



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-91-1-52-60>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.94+577.3

МОДЕЛЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА БИОЛОГИЧЕСКИМИ ТКАНЯМИ

И.А. ЛАГУЦКИЙ, М.В. ДАВЫДОВ, В.В. КИЗИМЕНКО, В.А. БОГУШ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 24 апреля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В статье описана модель поглощения электромагнитной энергии радиочастотного диапазона биологическими тканями. Рассмотрены проблемы моделирования взаимодействия излучения СВЧ-диапазона и биологических тканей, представленных в виде многослойных структур. Разработаны модели полосковых излучателей для шести поддиапазонов, перекрывающих диапазон 500–3500 МГц. Модель биологической ткани разработана на основе изображения магниторезонансной томографии, что позволяет проводить моделирование в условиях, приближенном к реальному. На основании разработанных моделей приемопередатчиков и биоткани созданы модели, позволяющие провести анализ поглощения электромагнитной энергии в ближней и дальней зоне передатчика. Из результатов моделирования в ближней зоне видно, что имеются определенные максимумы поглощения на частотах 750, 938, 1250 и 1357 МГц. Исходя из результатов моделирования в дальней зоне можно отметить, что в диапазоне 750–1000 МГц не наблюдается пик поглощения на частоте 938 МГц. Также в результате моделирования зафиксировано уменьшение величины поглощения, начиная с частоты 750 МГц. Отсутствие пика поглощения также наблюдается и в районе частоты 1357 МГц. В диапазоне 2,5–3 ГГц как в ближней, так и в дальней зонах наблюдается практически линейное уменьшение величины поглощения. При анализе влияния размеров структур на поглощение электромагнитной энергии в биологических тканях было обнаружено, что характер изменения величины поглощения является нелинейной величиной. В диапазоне 0,5–2 ГГц наблюдается как увеличение, так и уменьшение поглощения при утолщении или утончении слоев. Также необходимо отметить, что при увеличении размеров каждого слоя на 10 % наблюдается пик поглощения в районе частоты 1156 МГц. Для диапазона 2–3,5 ГГц не наблюдается значительных изменений формы графика при изменении толщины слоев.

Ключевые слова: биологические ткани, поглощение энергии, полосковая антенна.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лагуцкий И.А., Давыдов М.В., Кизименко В.В., Богуш В.А. Модель поглощения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона биологическими тканями. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 52-60.

MODEL OF MICROWAVE RADIATION ABSORPTION BY BIOLOGICAL TISSUES

ILYA A. LAGUTSKIY, MAXIM V. DAVYDOV, VYACHESLAV V. KIZIMENKO,
VADIM A. BOGUSH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Republic of Belarus)

Submitted 24 April 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. A model of absorption of electromagnetic energy of radiofrequency range by biological tissues is described in the article. The problems of modeling the interaction of microwave radiation and biological tissues represented as multilayer structures are considered. Patch-antenna models for six sub-bands overlapping the 500–3500 MHz range are developed. The model of biological tissue was developed on the basis of MRI imaging, which allows for modeling under near real-life conditions. Based on the developed models of transceivers and biotissue, models have been created that allow to analyze the absorption of electromagnetic energy in the near- and far fields of the transmitter. From the results of modelling in the near field we can see that there are certain absorption maxima at frequencies of 750, 938, 1250 and 1357 MHz. Based on the results of the far field modeling it can be noted that in the range of 750 to 1000 MHz there is no absorption peak at 938 MHz. Also, as a result of the simulation, a decrease in the magnitude of absorption starting from 750 MHz was registered. Absorption peak absence is also observed in the area of 1357 MHz frequency. In the range of 2.5–3 GHz both in the near and far fields practically linear decrease of absorption value is observed. When analyzing the influence of structures' sizes on electromagnetic energy absorption in biological tissues, it was found that the nature of change in absorption value is a nonlinear value. In the range of 0.5–2 GHz both increase and decrease of absorption at thickening or thinning of layers is observed. It should also be noted that when the size of each layer increases by 10 %, the peak of absorption in the area of 1156 MHz frequency is observed. For the 2–3.5 GHz range there are no significant changes in the chart shape when the layer thickness changes.

Keywords: biological tissues, microwave radiation absorbing, patch-antenna.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Lagutskiy I.A., Davydov M.V., Kizimenko V.V., Bogush V.A. Model of microwave radiation absorption by biological tissues. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 52-60.

Введение

Изучение взаимодействия биологической ткани с электромагнитным излучением СВЧ-диапазона является актуальной темой в современном мире [1–4]. Это связано с обширным использованием устройств сотовой связи, работающих в различных диапазонах частот, число которых постоянно растет в связи с развитием новых стандартов мобильной связи (стандарт 5G), что приводит к необходимости анализа воздействия данного излучения на человека.

Для оценки воздействия электромагнитного излучения на ткани возможно применять два подхода: натурное и численное моделирование. Сложность применения натурального моделирования в первую очередь связана с тем, что исследование влияния на человека очень сложно провести, так как явные признаки могут не проявляться в течение долгого времени, а выбор контрольной группы затруднен повсеместным использованием радиосвязи. Альтернативой является применение фантомов, однако их создание является достаточно трудоемким процессом, так как получение эквивалента ткани затруднено в связи со сложностью ее структуры.

Компьютерное (численное) моделирование не имеет вышеперечисленных недостатков, так как благодаря современным достижениям в области трехмерного моделирования можно

создавать структуры различной геометрии с необходимыми характеристиками. Это позволяет значительно упростить задачу при оценке взаимодействия тканей с электромагнитным излучением СВЧ-диапазона.

Необходимо учитывать, что излучение радиочастотного диапазона может вызывать две группы эффектов: тепловые и нетепловые. В случае проявления тепловых эффектов электромагнитная энергия преобразуется в тепловую и идет на нагрев тканей. В случае нетепловых эффектов поглощенная энергия идет на совершение химических реакций, которые могут нести непредсказуемый эффект. В данной статье речь идет об общем количестве поглощенной тканью энергии, так как разделение на энергию тепловых и нетепловых эффектов невозможно в связи с тем, что процесс моделирования не учитывает особенности поведения тканей в процессе жизнедеятельности.

Для моделирования был выбран программный комплекс Altair FEKO, который предназначен для численного электромагнитного анализа. Возможности использования различных методов электромагнитного моделирования, реализованные в FEKO, делают этот программный продукт применимым для решения разнообразных задач во многих областях, в том числе для исследовательских целей. Данный программный комплекс обладает высокой гибкостью в настройке, что позволяет подобрать оптимальные параметры для моделирования, которые обеспечивают оптимальное сочетание точности и скорости вычислений.

В данной статье описаны результаты исследований, в ходе которых проводилось моделирование поглощения электромагнитной энергии в биологической ткани, которая представляет собой многослойную структуру, размеры слоев которой выбраны на основе МРТ-изображения головного мозга человека, так как поглощение может зависеть не только от свойств ткани, но и от ее размеров. Использование подобной структуры обусловлено тем, что распространение волн в гомогенизированном домене, который зачастую используется при оценке удельного коэффициента поглощения (SAR), может отличаться от распространения в биологической тканях. Анализ производится на основании исследования системы S -параметров. Благодаря этому можно произвести оценку поглощения энергии на различных частотах, что позволит оценить общий уровень поглощения электромагнитной волны на различных частотах.

Модель антенны

Для исследования были использованы модели полосковых антенн (микрорезонаторов). Их использование обусловлено простотой конструкции и известной методикой расчета. Также данные антенны имеют диаграмму направленности, позволяющую сконцентрировать электромагнитную энергию в определенном направлении. Главным недостатком данного типа антенн (в условиях решения данной задачи) является узкая полоса пропускания.

В данной работе был исследован диапазон 500–3500 МГц, который охватывает частоты различных стандартов сотовой связи, а именно: GSM (890–915 / 935–960 МГц и 1710–1785 / 1805–1880 МГц), UMTS (1920–1980 / 2110–2170 МГц), LTE (1710–1785 / 1805–1880 МГц и 2500–2570 / 2620–2690 МГц). Использование столь широкого диапазона также обусловлено тем, что новые стандарты связи могут использовать частоты, находящиеся между выше названными (например стандарт 5G подразумевает использование большого набора частот в диапазоне от 500 МГц до 6 ГГц).

Для охвата всего диапазона было решено разбить его на шесть поддиапазонов, для каждого из которых была рассчитана своя полосковая антенна (с соответствующими размерами проводника). Таким образом, были подобраны шесть антенн, каждая из которых охватывает полосу 500 МГц.

Антенна представляет собой слой диэлектрика (толщиной 1 мм с относительной диэлектрической проницаемостью 4,8 (материал FR4)), на который нанесена металлизация. Размер подложки составляет удвоенную длину и ширину полоска (рис. 1). Металлизация на верхнем слое диэлектрика выполняет роль полоска, а нижняя сторона имеет сплошную металлизацию, которая соединяется с нулевым потенциалом.

Модель ткани

Структура, используемая для анализа, представляет собой многослойный домен с длиной и шириной, занимающими всю область расчета. Высота и типы тканей выбраны на основе МРТ-изображения (рис. 2). Таким образом, биоткань имеет структуру, представленную в табл. 1.

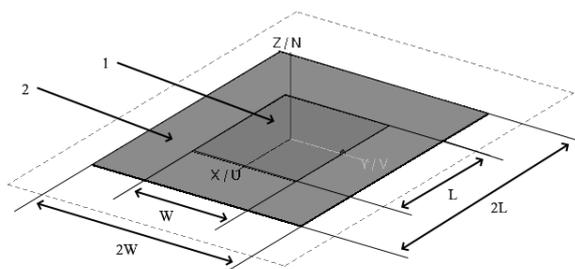


Рис. 1. Схематическое изображение полосковой антенны: 1 – полосковый проводник, 2 – подложка.
Fig. 1. Schematic view of a patch antenna: 1 – patch, 2 – substrate

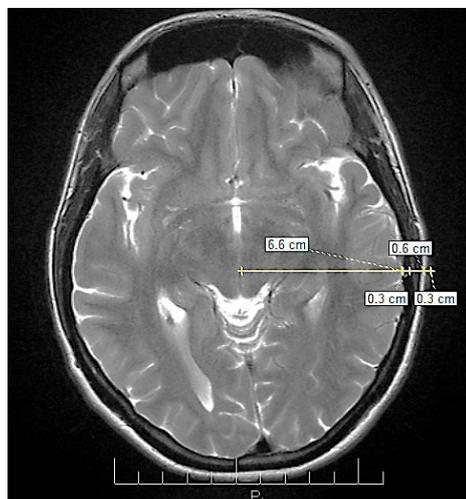


Рис. 2. Изображение поперечного среза головы человека на магнитно-резонансной томографии
Fig. 2. MRI of a cross section of the human head

Таблица 1. Структура исследуемой биоткани
Table 1. Structure of target biological tissue

Слой Layer	Тип ткани Layer material	Толщина, мм Thickness, mm
1	Кожа	3
2	Кость	6
3	Спинномозговая жидкость	3
4	Мозговая ткань	132
5	Спинномозговая жидкость	3
6	Кость	6
7	Кожа	3

Итоговая толщина модели составила 156 мм и представлена в виде набора плоскостей, длина и ширина которых являются бесконечными. Использование плоскостей в программном комплексе ФЕКО позволяет сократить время вычислений, так как плоскости не разбиваются сеткой и рассчитываются другим методом. Диэлектрическая проницаемость и проводимость материалов были взяты из встроенной библиотеки материалов, так как являются нелинейными величинами, зависящими от частоты [5, 6].

Использование подобной модели обусловлено следующими факторами:

- сложность построения точной 3D-модели человеческой головы, связанная с индивидуальными особенностями строения у каждого человека;
- высокая сложность вычислений, связанная с особенностями разбиения структур с элементами, имеющими небольшие размеры и элементы сложной геометрии.

Совокупность данных факторов приводит к необходимости использования упрощенных моделей для исследования особенностей поглощения электромагнитного излучения.

Исследуемая модель

В ходе работы производился расчет двух моделей. Каждая модель представляет собой совокупность двух антенн и биологической ткани, расположенной между ними. Антенны направлены друг на друга. Одна из антенн выполняет роль передатчика, а вторая – приемника.

В первом случае расстояние между поверхностями антенн составляет 200 мм, что соответствует ближней зоне. Таким образом, расстояние от антенны до ткани составляет 22 мм с каждой стороны (при толщине биоткани 156 мм). Данное расстояние имитирует воздушное пространство между антенной и головой.

Во втором случае расстояние между антеннами было увеличено до 1 м, что соответствует дальней зоне для всех вариантов исполнения излучателей. Модель биологических тканей находится на расстоянии 50 мм от приемника. В данном случае производилось моделирование трех видов биоткани: нормальной толщины (156 мм) и двух структур с увеличением и уменьшением размеров каждого слоя на 10 %, что позволяет оценить влияние вариативности размеров биологических объектов на результаты моделирования.

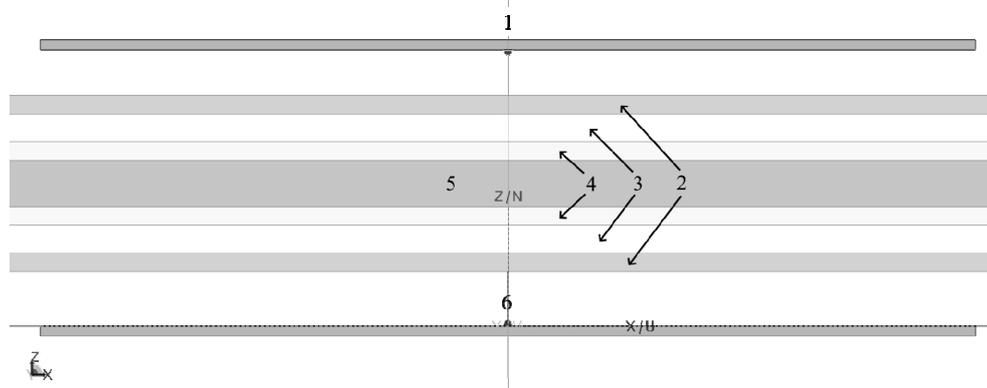


Рис. 3. Модель ткани: 1 – приемник, 2 – кожа, 3 – кость, 4 – спинномозговая жидкость, 5 – мозговая ткань, 6 – передатчик

Fig. 3. Target Tissue: 1 – receiver, 2 – skin, 3 – bone, 4 – cerebrospinal fluid, 5 – brain tissue, 6 – transmitter

В качестве характеристики системы был выбран параметр S_{21} . Он соответствует количеству электромагнитной энергии, которое прошло через исследуемую систему. Изменение данного параметра будет говорить о количестве энергии, которое было поглощено тканью. В пределах данной задачи было принято, что оценивать количество поглощенной энергии можно как разность между параметрами S_{21} без и с биологической тканью, что позволяет исключить из полученных результатов собственные резонансы системы.

Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования в ближней зоне. В ходе моделирования было получено два набора значений для моделей: «излучатель – приемник» и «излучатель – биоткань – приемник». Результаты представлены на рис. 4 в виде разности параметра S_{21} для модели без ткани и с биотканью.

В ходе сравнительного анализа было выяснено, что при прохождении электромагнитного излучения через биоткань параметр S_{21} в среднем уменьшается на 35 дБ, начиная с частоты 2 ГГц, что свидетельствует о большой величине поглощения. В диапазоне 0,5–2 ГГц наблюдается значительная нелинейность и наличие пиков поглощения. В диапазоне 2–3,5 ГГц наблюдается линейное уменьшение величины поглощения с ростом частоты.

Также было замечено, что присутствуют пики поглощения, которые видны как максимумы кривых. Данные пики наблюдаются на частотах 750, 938, 1250 и 1357 МГц. Следует отметить, что частота 938 МГц соответствует длине волны 319,6 мм, что сопоставимо с 0,5 толщины биологической ткани.

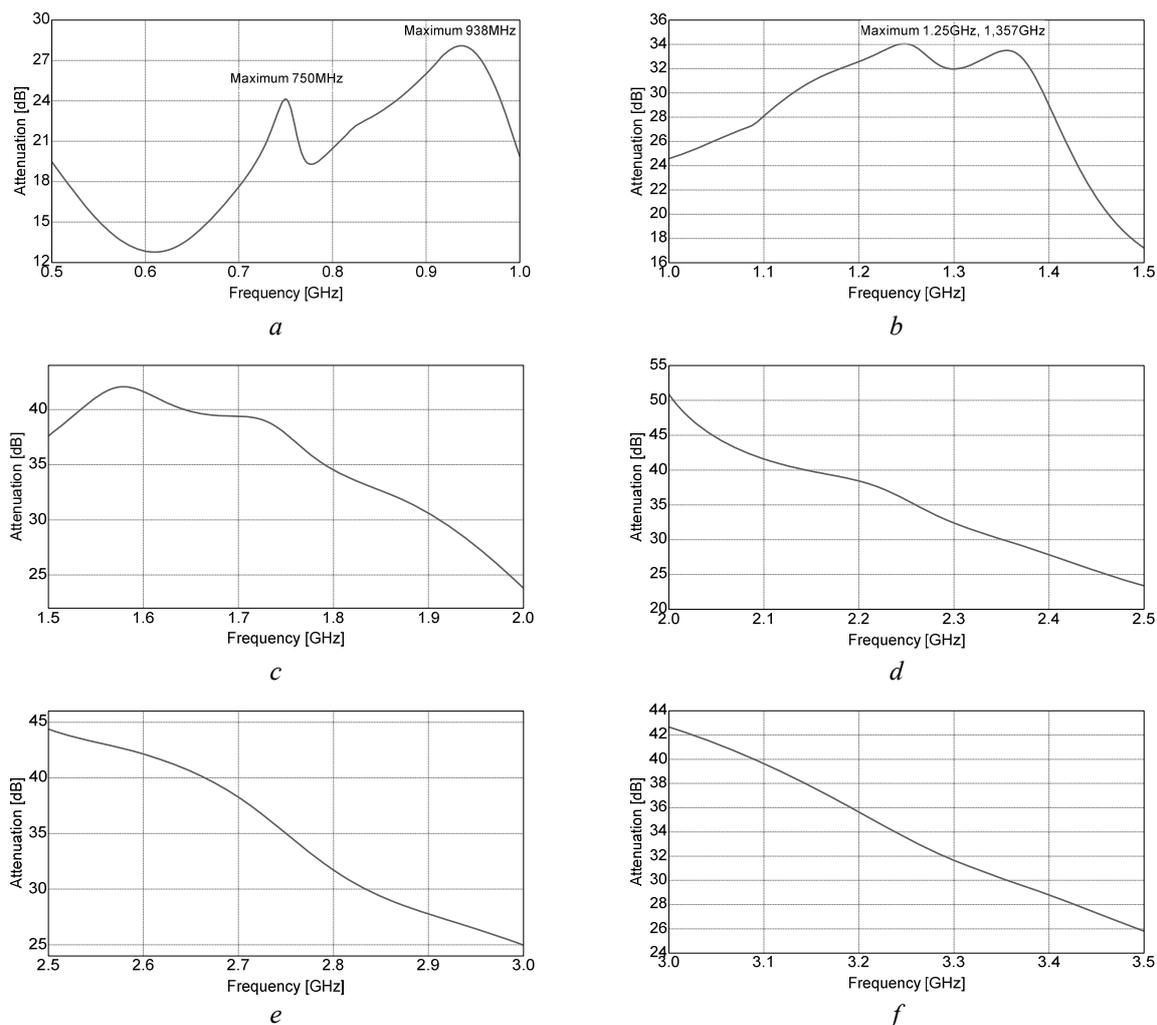


Рис. 4. Скриншоты окна программы с результатами моделирования для ближней зоны в диапазоне: *a* – 0,5–1,0 ГГц; *b* – 1,0–1,5 ГГц; *c* – 1,5–2,0 ГГц; *d* – 2,0–2,5 ГГц; *e* – 2,5–3,0 ГГц; *f* – 3,0–3,5 ГГц

Fig. 4. Screenshots of the program window with simulation results for the near field in the range: *a* – 0.5–1.0 GHz; *b* – 1.0–1.5 GHz; *c* – 1.5–2.0 GHz; *d* – 2.0–2.5 GHz; *e* – 2.5–3.0 GHz; *f* – 3.0–3.5 GHz

Результаты моделирования в дальней зоне. В ходе моделирования поглощения в дальней зоне было получено четыре набора значений: один набор для модели «излучатель – приемник» и три набора значений для модели «излучатель – биоткань – приемник», каждый из которых отличается толщиной моделируемых биологических тканей.

На рис. 5 представлены полученные данные. Кривые с индексами «s» и «x» соответствуют биоткани с уменьшенной и увеличенной на 10 % толщиной слоев соответственно.

При анализе поглощения (в случае с нормальной толщиной биоткани) было обнаружено, что средняя величина поглощения (разность между параметрами S_{21}) составляет порядка 40 дБ, что говорит об увеличении поглощения в дальней зоне. Нелинейность в диапазоне 0,5–2 ГГц можно связать с тем, что длина волны в данном диапазоне сопоставима с размерами биоткани. Также при анализе были замечены изменения в форме графиков, что говорит об изменении характера поглощения при перемещении в дальнюю зону. А именно было замечено, что в диапазоне 750–1000 МГц исчез пик поглощения на частоте 938 МГц. Также было замечено уменьшение поглощения, начиная с частоты 750 МГц. Отсутствие пика поглощения также наблюдается и в районе частоты 1357 МГц. Можно заметить, что для модели с увеличенной толщиной наблюдается дополнительный пик поглощения в районе частоты 1156 МГц (длина волны 260 мм).

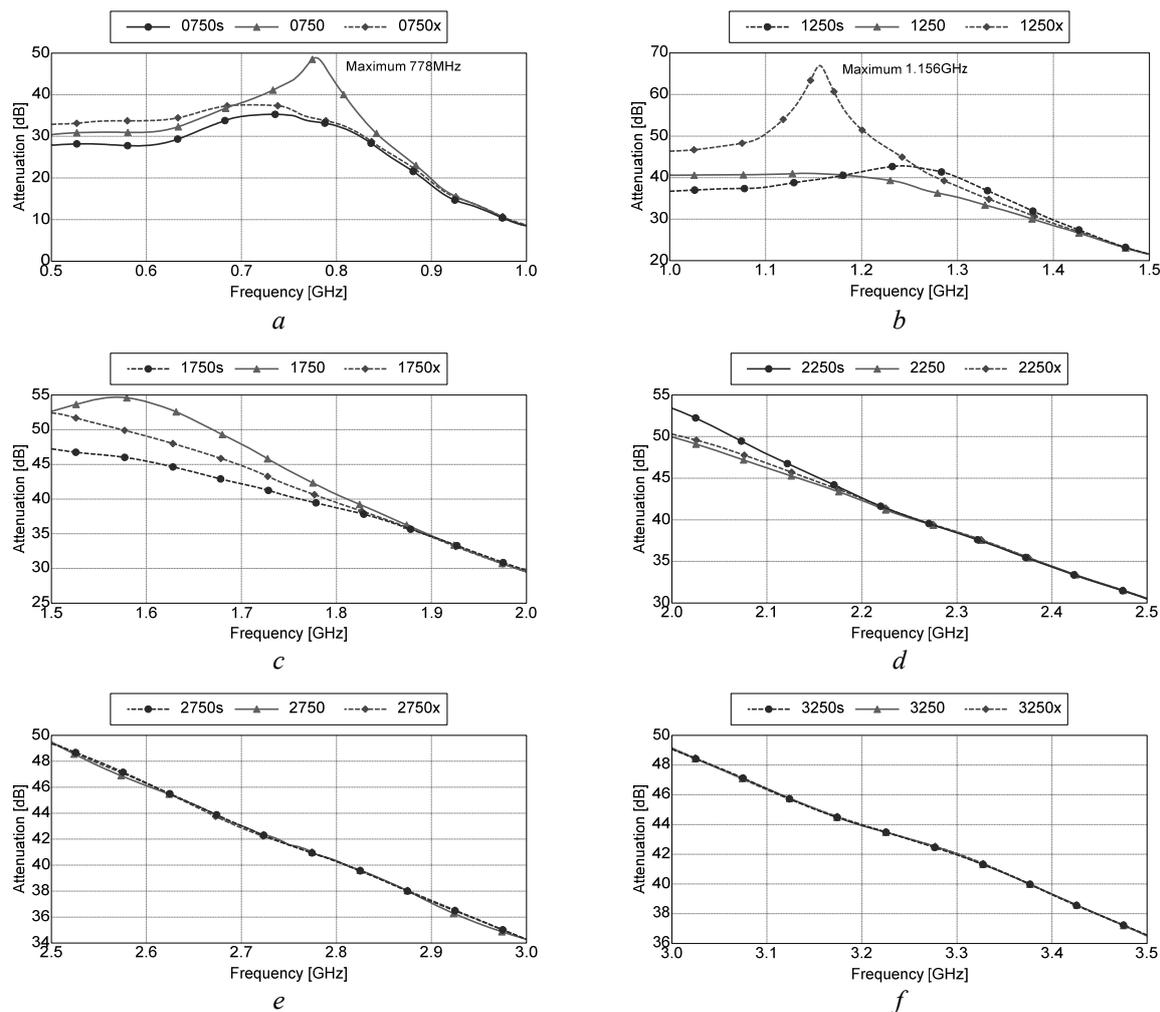


Рис. 5. Скриншоты окна программы с результатами моделирования для дальней зоны в диапазоне: *a* – 0,5–1,0 ГГц; *b* – 1,0–1,5 ГГц; *c* – 1,5–2,0 ГГц; *d* – 2,0–2,5 ГГц; *e* – 2,5–3,0 ГГц; *f* – 3,0–3,5 ГГц

Fig. 5. Screenshots of the program window with simulation results for the far field in the range: *a* – 0.5–1.0 GHz; *b* – 1.0–1.5 GHz; *c* – 1.5–2.0 GHz; *d* – 2.0–2.5 GHz; *e* – 2.5–3.0 GHz; *f* – 3.0–3.5 GHz

При изменении толщины ткани нельзя однозначно определить характер поглощения в диапазоне частот 0,5–2 ГГц, в то время как в диапазоне 2–3,5 ГГц значительных изменений формы кривых нет. Можно заметить, что при изменении толщины наблюдается как увеличение, так и уменьшение поглощения, что говорит о нелинейном характере изменения поглощения в зависимости от размеров структуры.

Таким образом, можно сделать вывод, что поглощение различными структурами мозга будет отличаться в связи с его неоднородностью, различием размеров и изменением пути прохождения волны в зависимости от направления. Это приводит к проблеме оценки количества поглощенной электромагнитной энергии, которое будет не столько зависеть от частоты передатчика (при одинаковой мощности), сколько от линейных размеров головы человека.

Заключение

Проведен анализ модели поглощения электромагнитной энергии в биологической ткани, в качестве которой был выбран мозг человека. В данной работе использовалась упрощенная модель биоткани, которая представляет собой многослойную структуру толщиной 156 мм.

Из результатов моделирования следует, что поглощение электромагнитной энергии биотканью неравномерно в пределах диапазона 500–3500 МГц, что, в первую очередь, связано с тем, что размеры структуры сопоставимы с длиной волны. На полученных кривых

параметра S_{21} можно заметить определенные максимумы. Это говорит о том, что в пределах данной области частотного спектра наблюдается увеличенное поглощение электромагнитной энергии. В частности, подобные максимумы обнаружены в районе частот 750, 938, 1250 и 1357 МГц ближней зоны. В дальней зоне кривые имеют неравномерный вид, который отличается от кривой параметра в ближней зоне. Замечено изменение в диапазоне 750–1000 МГц, а именно отсутствие пика поглощения и изменение характера кривой: значение параметра уменьшается, что свидетельствует о влиянии положения источника на количество задерживаемой в биоткани энергии.

Изменение поглощения при изменении толщины слоев биоткани дает неоднозначные результаты. Было обнаружено, что зависимость поглощения от толщины характерна до частоты 2000 МГц, после которой изменение параметра S_{21} незначительно либо отсутствует. При моделировании поведения биоткани в дальней зоне был обнаружен пик поглощения в районе частоты 1156 МГц. Данный пик наблюдается в модели с увеличенной толщиной слоев. В связи с этим необходимо проведение исследования поглощения в диапазоне 1000–1250 МГц.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что максимальное поглощение будет наблюдаться на длинах волн, кратных размерам биоткани. Таким образом, перспективой развития данной работы является создание моделей биологических тканей, характеристики которых будут максимально приближены к реальным многослойным структурам, но также максимально просты для расчетов и изменения их параметров (размеров, направлений облучения и т. п.).

Список литературы / References

1. Квашнин Г.М., Квашнина О.П., Сорокина Т.П. Модель поглощения СВЧ-энергии в биологических тканях. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*, 2009;(2):199-203. Kvashnin G.M., Kvashnina O.P., Sorokina T.P. [Model for microwave radiation absorption in biological tissues]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of KrasSAU*, 2009;1(2):199-203. (In Russ.)
2. Awada B., Madi G., Mohsen A., Harb A., Diab A., Hamawy L., Hajj-Hassan M. Simulation of the Effect of 5G Cell Phone Radiation on Human Brain. *2018 IEEE International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET)*. 2018:1-6. DOI:10.1109/imcet.2018.8603063.
3. Esmekaya M., Ozer C., & Seyhan N. 900 MHz pulse-modulated radiofrequency radiation induces oxidative stress on heart, lung, testis and liver tissue. *General Physiology and Biophysics*. 2011;30(1):84-89. DOI:10.4149/gpb_2011_01_84.
4. Dasdag S., Akdag M.Z., Erdal M.E., Erdal N., Ay O.I., Ay M.E., Yegin K. Effects of 2.4 GHz radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi equipment on microRNA expression in brain tissue. *International Journal of Radiation Biology*. 2015;91(7):555-561. DOI:10.3109/09553002.2015.1028599.
5. Gabriel S., Lau R.W., Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 1 Hz. *Phys. Med. Biol.* 1996;11(41):2251-2269. DOI:10.1088/0031-9155/41/11/002.
6. Gabriel C. *Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies*. Texas;1996. DOI: 10.21236/ada303903.

Вклад авторов

Лагуцкий И.А. разработал модели биологических тканей и модели антенн, а также провел первичный анализа результатов моделирования.

Давыдов М.В. проанализировал параметры моделируемых биологических тканей, сформировал концепцию модели.

Кизищенко В.В. выполнил анализ разработанных моделей антенн.

Богуш В.А. осуществил постановку общих задач моделирования.

Authors' contribution

Lagutskiy I.A. developed biological tissue models, antenna models, and performed an initial analysis of the simulation results.

Davydov M.V. analyzed parameters of modeled biological tissues, formed a general concept of the model.

Kizimenko V.V. performed an analysis of the developed antenna models.

Bogush V.A. set the general tasks of modeling.

Сведения об авторах

Лагуцкий И.А., магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Давыдов М.В., к.т.н., доцент, первый проректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кизименко В.В., магистр технических наук, начальник отдела антенн и устройств СВЧ НКЦ 1.6 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Богущ В.А., д.ф.-м.н., профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Lagutskiy I.A., Master Student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Davydov M.V., PhD, First Vice-Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kizimenko V.V., Master of Science, Head of the Antenna and Microwave Department, Center 1.6 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bogush V.A., D.Sci, Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-33-358-92-08;
e-mail: ilya.laguckiy@yandex.ru
Лагуцкий Илья Александрович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-33-358-92-08;
e-mail: ilya.laguckiy@yandex.ru
Lagutskiy Ilya Aleksandrovich