

**Вендик И.Б.¹, Плескачев В.В.², Тамилова С.¹,
Яковлев В.А.¹**

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»
²ООО «СИМИКОН»

Микроволновая диагностика остеопороза

Остеопороз характеризуется разрушением структуры трабекулярной кости, изменением ее плотности и диэлектрической проницаемости, что влияет на характер распространения электромагнитных (ЭМ) волн в этой среде. Целью данной работы является исследование зависимости характеристик распространения волн от степени поражения остеопорозом. Объектом исследования является запястье руки человека. В работе представлена электромагнитная модель запястья и результат моделирования прохождения ЭМ волны через запястье для различной степени поражения остеопорозом. Представлена модель резонатора типа Фабри-Перо, выполненного на запястье.

Ключевые слова: остеопороз, микроволновая диагностика, резонатор Фабри-Перо.

Введение

Предметом исследования является изучение параметров губчатой ткани кости запястья при прохождении электромагнитных волн СВЧ диапазона через запястье руки человека для обнаружения признаков остеопороза и диагностики степени поражения. Остеопороз – это заболевание, имеющее системный прогрессирующий характер, основным симптомом которого является снижение плотности и нарушение структуры костной ткани [1].

В случае поражения костной ткани остеопорозом из губчатой ткани вымывается кальций, а образующиеся поры и трещины постепенно заполняются жидкостными компонентами. При полном поражении кости остеопорозом, губчатая кость заполняется смесью желтого костного мозга и жира, что приводит к значительному уменьшению диэлектрической проницаемости костной ткани. Вследствие этого, развитие остеопороза приводит к изменению физических характеристик кости, в частности, ее комплексной диэлектрической проницаемости [1]. Запястье представляет собой сложную структуру, состоящую из различных тканей (рисунок 1) с разными электродинамическими параметрами, зависящими от частоты. В таблице 1 приведены значения диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности разных тканей, образующих запястье, для двух значений частоты [2], [3].

В качестве объекта исследования выбрано запястье руки человека (рисунок 1), состоящее из различных тканей: кожа, мышечная ткань, жир, кортикальная кость, губчатая (трабекулярная) кость и другие [4]. Человеческое запястье является сложной структурой, образованной двумя костями: ulna (лучевая кость) и radius (локтевая кость). Важным с практической точки зрения является тот факт, что диэлектрическая проницаемость для

нормальной кости и пораженной остеопорозом существенно различаются. Это позволяет обосновать диагностику остеопороза и разработать процедуру измерений.

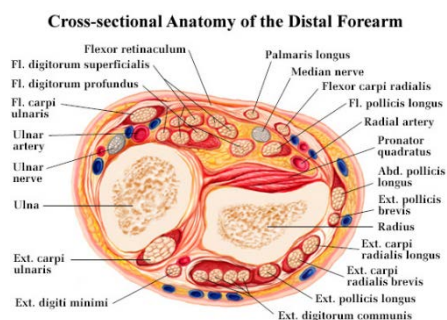


Рис.1. Поперечное сечение запястья.

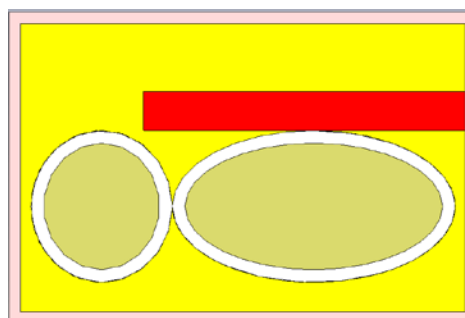


Рис. 2. Упрощенная модель запястья

Таблица 1. Параметры тканей руки человека

Слой	Частоты			
	900 МГц		2.45 ГГц	
	ϵ	$\sigma, \frac{\text{См}}{\text{м}}$	ϵ	$\sigma, \frac{\text{См}}{\text{м}}$
Кожа	40	0,5	50	2
Жир	5,46	0,05	5,28	0,105
Мышечная ткань	60	1,5	60	2
Кортикальный слой кости	15	0,19	13	0,45
Губчатая (трабекулярная) кость (нормальная)	27	0,4	27	0,4
Губчатая кость (пораженная остеопорозом)	7	0,4	7	0,4

Модель запястья

Кости запястья Ulna и Radius различаются по форме: Ulna имеет круглое поперечное сечение, а Radius - сплюснутое поперечное сечение (рис. 1). Заменим структуру запястья упрощенной многослойной моделью (рис.2), параметры слоев которой соответствуют данным, взятым из таблицы 1. Она образована кожей (розовый), жировым слоем (желтый), двумя губчатыми костями – Ulna и Radius (зеленый), окруженными кортикальной костью (белый). Над локтевой костью (Radius) расположен тонкий слой мышечной ткани (Pronator Quadratus), показанный красным цветом.

Резонатор Фабри-Перро

Для исследования изменения свойств кости при прохождении ЭМ волны сквозь запястье, нами был выбран резонатор Фабри – Перо (рис. 3), представляющий собой резонатор, состоящий из двух металлических пластин, лежащих на верхней и нижней поверхностях запястья.

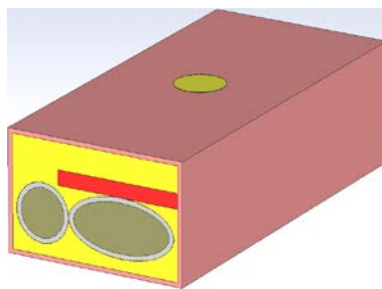


Рис.3. Модель запястья с резонатором Фабри – Перо

Особенностью данного резонатора является структура ЭМ поля, которая позволяет в условиях резонанса локализовать подводимую мощность между пластинами и, соответственно, внутри запястья, а также возможность реализовать систему возбуждения резонатора с использованием гибких подложек [5].

Результаты моделирования

В качестве объекта моделирования рассматривался резонатор, состоящий из двух медных пластин диаметром 10 мм и толщиной 0,1 мм, расположенных по обеим сторонам запястья. Геометрические размеры модели запястья: 32мм x 42мм. В результате моделирования получена зависимость реактивной части входного импеданса резонатора от частоты, на которой наблюдались характерные резонансные точки (рис.4), соответствующие различным модам резонатора (последовательному и параллельному резонансам) при распространении ЭМ волны внутри резонатора, выполненного на запястье.

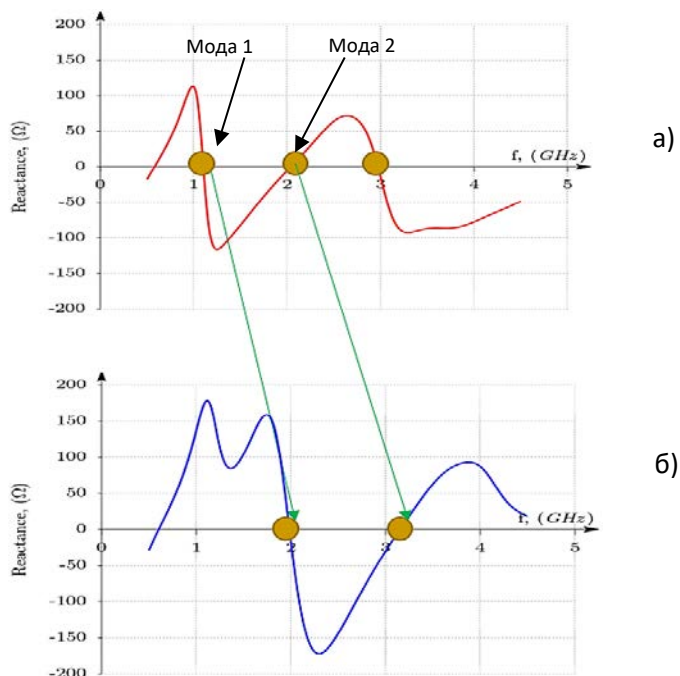


Рис.4. Зависимость мнимой части входного импеданса от частоты для нормальной кости (а) и пораженной остеопорозом б)

Нули мнимой части входного импеданса соответствуют резонансным частотам. На графиках рис. 4 приведены результаты моделирования мнимой части входного

импеданса для двух крайних случаев: нормальная кость с $\epsilon = 27$ (красная линия) и кость с критическим поражением остеопорозом с $\epsilon = 7$ (синяя линия). С изменением диэлектрической проницаемости кости изменяются частоты резонансов, характер их изменения отражен в таблице 2. Частота f_1 соответствует первой моде (параллельный резонанс), частота f_2 соответствует второй моде (последовательный резонанс). В случае поражения остеопорозом наблюдается смещение резонансных частот вверх по отношению к их значениям для здоровой кости.

Таблица 2. Резонансные частоты резонатора Фабри-Перо (рис.3) для различных значений диэлектрической проницаемости трабекулярной кости

ϵ	27	22	17	12	7
$f_1, \text{ГГц}$	1,1	1,15	1,22	1,35	1,84
$f_2, \text{ГГц}$	2,04	2,13	2,27	2,48	2,84

Частотные сдвиги могут быть легко обнаружены аппаратными средствами. Более того, они могут служить параметром, по которому можно проводить микроволновую диагностику остеопороза.

Выполнено моделирование распространения электромагнитных волн через запястье на резонансных частотах первой и второй моды. Результаты моделирования ЭМ поля приведены на рисунке 5. Красный цвет соответствует наибольшей величине напряженности электрического поля.

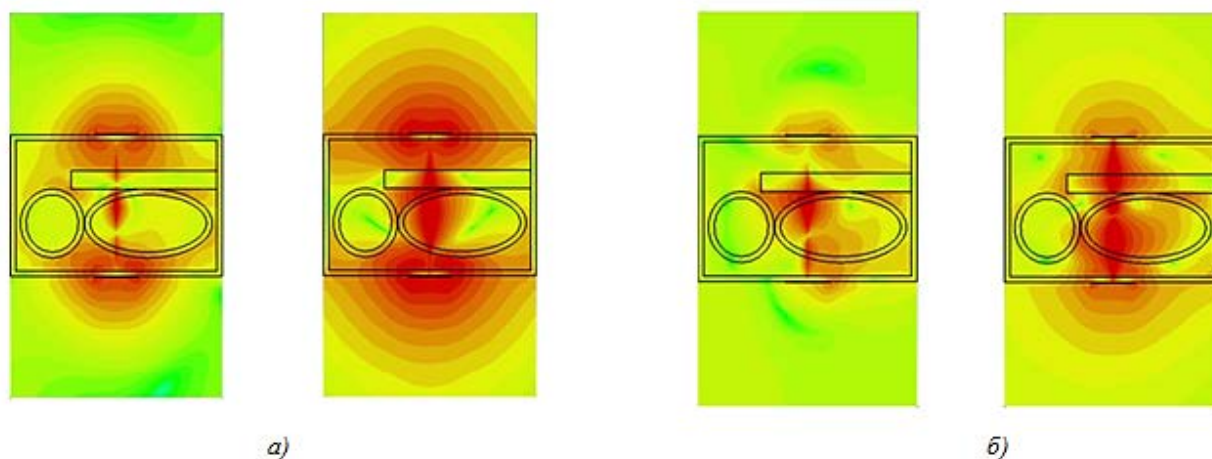


Рис.5. Распределение электрического поля для двух последовательных моментов времени: а) для первой резонансной моды (частота 1,1 ГГц); б) второй резонансной моды (частота 2,04 ГГц)

На рисунках видно, что на частоте 1,1 ГГц присутствует один максимум ЭМ поля (один полупериод), а на частоте 2,04 ГГц два максимума (два полупериода), что соответствует первой и второй резонансным модам соответственно. По полученным данным была предложена классификация степени поражения остеопорозом, соответствующая измеренным резонансным частотам (таблица 3):

Таблица 3. Классификация степени поражения остеопорозом

Состояние кости	Интервал значений ϵ	Интервал резонансных частот f_1 (первая мода), ГГц	Интервал резонансных частот f_2 (вторая мода), ГГц
Здоровая	27 - 22	1,10 – 1,14	2,04 – 2,12
Частичное поражение	22 - 17	1,15 – 1,20	2,13 – 2,26
Сильное поражение	17 - 12	1,22 – 1,32	2,27 – 2,46
Критическое поражение	12 - 7	1,35 – 1,84	2,48 – 2,84

Влияние размеров запястья на резонансные частоты

В ходе исследования было обнаружено, что с увеличением толщины жирового слоя в запястье резонансные частоты сдвигаются в область низких частот. Это иллюстрирует рисунок 6, на котором отображено изменение резонансных частот при изменении толщины жирового слоя и, соответственно, толщины запястья.

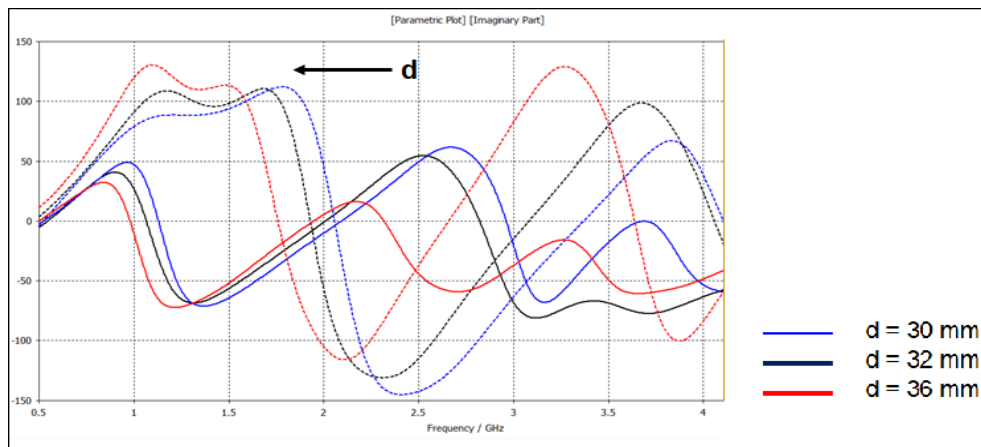


Рис.6. Влияние толщины запястья на резонансные частоты. Сплошные линии для $\epsilon=27$ (здоровая кость), пунктир для $\epsilon=7$ (критическое поражение кости)

Обобщенный параметр оценки степени поражения остеопорозом.

Степень поражения кости остеопорозом может быть оценена путем измерения резонансных частот $f_{i,j}$ (для двух мод, $i = 1, 2$) резонатора Фабри-Перо, сформированного на запястье, с учетом влияния размеров запястья на резонансные частоты с использованием обобщенного параметра A_i (6):

$$A_i = f_{i,j} \cdot d_j^\alpha, \tag{6}$$

где i – номер моды ($i = 1, 2$), j – порядковый номер исследуемого запястья ($j = 1, 2, 3, \dots$), $f_{i,j}$ – резонансная частота (ГГц) i – ой моды для j -го запястья, d_j – толщина запястья (см), α – безразмерный подгоночный параметр.

Параметр α находится из условия равенства значений A_i для выбранной моды для всех измеренных значений толщины запястья d_j . Этому условию соответствуют равенства (7) и (8) для 1-ой и 2-й мод соответственно:

$$f_{1,j} \cdot d_j^\alpha = f_{1,j+1} \cdot d_{j+1}^\alpha, \tag{7}$$

$$f_{2,j} \cdot d_j^\alpha = f_{2,j+1} \cdot d_{j+1}^\alpha, \quad j = 1, 2, 3, \dots \tag{8}$$

Из этих равенств следует формула для расчета параметра α :

$$\alpha = \frac{\lg(f_{i,j}/f_{i,j+1})}{\lg(d_{j+1}/d_j)}. \quad (9)$$

Для всех значений i и j рассчитываем α и находим среднее арифметическое значение α . Для двух резонансных мод и трех значений толщины запястья d_j , приведенных в табл. 3 и 4, $\alpha = 0,65$. В таблицах также приведены значения параметра A_i . Параметр A_i позволяет учитывать влияние разброса геометрии запястья для разных объектов наблюдения и оценивать изменение диэлектрической проницаемости по измерению резонансных частот и толщины запястья. На рис. 7 представлены значения обобщенного критерия $A(d)$ в зависимости от толщины запястья для двух значений диэлектрической проницаемости. Значение критерия существенно зависит от диэлектрической проницаемости и слабо зависит от толщины запястья.

Таблица 3. Значения обобщенного параметра A для 1-ой моды

d (см)	$\varepsilon=27$		$\varepsilon=7$	
	f_R (ГГц)	A_1	f_R (ГГц)	A_1
3,0	1.16	10.582	1.91	17.425
3,2	1.1	10.465	1.84	17.505
3,6	1.03	10.579	1.65	16.947

Таблица 4. Значения обобщенного параметра A для 2-ой моды

d (см)	$\varepsilon=27$		$\varepsilon=7$	
	f_R (ГГц)	A_2	f_R (ГГц)	A_2
3,0	2.17	19.797	3.16	28.828
3,2	2.04	19.408	2.84	27.019
3,6	2.00	20.541	2.55	26.19

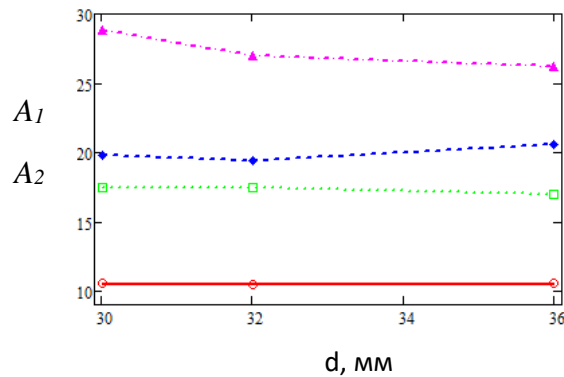


Рис.7. Зависимость обобщенного критерия A_i от толщины запястья для двух значений диэлектрической проницаемости; 1-я мода (A_1): $\varepsilon=27$ (красная линия), $\varepsilon=7$ (зеленая линия); 2-я мода (A_2): $\varepsilon=27$ (синяя линия), $\varepsilon=7$ (малиновая линия).

Моделирование процесса распространения ЭМ волн через многослойную структуру запястья с использованием резонатора Фабри-Перо в качестве основного устройства для исследования свойств кости показывает его эффективность в исследовании диэлектрической проницаемости кости, определяющей степень поражения остеопорозом. Численным методом исследована зависимость параметров распространения ЭМ волны от физических характеристик кости, в частности, ее комплексной диэлектрической проницаемости и геометрических размеров запястья. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что по измерению резонансных частот можно проводить микроволновую диагностику остеопороза.

Библиографический список

1. Meaney P.M. 3D Microwave bone imaging. Conf. Proc. 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP) 2011. doi: 10.1109/EuCAP.2012.6206024.
2. C. Gabriel, S. Gabriel, and E. Corthout, The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey, *Physics in Medicine and Biology*, vol. 41, no. 11, pp. 2231–2249, 1996.
3. S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel, The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10Hz to 20GHz, *Physics in Medicine and Biology*, vol. 41, no. 11, pp. 2251–2269, 1996.
4. T. Rolain. [Online]. Available: <http://www.coroflot.com/tomrolain/medical-illustration>
5. Вендик И.Б. Гибкие антенны и импедансные поверхности для беспроводных систем на поверхности человеческого тела, Сб. трудов конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 1-4 июня 2015, с. 165-170.
6. Вендик И.Б., Кириллов В.В., Тамилова С. Ю, Яковлев В.А. Микроволновая диагностика остеопороза, Сб. трудов конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 30 мая-2 июня 2017, с. 612-616.