

## **Моделирование распространения электромагнитных волн вдоль криволинейной поверхности биологического объекта**

*Обсуждаются результаты моделирования распространения электромагнитных (ЭМ) волн вдоль криволинейной поверхности биологического объекта в виде цилиндра. Анализируются характеристики волны на криволинейной боковой поверхности и на плоской поверхности в области тени (ползущая волна, ПВ). Проведена оценка фазовой скорости и дисперсии волны над криволинейной и плоской поверхностями. Над криволинейной поверхностью имеет место замедление ползущей ЭМ волны. С повышением частоты фазовая скорость ПВ стремится к скорости ЭМ волны в свободном пространстве. Эффект замедления ПВ волны объясняется наличием затухания, сопровождающимся появлением комплексной постоянной распространения.*

**Ключевые слова:** электромагнитные волны, криволинейная поверхность, вытекающие волны, поверхностные волны, ползущие волны, фазовая скорость

### **Введение**

Для мониторинга состояния биологического объекта эффективно может использоваться персональная беспроводная система связи, расположенная на поверхности человеческого тела (Wireless body-area network – WBAN), включающая датчики, передающие и приемные антенны, устройства сбора данных и др. В условиях существования многолучевого распространения электромагнитных (ЭМ) волн на теле объекта могут возникать и взаимодействовать друг с другом распространяющиеся и отражённые волны, а также волны, отраженные от близлежащих объектов за пределами человеческого тела. Наличие интерфейса на границе раздела «воздух - поверхность тела» приводит к появлению волн, распространяющихся вдоль поверхности. При этом возникают следующие типы волн [1]: вытекающие, поверхностные и ползущие. На криволинейной поверхности появляются ползущие волны, которые описывают возникновение высокочастотного поля на теневой стороне гладкого выпуклого объекта. Распространению электромагнитных волн по поверхности объекта, характеризующегося комплексной диэлектрической проницаемостью, в том числе, человеческого тела, посвящено большое количество публикаций, включая фундаментальные [2-4] и статьи в журналах и трудах конференций [1, 5-7]. Тем не менее, остаются неисследованными некоторые детали распространения ЭМ волн от источника, установленного на поверхности или в непосредственной близости человеческого тела, вокруг поверхности и непосредственно через объект.

Целью данной работы является моделирование распространения ЭМ волн, излученных антенной, расположенной вблизи человеческого торса, вокруг него, вдоль него и через него. В качестве объекта исследуется диэлектрический цилиндр высотой 500 мм с эллиптическим сечением 500 мм x 300 мм с параметрами  $\epsilon_f = 43$  и  $\sigma = 1,5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , соответствующими параметрам кожи человека на частоте 2,45 ГГц [8]. На рис. 1 представлено распределение интенсивности электрического поля в составе распространяющейся ЭМ волны в горизонтальной плоскости (а) и вертикальной плоскости сечения (б). Моделирование

выполнено с использованием пакета CST Microwave Studio. Из картины распределения ЭМ волны следует:

- основная часть энергии переносится вокруг цилиндра;
- в области расположения приемной антенны имеет место интенсивная интерференция;
- внутри объекта ЭМ поле быстро затухает;
- распространение ЭМ волны вдоль поверхности сопровождается излучением в свободное пространство и интерференцией двух встречных волн, бегущих по поверхности;
- распространение ЭМ волны внутри объекта сопровождается сильным затуханием и интерференцией прошедших, отраженных волн и проникающих через границу поверхностных волн.

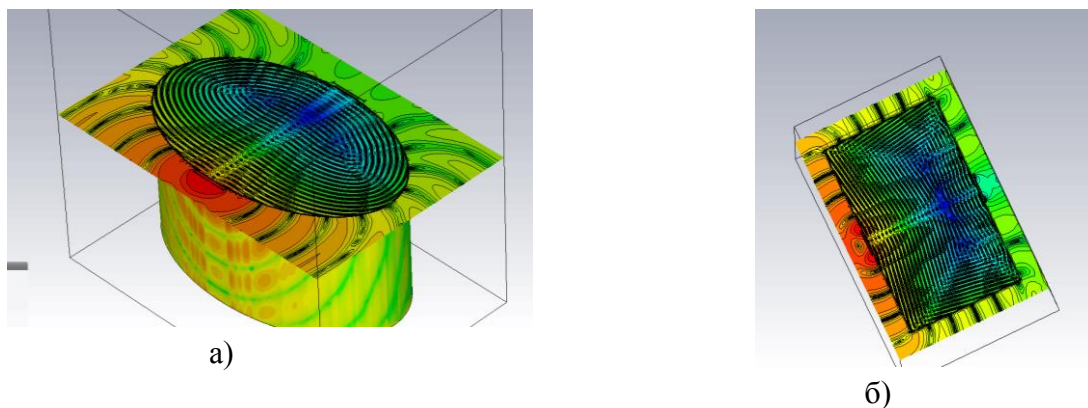


Рисунок 1.

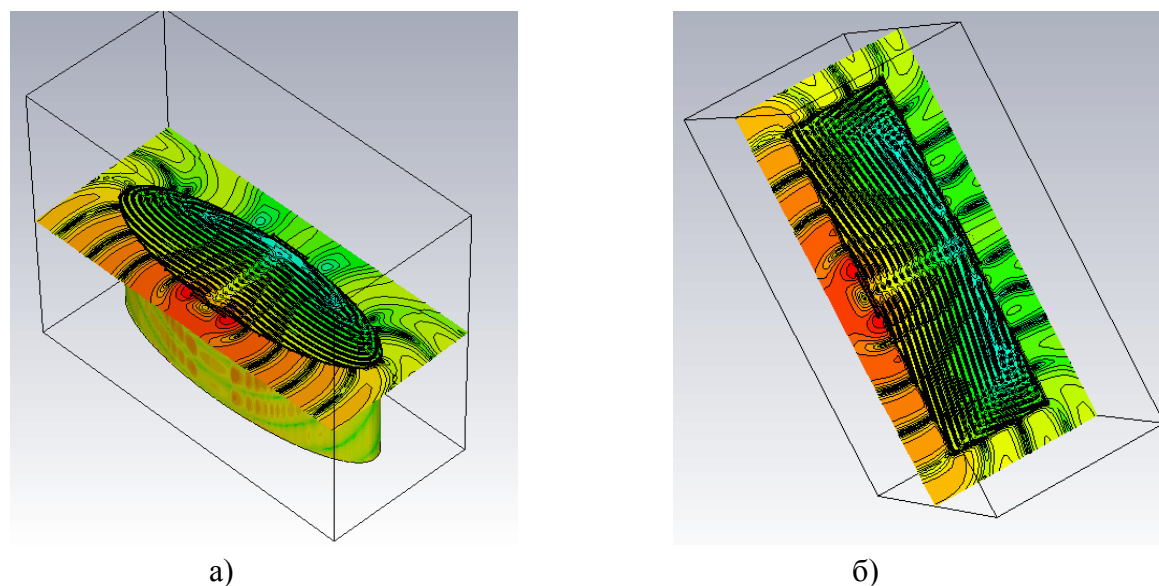


Рисунок 2.

На рис. 2 приведено распределение электрической компоненты ЭМ волны для сильно вытянутого цилиндра. В этом случае существенным оказывается вклад волны, прошедшей через короткое сечение объекта. Увеличение потерь в среде приводит к практически полному отсутствию передачи энергии непосредственно через объект (рис. 3)

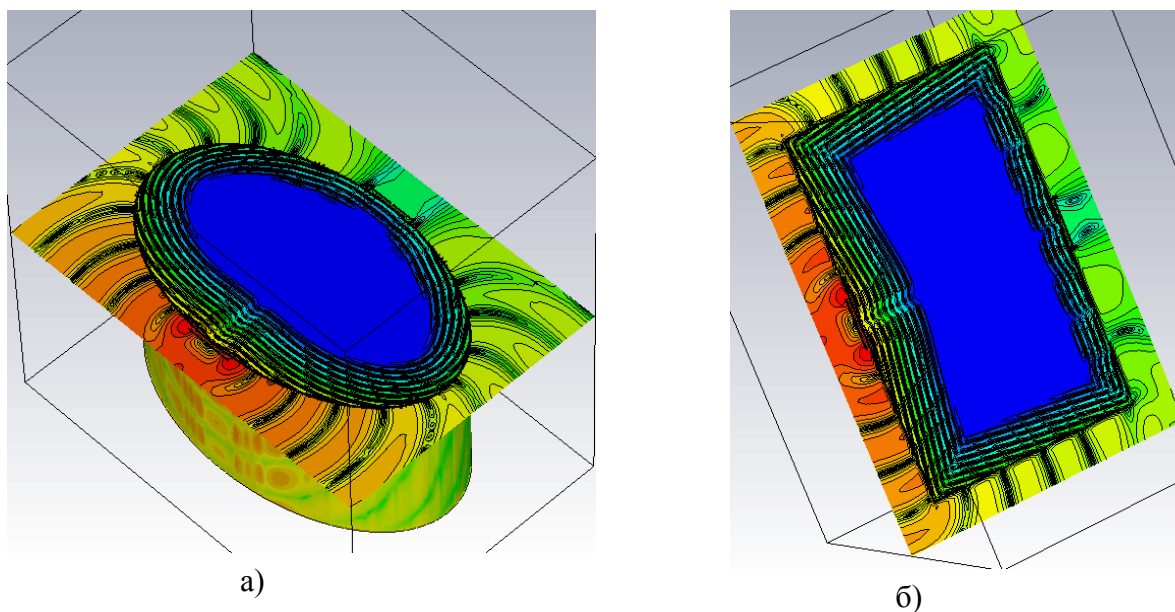


Рисунок 3.

Далее исследовались характеристики ЭМ волны вдоль криволинейной поверхности и вдоль плоской поверхности исследуемого объекта. В качестве объекта анализируется фантом человеческого тела в виде двух областей. Первая (область грудной клетки и спины) моделируется прямоугольным параллелепипедом шириной 500 мм, высотой 500 мм и толщиной 300 мм, область боковой поверхности человеческого тела представляет собой полуцилиндр, диаметр которого равен толщине грудной клетки, как показано на рис. 4. Фантом выполнен из идеального проводника.

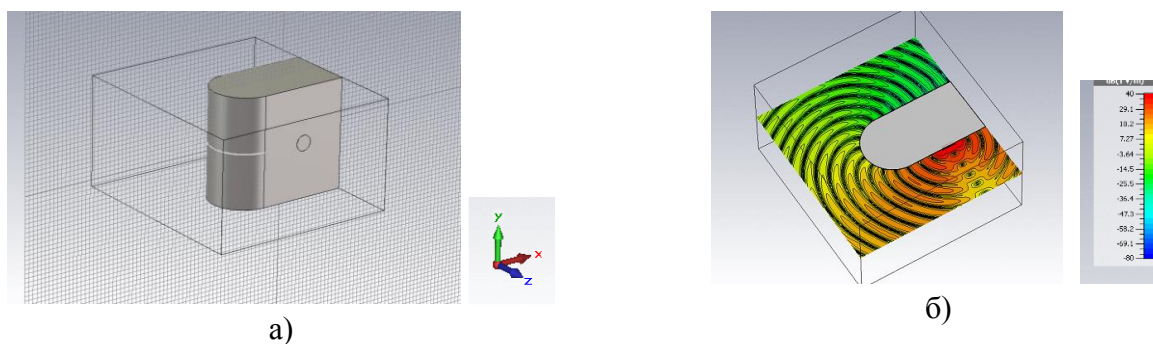


Рисунок 4.

Граничные условия для расчёта полей выбраны таким образом, чтобы препятствовать распространению электромагнитных волн через верхнюю и нижнюю области фантома, а также одну из боковых его поверхностей в область тени. Такие ограничения на пути распространения электромагнитных волн от антенны необходимы для того, чтобы избежать интерференции волн на задней поверхности фантома, смазывающей картину распространения волны только через одну из боковых поверхностей, представляющих интерес. В качестве граничных условий использованы “открытые границы“ (open boundaries) в виде плоскостей, непосредственно прилегающих к соответствующим плоскостям фантома. Со стороны боковой поверхности, а также передней и задней поверхностей фантома те же открытые границы отстоят на 300 мм от фантома, что даёт возможность рассчитать в этих областях

поля, и, соответственно, наблюдать распространение электромагнитной волны от антенны, размещённой на груди, в область тени на задней поверхности через боковую поверхность.

Решение электродинамической задачи выполняется на фиксированной частоте с применением пакета CST Microwave Studio. Представляет интерес оценка фазовой скорости волны, распространяющейся вдоль боковой и задней плоской поверхностей фантома. Для этого выполняется анализ распределения напряжённости электрического поля вдоль криволинейных (в общем случае) траекторий, находящихся внутри области расчёта. Одна из выбранных кривых представляет собой полуокружность на боковой поверхности фантома, начинающуюся на передней поверхности фантома и заканчивающуюся на задней, другая представляет собой прямую, начинающуюся в месте соединения первой кривой с задней поверхностью и проходящую вдоль всей задней поверхности. Обе кривые находятся в плоскости, параллельной плоскости  $xz$  (см. рис. 4а) и проходящей через середину высоты фантома.

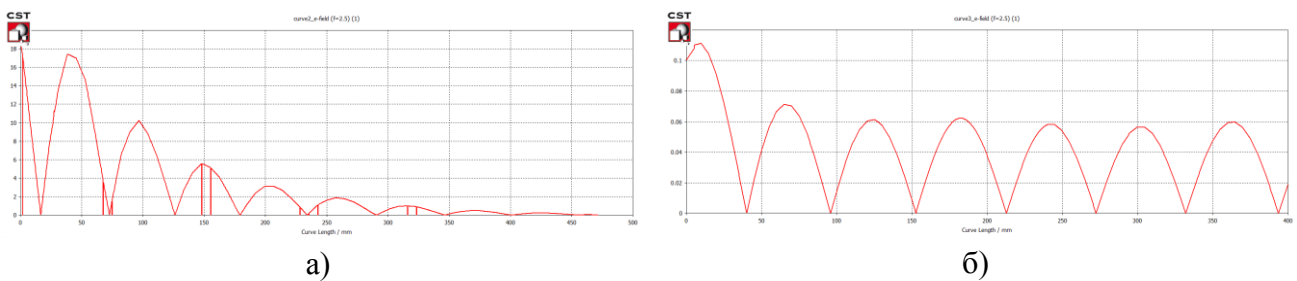


Рисунок 5.

На рис. 5а представлено распределение модуля вектора напряжённости электрической компоненты электромагнитной волны на частоте 2.5 ГГц по боковой (криволинейной) поверхности фантома и на рис. 5б показано распределение модуля вектора напряжённости электрической компоненты электромагнитной волны по задней (плоской) поверхности фантома на той же частоте.

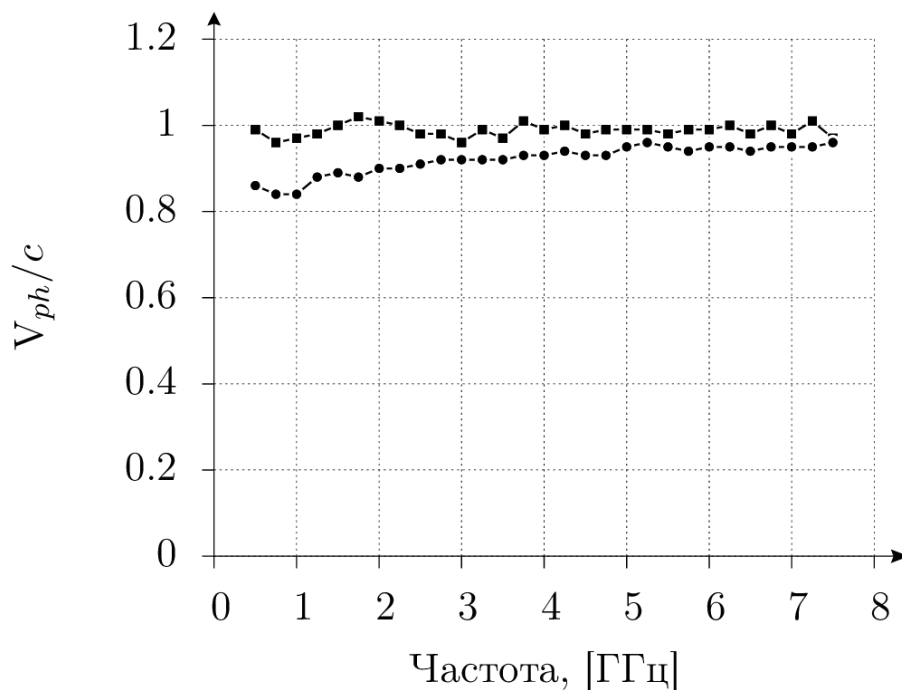


Рисунок 6.

На рисунках 5а и 5б отчетливо видны минимумы напряженности электрического поля. Зная расстояние между этими минимумами, нетрудно найти длину волны, определяемую как удвоенное расстояние между двумя соседними минимумами. Чтобы получить фазовую скорость волны, нужно умножить длину волны на выбранной частоте на эту частоту. Зависимость фазовой скорости электромагнитных волн, нормированной к скорости света в свободном пространстве, от частоты представлена на рис. 6, где линией с кружками обозначена фазовая скорость волны на боковой поверхности и линией с квадратиками – фазовая скорость волны на задней поверхности фантома.

#### Выводы:

- по боковой поверхности фантома распространяется ползущая волна, фазовая скорость которой меньше скорости ЭМ волны в свободном пространстве;
- по плоской поверхности фантома распространяется поверхностная волна, фазовая скорость которой равна скорости ЭМ волны в свободном пространстве;
- с повышением частоты фазовая скорость ползущей волны стремится к скорости ЭМ волны в свободном пространстве, что объясняется уменьшением кривизны отрезка дуги, по которой измеряется длина волны, и приближением формы поверхности к плоской;
- распространение ползущей волны сопровождается существенным затуханием, что вызвано распространением вытекающих волн, сопутствующих ползущим волнам; наличие затухания свидетельствует о необходимости использования комплексной постоянной распространения;
- затухающая ползущая волна характеризуется дисперсией.

Публикация выполнена в рамках государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)» проектной части государственного задания Минобрнауки России (задание № 8.2579.2014/К).

#### Библиографический список

1. Paknys R. The Relation Between Creeping Waves, Leaky Waves, and Surface Waves / R. Paknys, D. R. Jackson // - IEEE Trans. on Antennas and Propag. - 2005. - Vol. 53. - № 3, pp. 898 – 907.
2. Collin, R. E., Field Theory of Guided Waves, McGraw-Hill, New York, 1960.
3. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн // - Москва: Сов. Радио. – 1970. – С. 520.
4. Хёндл Х., Мауэ А., Вестпфаль К., Теория дифракции, перевод с немецкого под ред. Г.Д. Малюжинца, М., Изд. «Мир», 1964, 428 с.
5. I.V. Andronov and D. Bouche, Electromagnetic Creeping Waves and their degeneration, // - PIERS Proc. 2009, Aug. 18-21. - pp. 1518-1521
6. Conway G.A. An Analytical path-Loss Model for On-Body Radio Propagation / G.A. Conway, W.G. Scanlon, S.L. Cotton, M.J. Bentum // - 2010 URSI Intern. Symp. on Electromagnetic Theory, 2010 IEEE. - pp.332-33.
7. Mavridis T. Creeping Wave Model of Diffraction of an Obliquely Incident Plane Wave by a Circular Cylinder at 60 GHz / T. Mavridis, L. Petrillo, J. Sarrazin, D. Lautru, A. Benlarbi-Delai, et al. // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. - 2014. - Vol. 62. - № 3, pp. 1372 – 1377.
8. Lin James C. Electromagnetic fields in biological systems // - London New York: CRC Press, Taylor & Francis Group. – 2012. – з. 458.