В. Невструев¹, О. Е. Семерник²

¹ Южный федеральный университет, 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, д.44

² Ростовский государственный медицинский университет, 344022, г. Ростов-на-Дону,
пер. Нахичеванский, д.29

Статья поступила в редакцию 10 октября 2019 г.

Аннотация. Представлены результаты разработки трехмерной упрощенной модели грудной клетки человека, разработанной на основе МРТ- и КТ-обследования, для проведения моделирования распространения электромагнитных волн с целью разработки безвредных неинвазивных методов диагностики заболеваний бронхолегочной системы, с помощью современных микроволновых технологий.

Ключевые слова: бронхиальная астма, модель грудной клетки, неинвазивная диагностика, СВЧ-технологии, радиочастотное сканирование.

Abstract. This article is devoted to the results of the development of a three-dimensional simplified model of the human chest on the basis of MRI and CT examinations, for modeling the propagation of electromagnetic waves in order to develop harmless non-invasive methods for diagnosing diseases of the bronchopulmonary system using modern microwave technologies.

The developed model of the chest area allows studying the features of the propagation of electromagnetic waves and simulate antenna applicators of various frequency ranges used in modern diagnostic technology.

Based on the results of electrodynamic modeling of the chest area, it can be seen that the shape and location of the heterogeneity can be most accurately determined at the frequency of 1500 MHz. Further increase in the frequency leads to the significant deterioration in the results due to an increase in the absorption of electromagnetic

waves in the tissues of the human body. The presence of bones in the model of the chest area does not significantly affect the possibility of detecting heterogeneity that mimics sputum.

Key words: bronchopulmonary diseases, bronchial asthma, chest model, non-invasive diagnostics, microwave technology, radiofrequency scanning.

Введение

Одну из лидирующих позиций в списке наиболее распространённых заболеваний занимают респираторные заболевания, наиболее серьёзные из которых – бронхиальная астма и пневмония [1,2]. Несмотря на современные научные достижения до настоящего времени не разработаны методы и устройства, позволяющие осуществлять безвредную неинвазивную диагностику изменений в бронхолёгочной системе, вызванных заболеванием.

В настоящее время наиболее распространёнными методами диагностики бронхолегочных заболеваний в клинической практике являются рентгенологические (флюорография рентгеноскопия, рентгенография, компьютерная томография). Основным недостатком данных методов является невысокая чувствительность к наличию мокроты в легких, которая обнаруживается при её более чем 30% увеличения от нормального состояния. Также недостатками является воздействие ионизирующего излучения, высокая стоимость обследования.

С каждым годом в медицине радио- (РЧ) и сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение используется более активно [3]. Основными областями применения СВЧ-излучения являются измерение содержания жидкости в тканях человека, обнаружение рака молочной железы, исследование движения артериальной стенки, наблюдение сердечной и нервной активности, а также неинвазивная терапия, осуществляющаяся путем нагрева тканей при воздействии СВЧ-излучения [4-6]. Однако, коммерчески доступного устройства, которое бы позволило осуществлять неинвазивную диагностику заболеваний бронхолегочной системы, на основе СВЧ-методов, в настоящее время нет.

Для разработки современных высокотехнологичных методов диагностики заболеваний бронхолегочной системы, а также автоматизированных систем диагностики заболеваний и мониторинга состояния пациентов, необходимы электродинамические модели, на основе которых будет проводиться разработка самих методов, а также апробация и проверка эффективности устройств диагностики, реализующих указанные методы. Кроме того, необходимо проведение фундаментальных исследований распространения радиоволн и СВЧ-сигналов различных типов в грудной клетке человека в здоровом состоянии и при наличии той или иной патологии.

В настоящей работе представлены результаты научного исследования, направленного на разработку доступных электродинамических моделей грудной клетки человека в здоровом состоянии и при наличии различных патологий, вызванных бронхолегочными заболеваниями, а также моделирование и экспериментальное исследование распространения электромагнитных волн и СВЧ-сигналов различного типа, в том числе синусоидальных, импульсных и хаотических, в грудной клетке человека с целью разработки высокотехнологичных безвредных неинвазивных методов, устройств и автоматизированных системы диагностики заболеваний бронхолегочной системы, основывающихся на современных микроволновых технологиях.

1. Методы исследования

Для разработки трехмерных электродинамических моделей использованы методы синтеза электродинамических моделей по эмпирическим данным, полученным в ходе статистического анализа результатов рентгенографического исследования, МРТ- и КТ-исследования грудной клетки человека в здоровом состоянии и при наличии патологических изменений, вызванных бронхолегочными заболеваниями.

Комплексное обследование пациентов с бронхолегочной патологией (острый простой бронхит, обструктивный бронхит, бронхиолит, различные

формы внебольничных пневмоний и бронхиальной астмы) с применением стандартных методик (изучение клинико-anamнестических данных, исследование лабораторных параметров, рентгенологическое обследование, пикфлоуметрия, спирография, бодиплетизмография) позволяет получить данные для разработки трехмерных электродинамических моделей грудной клетки человека в здоровом состоянии и при наличии патологий различной степени тяжести.

На основании данных обследования и анализа определены габаритные параметры тканей и органов, составляющих грудную клетку. Таким образом, габаритные параметры трехмерных электродинамических моделей максимально приближены к реальным параметрам грудной клетки человека (рис. 1).

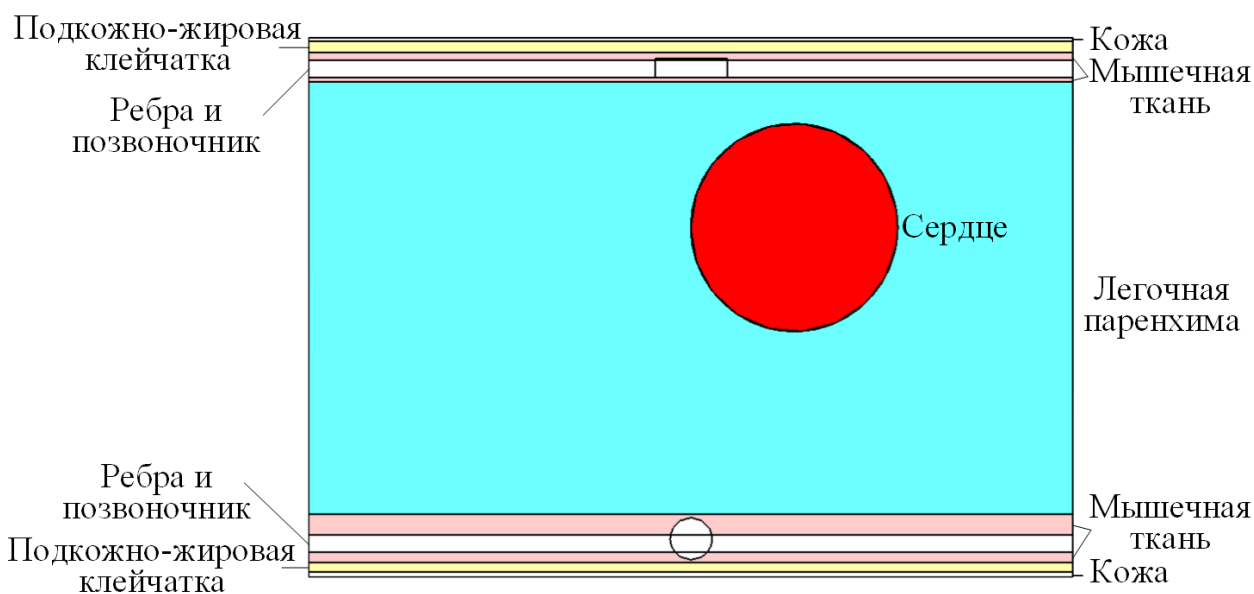


Рис. 1. Структура модели участка грудной клетки в CST STUDIO.

Электрофизические параметры тканей и органов в электродинамической модели грудной клетки человека соответствуют реальным значениям указанных параметров тканей тела человека, что обеспечивает близость результатов моделирования к реальным условиям, наблюдаемым в процессе экспериментального исследования.

Для реализации поставленной задачи используются методы электродинамического моделирования электромагнитных полей с применением

современных систем автоматизированного проектирования (САПР), в том числе CST STUDIO (рис. 2).

Построенная модель не ставит целью полностью повторить внутреннюю структуру грудной клетки человека, а предназначена для выявления основных принципов распространения электромагнитных волн при учете внутренних неоднородностей.

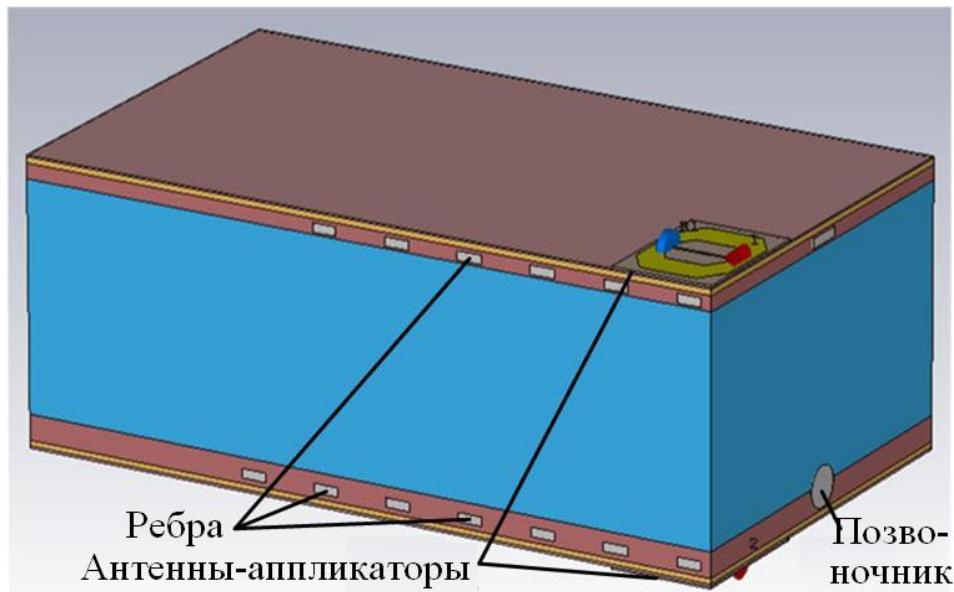


Рис. 2. Модель участка грудной клетки, с расположенными на ней антеннами-апликаторами.

Исследование распространения электромагнитного поля в построенной модели производилось с помощью двух антенн-апликаторов [7, 8], расположенных напротив друг друга при непосредственном контакте с моделью грудной клетки (рис. 2), с целью минимизации отражения электромагнитного излучения (ЭМИ) от её поверхности. Конструкция и габаритные размеры используемых антенн-апликаторов оптимизированы для наилучшего излучения и приема ЭМИ в диапазоне частот от 900 до 1500 МГц [9].

Анализ распространения электромагнитных волн СВЧ-диапазона в модели грудной клетки человека позволит определить их эффективность для неинвазивной диагностики бронхолегочных заболеваний и разработать соответствующие методы и устройства диагностики.

2. Полученные результаты

Моделирование распространения электромагнитных волн выполнено в диапазоне частот от 900 МГц до 1500 МГц. Таким образом, в процессе моделирования перекрыт весь диапазон частот зондирующих сигналов [10], в пределах которого возможно обеспечить точную локализацию изменений в паренхиме легких человека, вызванных тем или иным заболеванием, и безвредную диагностику заболеваний бронхолегочной системы.

В данной работе было произведено измерение фазы коэффициента прохождения СВЧ-сигнала через грудную клетку путем радиочастотного сканирования, то есть синхронного перемещения, приемного и передающего аппликаторов по поверхности модели. На рисунке 3 представлена исследуемая модель грудной клетки, содержащая неоднородность сферической формы объемом 33 мл, что соответствует диаметру неоднородности 22 мм, имитирующему избыточное скопление мокроты в грудной клетке человека.

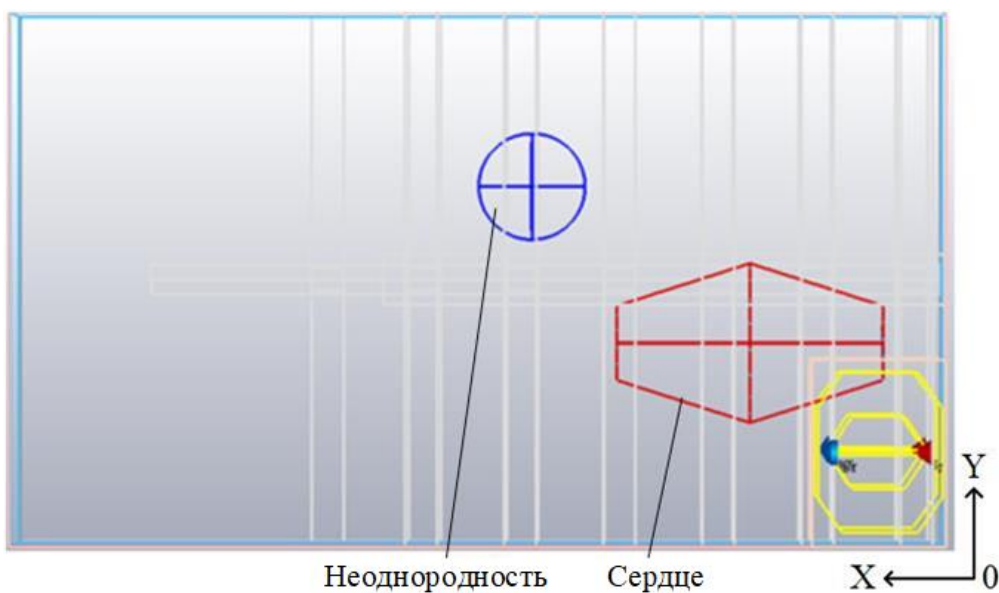


Рис. 3. Модель участка грудной клетки, содержащая неоднородность.

Сканирование производилось с шагом 10 мм по оси Y, и с шагом 15 мм по оси X.

На рис. 4 представлены результаты измерения фазы коэффициента передачи, полученные с помощью радиочастотного сканирования модели

участка грудной клетки гармоническим СВЧ-сигналом с частотой 900 МГц при отсутствии (рис. 4а) и при наличии неоднородности (рис. 4б), имитирующей излишнее количество мокроты в фантоме грудной клетки человека. Черными точками отмечены места расположения приемной и передающей антенн-аппликаторов, в которых были определены значения фазы коэффициента прохождения СВЧ-сигнала при сканировании. Результаты измерений, дополненные координатами приемного и передающего аппликатора, обрабатываются в MATLAB. После завершения сканирования осуществлялась аппроксимация результатов и их визуализация.

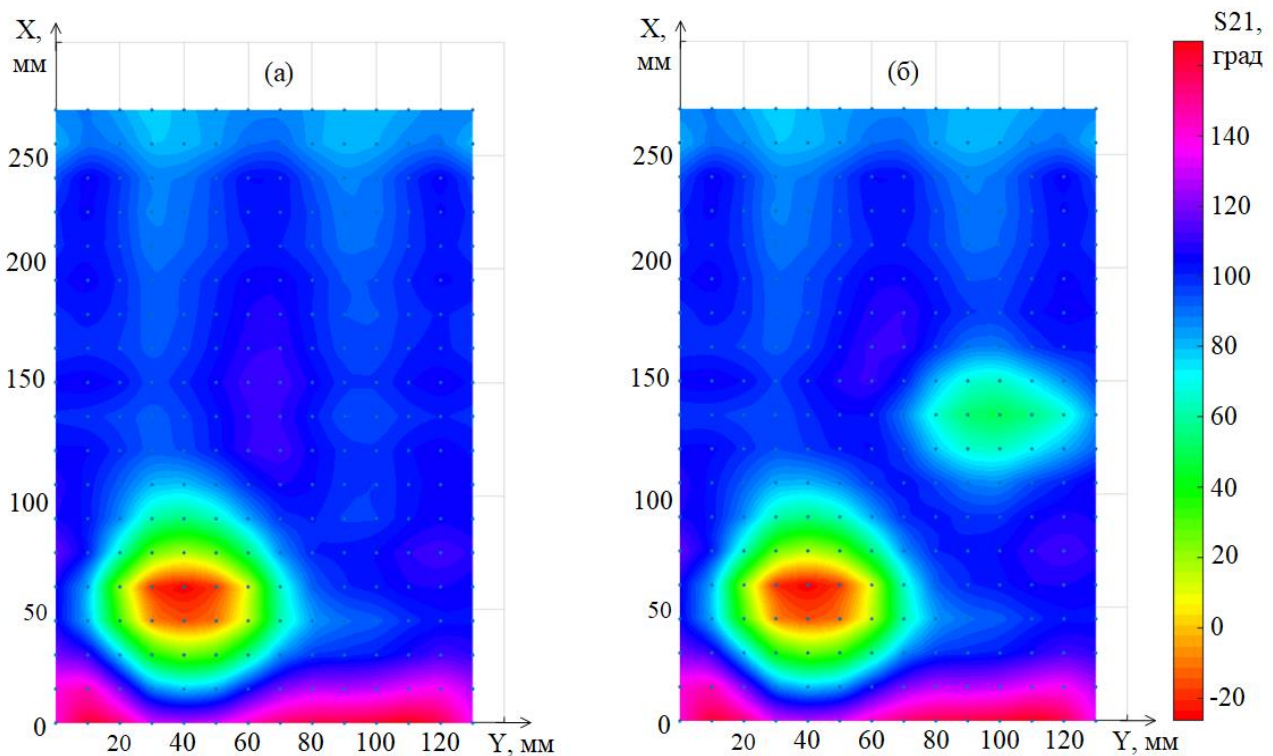


Рис. 4. Результаты измерений фазы коэффициента передачи с сигналом 900 МГц без неоднородности (а) и с неоднородностью (б).

Из рис. 4а видно, что при наличии только естественных неоднородностей (сердце, позвоночник и т. д.) в модели грудной клетки человека фаза коэффициента прохождения (S_{21}) преимущественно равномерна и приблизительно равна 100° , за исключением области расположения сердца, в которой наблюдается уменьшение фазы коэффициента прохождения до -20° . Кости и позвоночник не оказывают существенного влияния на результат.

Из рис. 4b видно, что в области расположения неоднородности наблюдается изменение фазы коэффициента прохождения до 50° , позволяющее определить расположение неоднородности и оценить её размеры и форму.

На рис. 5 представлены результаты измерения фазы коэффициента передачи, полученные с помощью радиочастотного сканирования модели участка грудной клетки гармоническим СВЧ-сигналом с частотой 1200 МГц при отсутствии неоднородности (рис. 5a) и при наличии неоднородности (рис. 5b), имитирующей излишнего количества мокроты в фантоме грудной клетки человека.

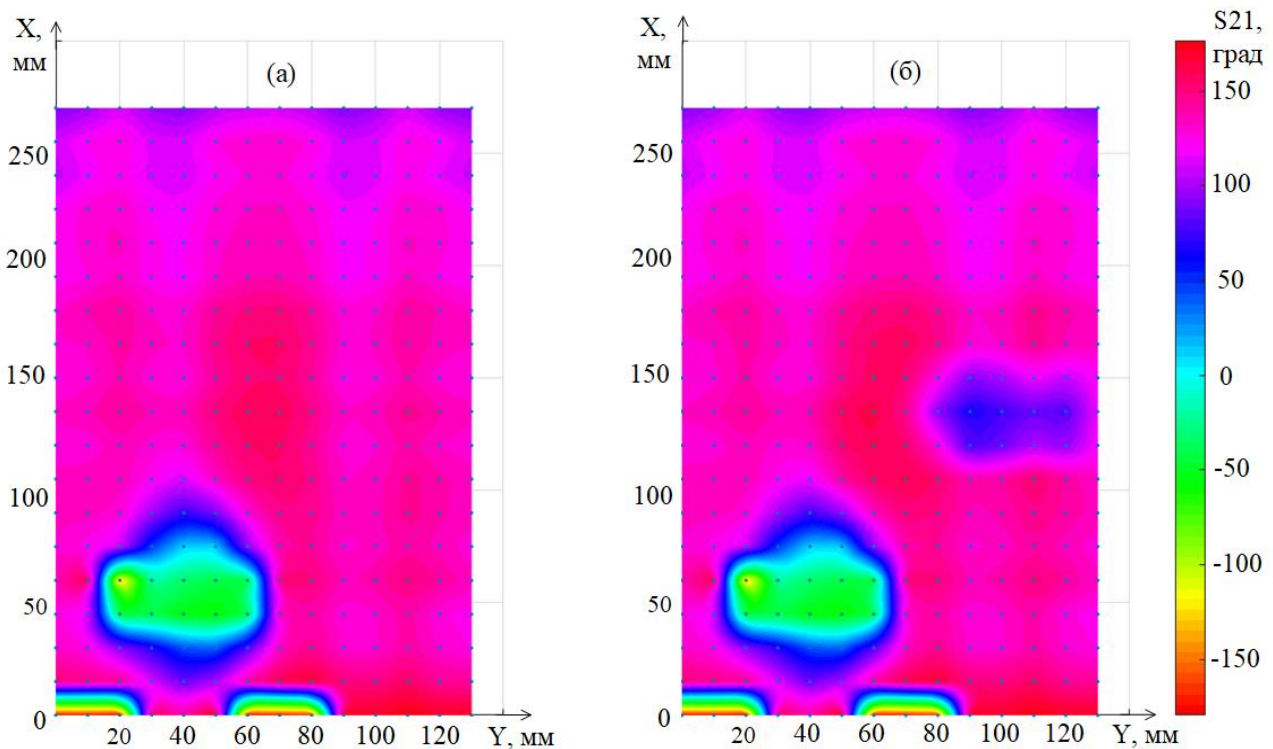


Рис. 5. Результаты измерений фазы коэффициента передачи с сигналом 1200 МГц без неоднородности (a) и с неоднородностью (б).

Из рис. 5a видно, что при наличии только естественных неоднородностей фаза коэффициента прохождения (S_{21}) также равномерна, но её значение на частоте 1200 МГц стало в среднем равно 110° . Область расположения сердца хорошо заметна, но корректно определить форму по данным результатам не удастся.

Из рис. 5b можно заметить, что в области расположения неоднородности, имитирующей мокроту, фаза коэффициента прохождения стала равна 50° . По

сравнению с результатом, полученным для частоты 900 МГц, область положения мокроты расширилась, но точную форму неоднородности на данном рисунке определить не удастся.

На рис. 6 представлены результаты измерения фазы коэффициента передачи, полученные с помощью радиочастотного сканирования модели участка грудной клетки гармоническим СВЧ-сигналом с частотой 1500 МГц при отсутствии неоднородности (рис. 6а) и при наличии неоднородности (рис. 6б), имитирующей излишнее количества мокроты в фантоме грудной клетки человека.

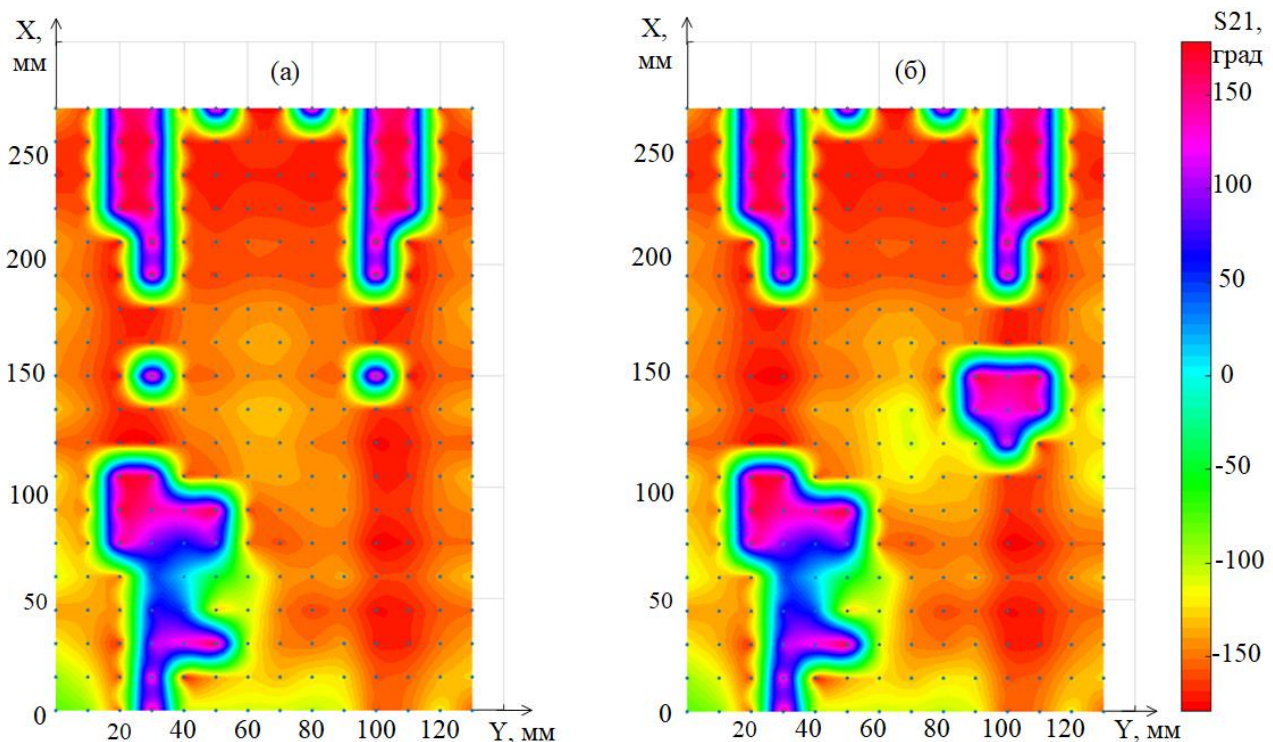


Рис. 6. Результаты измерений фазы коэффициента передачи с сигналом 1500 МГц без неоднородности (а) и с неоднородностью (б).

Из рис. 6а видно, что при наличии только естественных неоднородностей коэффициент прохождения стал менее равномерен, чем в предыдущих результатах. Появились побочные области с фазой 130° , которые невозможно отличить от той, в которой расположено сердце и неоднородность, имитирующая мокроту, в следствии чего нельзя точно определить их расположение в грудной клетке.

Дальнейшее увеличение частоты исследования приводит к ещё большему ухудшению результатов, в следствии увеличения поглощения СВЧ-сигнала в модели грудной клетки человека.

3. Сравнение результатов

Было произведено сравнение с результатами предыдущего исследования [11], в котором проводилось измерение амплитуды коэффициента прохождения в аналогичной модели участка грудной клетки, имеющей неоднородность, имитирующую излишнее скопление мокроты.

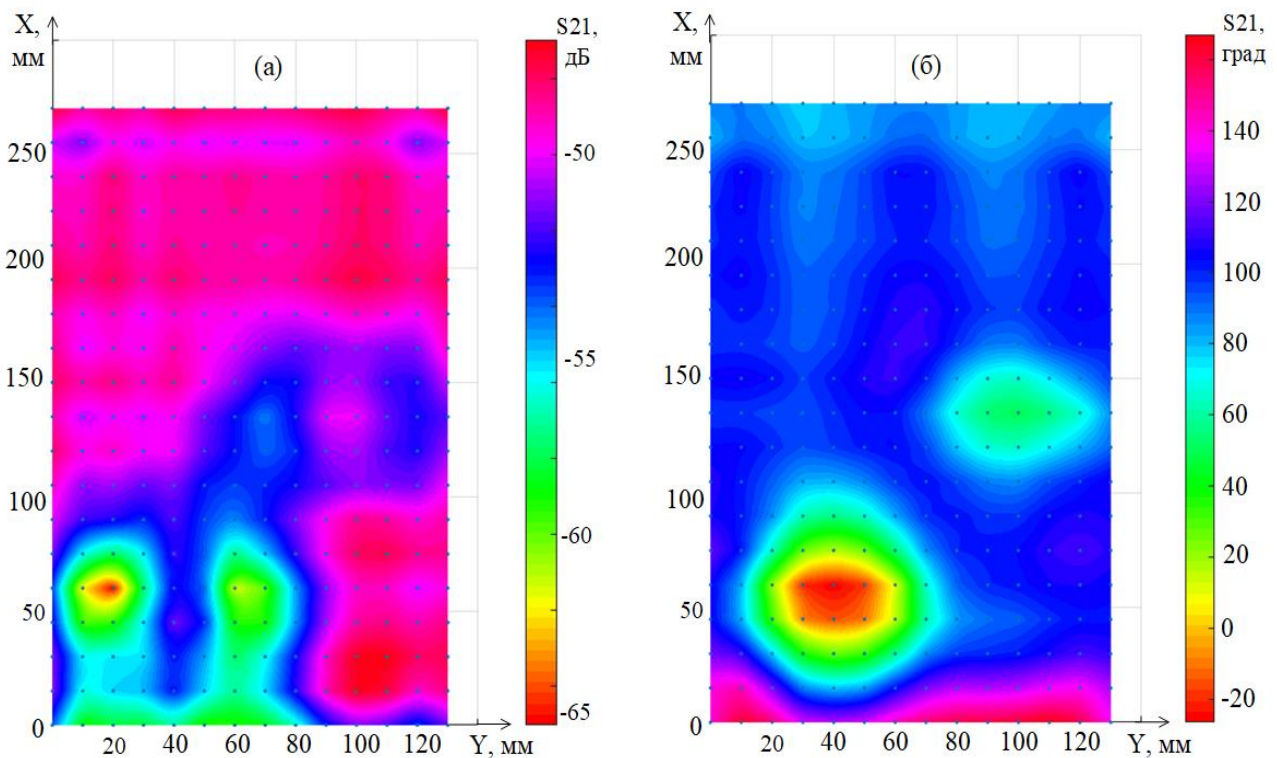


Рис. 7. Результаты измерений амплитуды (а) и фазы (б) коэффициента передачи с сигналом 900 МГц.

На рис. 7 представлены результаты измерения амплитуды (а) и фазы (б) коэффициента передачи, полученные с помощью радиочастотного сканирования модели участка грудной клетки гармоническим СВЧ-сигналом с частотой 900 МГц при наличии неоднородности, имитирующую излишнее скопление мокроты.

Из рис. 7 видно, что по изображению, полученному при измерении фазы коэффициента передачи (б) на частоте 900 МГц можно наиболее точно

определить место расположения и форму неоднородности, чем по результатам измерения амплитуды коэффициента передачи (а).

На рис. 8 представлены результаты измерения амплитуды (а) и фазы (б) коэффициента передачи, полученные с помощью радиочастотного сканирования модели участка грудной клетки гармоническим СВЧ-сигналом с частотой 1200 МГц при наличии неоднородности, имитирующую излишнее скопление мокроты.

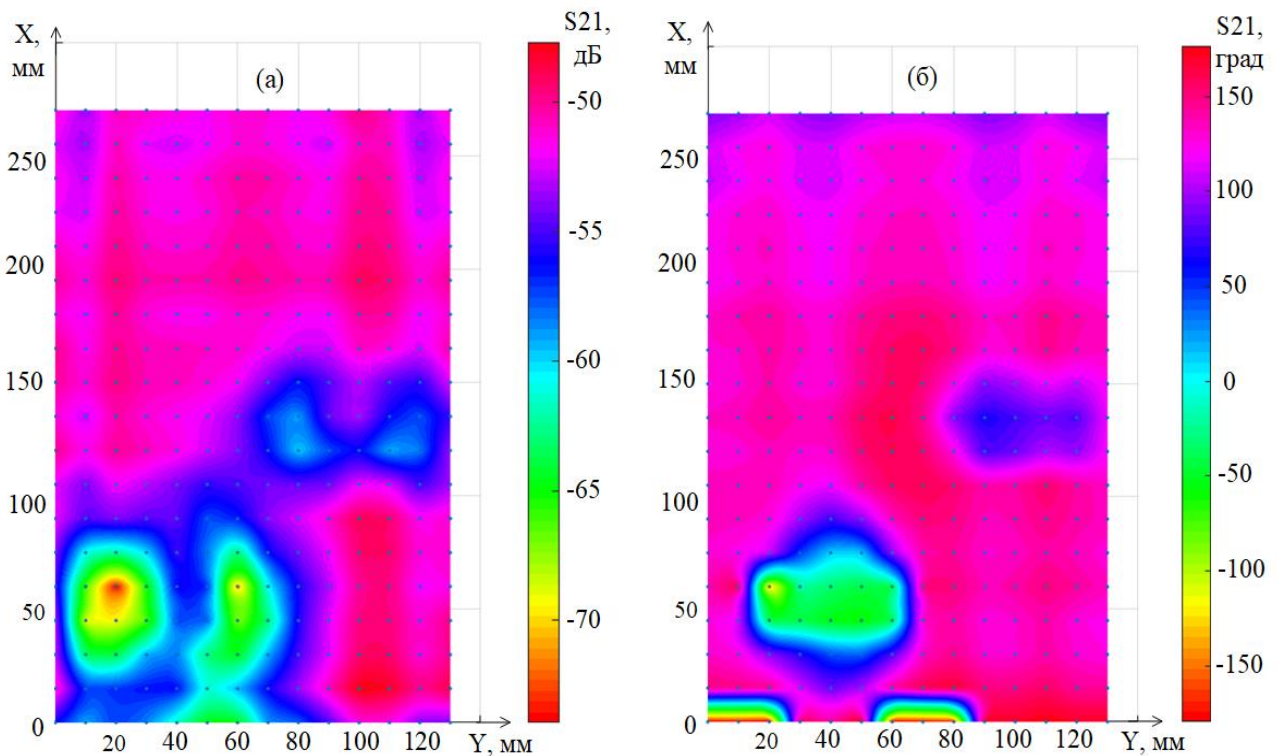


Рис. 8. Результаты измерений амплитуды (а) и фазы (б) коэффициента передачи с сигналом 1200 МГц.

Из рис. 8 видно, что полученные результаты коэффициента прохождения сопоставимы между собой, но наиболее точно форму и положение неоднородности можно определить по измерениям фазы (б).

На рис. 9 представлены результаты измерения амплитуды (а) и фазы (б) коэффициента передачи, полученные с помощью радиочастотного сканирования модели участка грудной клетки гармоническим СВЧ-сигналом с частотой 1500 МГц при наличии неоднородности, имитирующую излишнее скопление мокроты.

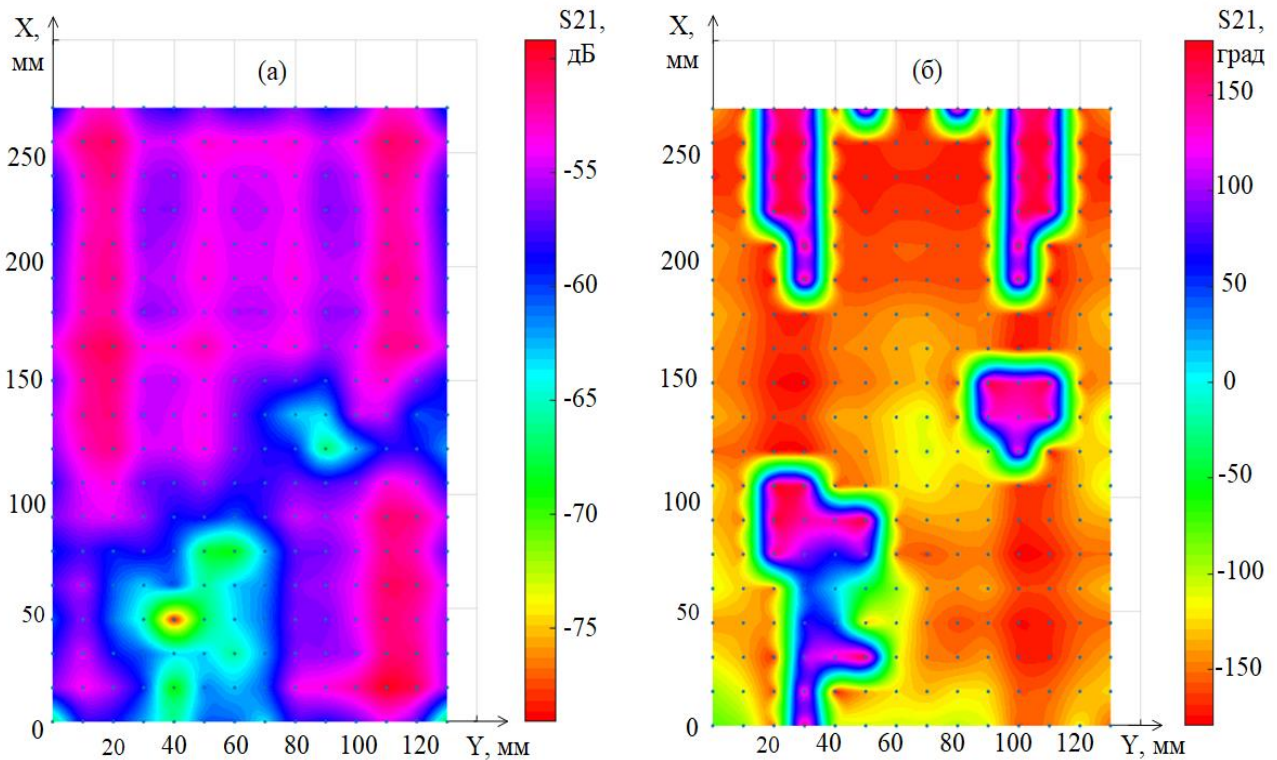


Рис. 9. Результаты измерений амплитуды (а) и фазы (б) коэффициента передачи с сигналом 1500 МГц.

Из рис. 9 видно, что по результатам измерений амплитуды коэффициента передачи (а) более равномерные, в следствии чего по ним можно наиболее точно определить форму и расположение неоднородности.

Таким образом, исходя из результатов сравнения, можно отметить, что измерение фазы коэффициента передачи способствует более точному определению формы и места расположения сердца и неоднородности, имитирующее излишнее скопление мокроты до частоты 1400 МГц. При измерении амплитуды коэффициента прохождения наилучший результат наблюдается при частоте 1500 МГц.

Заключение

Представлена трехмерная модель грудной клетки человека с упрощенной структурой, достаточной для проведения исследования распространения электромагнитных волн и апробации разрабатываемых компонентов для устройств диагностики и мониторинга, основанных на использовании электромагнитного излучения. Уровень детализации ограничен пригодностью

для дальнейшего изготовления фантома грудной клетки человека в здоровом состоянии и при наличии патологий с использованием технологий 3D-печати.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-20045\18.

Литература

1. National Heart Lung and Blood Institute, “What is Asthma?,” NIH (2012) [Online]. Available: <https://www.nhlbi.nih.gov/health-topics/asthma>
2. Centers for Disease Control and Prevention, “Asthma,” (2012) [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/asthma/faqs.htm>
3. Ahdi Rezaeieh S., Zamani A., Bialkowski K.S., Mahmoud A., Abbosh A.M. Feasibility of Using Wideband Microwave System for Non-Invasive Detection and Monitoring of Pulmonary Oedema. *Scientific Reports*, 2015, Vol. 5(19), pp. 1-11.
4. Соколова В.С., Климов А.Б., Гасс М.В., Свирин А.А. Прибор для исследования кровенаполнения и вентиляции лёгких // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника, 2003, №5, С. 3-7.
5. Семерник И.В., Демьяненко А.В., Топалов Ф.С., Невструев Я.В., Семерник О.Е., Лебеденко А.А. Автоматизированная система ранней диагностики патологических изменений в бронхолегочной системе на основе радиочастотного сканирования. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/6/text.pdf>
6. Semernik I.V., Dem’yanenko A.V., Topalov F.S., Semernik O.E., Lebedenko A.A. Complex System for Monitoring the Patient's Condition and Diagnosis of Bronchial Asthma. *Journal of Biomedical Physics and Engineering*, 2019, pp. 1-8 DOI: [10.31661/jbpe.v0i0.1022](https://doi.org/10.31661/jbpe.v0i0.1022)
7. Семерник И.В., Демьяненко А.В., Невструев Я.В. Разработка широкополосного СВЧ-аппликатора для устройств диагностики

- бронхолегочных заболеваний // 28-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КРЫМИКО'2018), Севастополь, 09-15 сентября 2018 г., С. 1487-1493.
8. Celik N., Gagarin R., Baker J., Youn H., Iskande M.F. A Noninvasive Microwave Sensor and Signal Processing Technique for Continuous Monitoring of Vital Signs. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, Vol. 10, pp. 286-289 DOI: [10.1109/LAWP.2011.2132690](https://doi.org/10.1109/LAWP.2011.2132690)
 9. Semernik I.V., Dem'yanenko A.V., Nevstruev Y.V. Designing of broadband microwave applicator for the bronchial asthma diagnosis device. *Proceedings of 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2018, pp. 1199-1202 DOI: [10.1109/EIConRus.2018.8317306](https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317306)
 10. Semernik O.E., Semernik I.V., Dem'yanenko A.V., Topalov F.S., Lebedenko A.A. Methods of non-invasive diagnosis of bronchial asthma in patients of all age groups based on microwave technology. *Medical Equipment*, 2017, No.2, pp. 35-38. DOI: [10.1007/s10527-017-9698-3](https://doi.org/10.1007/s10527-017-9698-3)
 11. Nevstruev Y.V.. Propagation of Microwave Electromagnetic Waves in the Human Thorax. *Proceedings of International Scientific Conference Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2019)*, Divnomorskoe, Krasnodar region, Russia, pp. 212-215. Published in IEEE, DOI: [10.1109/RSEMW.2019.8792686](https://doi.org/10.1109/RSEMW.2019.8792686)

Для цитирования:

А. В. Демьяненко, Я. В. Невструев, О. Е. Семерник. Распространение электромагнитных волн в трехмерной упрощенной модели грудной клетки человека. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct19/3/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.10.3