

Исследование диэлектрических свойств тканей человеческого организма для разработки антенны-аппликатора

А.Р. Садыков, В.А. Скачков

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева

Аннотация: работа посвящена исследованию диэлектрических свойств тканей человеческого организма для дальнейшего применения полученных результатов в задачах радиотермометрии. Рассмотрены основные ткани головы: кровь, кортикальная кость, белое вещество мозга, серое вещество мозга и кожа.

Ключевые слова: антенна-аппликатор, радиотермограф, ранняя диагностика, головной мозг

1. Введение

Одним из перспективных технических средств медицинской диагностики является радиотермография. В ее основе лежит принцип детектирования собственного радиоизлучения тканей организма человека. Изменение их (тканей) физиологических свойств вызывает как изменение абсолютной температуры исследуемого участка, так и его электрофизических свойств, что приводит непосредственно к отклонению шумовой температуры от нормы. Такой метод позволяет уже на ранних стадиях диагностировать изменения, происходящие в тканях человеческого организма.

Чувствительным элементом таких систем являются датчики (антенна-аппликатор) радиояркостной температуры, представляющие собой антенны соответствующего диапазона длин волн. Специфической особенностью такого рода антенн является то, что распространение электромагнитных волн происходит в тканях организма, электрофизические свойства которых значительно отличаются от вакуума (воздуха). Эти отличия обусловлены высокой диэлектрической проницаемостью ϵ и удельной проводимостью γ . Распространение радиоволн в подобных средах сопровождается значительным затуханием из-за высокого значения диэлектрической проницаемости тканей человека.

Первые работы по настоящей теме были выполнены еще в восьмидесятые годы [1-5]. На текущий момент появилось значительное количество медицинских исследований и технических разработок, а также созданы серийные приборы, которые заняли свое место в медико-биологической практике [6].

Несмотря на достигнутые результаты, совершенствование методов и аппаратуры медицинской радиотермометрии продолжается, что делает тему исследования актуальной и важной.

Конструкции чувствительных элементов (датчиков) отличаются и имеют как достоинства, так и недостатки. Поэтому цель настоящей работы – исследование диэлектрических свойств тканей человеческого организма для дальнейшего применения полученных результатов в задачах радиотермометрии.

2. Основная часть.

Основным показателем в медицинской диагностике считается возможность обнаружения температурной аномалии, которая связана с возможным наличием новообразования в зондируемом участке. Используется способ радиотермометрии, позволяющий неинвазивно (без хирургического вмешательства) измерять яркостную

температуру тканей человека путем измерения интенсивности их собственного электромагнитного излучения. Очевидно, что интенсивность принимаемого сигнала зависит от диапазона рабочих частот, свойств среды, в которой производится измерение, размера теплового источника, глубины его расположения и, в значительной мере, от антенны-аппликатора, используемой для приема собственного электромагнитного излучения биологической ткани.

Для того чтобы в зоне новообразования уровень концентрации электрического поля был достаточным для обнаружения аномалии, логично предположить, что для большей глубины проникновения поля необходимо, чтобы в ближней зоне удельное поглощение было минимальным.

Во многих исследованиях приведен сравнительный анализ малогабаритных антенн-аппликаторов различных типов (электрические и магнитные, а также комбинированные, включающее в себя свойства и тех и других типов антенн). Например, в работах [7-8] делается вывод о предпочтительности использования излучателей магнитного типа. Такой вывод обусловлен тем, что в ближней зоне излучения элементарного излучателя магнитного типа отсутствует радиальная компонента электрического поля и, следовательно, удельное поглощение $\gamma|E|^2$ при равной излучаемой мощности должно быть меньшим по сравнению с источником электрического типа. Аналогичный вывод делается в [9], где оценивается возможность применения метода фокусировки в зоне ближнего излученного поля для построения антенн-аппликаторов средств медицинской контактной радиометрии.

3. Параметры биологических тканей человека.

В отличие от обычно используемых в классических электромагнитных системах однородных сред, человеческий организм состоит из огромного числа тканей, которые имеют специфические и уникальные свойства. За последнее время данные свойства были широко изучены в диапазоне частот от 10 Гц до 10 ГГц.

Перед тем как приступить к исследованию свойств антенн в задачах медицинской диагностики, необходимо изучить поведение и диэлектрические параметры тканей человеческого организма в зависимости от частоты воздействия.

В [10, 11] с помощью параметрических моделей авторы провели исследование диэлектрической проницаемости и проводимости от частоты для 45 различных тканей человеческого организма. В рамках настоящего исследования диэлектрических свойств были выбраны следующие 5 типов биологических тканей: кровь, кортикальная кость, белое вещество мозга, серое вещество мозга и кожа.

Любая реальная среда отличная от вакуума характеризуется коэффициентом затухания α (определяющим потери в среде) и коэффициентом фазы β (определяющим скорость изменения фазы электромагнитной волны в среде с потерями). Коэффициенты α и β определяются соотношениями:

$$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \cdot \frac{\mu_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2 \cdot (\varepsilon_0 \cdot \varepsilon')^2}} - 1 \right]} \quad (1)$$

$$\beta = \omega \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \cdot \frac{\mu_0}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2 \cdot (\varepsilon_0 \cdot \varepsilon')^2}} + 1 \right]} \quad (2)$$

В таблицах 1 – 5 приведены значения диэлектрической проницаемости и проводимости различных тканей, представленных в графическом виде в [35, 36], в частотном диапазоне от 100 МГц до 2 ГГц.

Таблица 1. Кровь

f, ГГц	0,1	0,4	0,7	1	1,9	2
ϵ'	80	70	64	60	56	50
γ	1	1,1	1,3	1,5	1,65	1,9

Таблица 2. Кортикальная кость

f, ГГц	0,1	0,4	0,7	1	1,9	2
ϵ'	13	11	10,8	10,5	9	8
γ	0,09	0,15	0,17	0,2	0,23	0,3

Таблица 3. Серое вещество мозга

f, ГГц	0,1	0,2	0,7	0,9	1	2
ϵ'	60	56	53	47	45	43
γ	0,3	0,45	0,66	0,9	1,5	1,7

Таблица 4. Белое вещество мозга

f, ГГц	0,1	0,2	0,7	0,9	1	2
ϵ'	85	60	52	50	48	44
γ	0,4	0,5	0,75	1	1,4	2

Таблица 5. Кожный покров

f, ГГц	0,1	0,2	0,7	0,9	1	2
ϵ'	50	48	36	34	30	28
γ	0,35	0,5	0,55	0,7	0,8	1,2

С помощью программы Mathcad были исследованы зависимости рассмотренных параметров от частоты. Для упрощения дальнейшего анализа данных были получены регрессивные функции табличных значений с помощью полинома второй степени, например, для крови, рисунок 1. Регрессивные функции позволят математически определить вероятное поведение параметров.

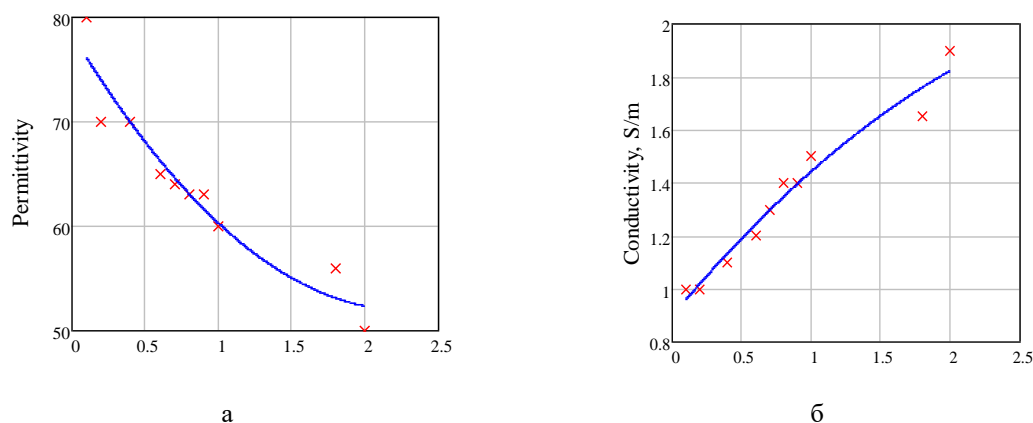


Рисунок 1. Зависимость диэлектрической проницаемости (а) и проводимости (б) от частоты для крови. Табличные значения (красный) и их регрессивные функции (синий).

На основе полученных данных с помощью выражений 1 и 2 были рассчитаны коэффициенты затухания и фазы для всех упомянутых выше биологических тканей. В таблицах 6 – 10 представлены зависимости коэффициентов фазы β и затухания α от частоты.

Таблица 6. Кровь

f, ГГц	0,1	0,5	0,7	1	1,5	2
α, 1/м	15,96	24,045	26,089	28,74	32,376	34,948
β, рад/м	24,263	89,683	120,735	165,146	235,369	305,22

Таблица 7. Кортикальная кость

f, ГГц	0,1	0,5	0,7	1	1,5	2
α, 1/м	9,987	18,948	21,541	24,77	29,153	35,52
β, рад/м	12,449	40,131	52,947	71,235	99,556	126,021

Таблица 8. Серое вещество мозга

f, ГГц	0,1	0,5	0,7	1	1,5	2
α, 1/м	11,647	18,761	21,319	25,012	30,887	36,224
β, рад/м	19,871	78,93	107,161	147,914	213,463	279,743

Таблица 9. Белое вещество мозга

f, ГГц	0,1	0,5	0,7	1	1,5	2
α, 1/м	12,955	13,954	14,632	17,966	27,391	36,601
β, рад/м	22,33	81,993	108,289	144,824	207,496	289,13

Таблица 10. Кожный покров

f, ГГц	0,1	0,5	0,7	1	1,5	2
α, 1/м	12,89	20,154	22,515	25,983	31,32	35,098
β, рад/м	19,641	70,022	92,45	123,392	172,674	228,834

4. Заключение

На основе приведенных таблиц можно сделать вывод, что с ростом частоты резко возрастает затухание электромагнитной волны. Таким образом, для дальнейших исследований поведения антенн в реальных средах была выбрана частота 700 МГц, так как на данной частоте ткани человеческого организма являются наиболее радиопрозрачными. Также видно, что диэлектрическая проницаемость и проводимость среды является функцией частоты (зависит от частоты). Таким образом, при исследовании электромагнитного излучения в реальных средах нужно учесть, что диэлектрические параметры среды меняются с изменением частоты и использовать конечное значение некорректно.

Список литературы

1. Barrett A.H., Myers P.C. Subcutaneous temperature: a method of noninvasive sensing // Science. 1975. V. 90. P. 669-671.
2. Троицкий В.С. К теории контактных радиометрических измерений внутренней температуры тел // Известия высших учебных заведений. Радиофизика – 1981. – Т. 24, № 9. – С. 1054-1061
3. Троицкий В. С., Белов И. Ф., Горбачев В. П. и др. О возможности использования собственного теплового СВЧ радиоизлучения тела человека для измерения температуры его внутренних органов. // УФН. – 1981. – Т.134,
4. Гуляев Ю.В., Годик Э.Э. Физические поля биологических объектов // Вестник АН СССР. Серия физическая. – 1983. – № 8. – С. 118-125.

5. С.Г.Веснин Микроволновая радиотермометрия – национальное достояние России. Электр. ресурс <http://www.medbusiness.ru/178.php>
6. Вайсблат А.В. Медицинский радиотермометр РТМ-01-РЭС // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2001. – № 8. – С. 3-9
7. Седанкин М. К. Антенны-апликаторы для радиотермометрического исследования тепловых полей внутренних тканей биологического объекта. Дисерт. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук М. МГТУ им. Э. Баумана, 2013 -247с.
8. Седельников Ю.Е., Никишина Д.В., Халикова К.Н. Антенна-апликатор для неинвазивного измерения температуры внутренних тканей биологического объекта. Пат. РФ № 2562025 Оpubл. 10.09.2015; Бюл. №25
9. Ю.Е.Седельников, В.С. Кубланов, О.В. Потапова Сфокусированные антенны -апликаторы в задачах диагностической радиотермометрии. Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2018. №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/4/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2018.7.4
10. Gabriel C., Gabriel S. and Corthout E. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey / UK, Phys. Med. Biol., 41, 1996.
11. Gabriel S. Law R.W. and Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz / UK, Phys. Med. Biol., 41, 1996.