

УДК 621.372.2

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВОЗДЕЙСТВИЯ МОДУЛИРОВАННОГО СВЧ-СИГНАЛА НА СФЕРИЧЕСКИЙ НЕИДЕАЛЬНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК**

*А.А. Копыркин*

Работа относится к области электродинамики и электромагнитной совместимости. Анализируется преобразование микроволнового излучения при прохождении через неидеальный диэлектрик и его концентрация в области диэлектрика. Представлены результаты исследования механизма модулированного СВЧ-излучения при его воздействии на сферически неидеальный диэлектрик. Приведен математический аппарат, на основе которого проводилось моделирование. Исследования производились посредством компьютерного моделирования в САПР, который объединяет в себе широкий набор инструментов для низкочастотного и высокочастотного моделирования и решения задач электродинамики. Исследуется эффект фокусировки СВЧ-излучения при воздействии на сферически неидеальный диэлектрик от вида и глубины модуляции. Были получены результаты воздействия частотно-амплитудно-импульсно-модулированных СВЧ-сигналов на сферически неидеальный диэлектрик. Показано, что при излучении линейно-частотно модулированного сигнала происходит концентрация излучения небольшой области диэлектрика, выдвинута теория о возможности управления месторасположением концентрации данного излучения путем изменения его параметров. В работе приводятся параметры сферического неидеального диэлектрика, такие как диэлектрическая проницаемость, проводимость, тангенс угла потерь и т.д. Также приводятся параметры модулированных СВЧ-сигналов. Объясняется практическая значимость полученных результатов.

Ключевые слова: модулированные сигналы, неидеальный диэлектрик модель, метод FDTD, фокусировка излучения.

В статье анализируется зависимость концентрации микроволнового излучения в сферическом неидеальном диэлектрике (теоретическая модель мозга) от формы модуляции радиочастотного сигнала с целью определения локализации электромагнитного поля в сечениях сферической модели. В статье предложена реализация и построение математической модели головного мозга, а также дипольной антенны. Также обоснована возможность применения результатов в таких областях, как радиолокация, медицина (лечение нейродегенеративных заболеваний).

В 1956 году было замечено, что люди, оказавшиеся в зоне действия радара, ощущали слуховые галлюцинации, даже если уши были защищены шумоподавителями. Испытуемых поочередно помещали за экран с четвертьволновым отверстием в 1,5–2,0 м от рупора антенны. 500 кВ передатчика на 1,3 ГГц, длительностью импульса 2 МКС и частотой повторения 600 Гц (мощность приводится для импульсного радио). Опрос показал, что звуки ощущаются на гармониках, а основная частота отсутствует. Результаты систематических наблюдений и первых исследований были опубликованы в 1961 году Аланом Фреем [1], а микроволновый слуховой феномен был назван радиозвуковым эффектом Фрея.

В более ранних работах и более поздних публикациях, посвященных изучению влияния радиозвука, как правило, акцент на физиологическую подготовку трека этого явления связан с особенностями либо слуховой системы, либо непосредственного влияния модулированного микроволнового электромагнитного поля на структуры мозга [2].

В современных публикациях механизмов взаимодействия модулированного высокочастотного сигнала со слабо поглощающего вещества с целью обнаружения эффекта электроакустического рассмотрены и проанализированы [3, 4].

В данной работе проведено численное исследование взаимодействия электромагнитного излучения и головы пользователя с помощью программы САПР. Эта программа основана на методе FDTD и позволяет находить все необходимые характеристики поля в ближней и дальней зонах. Поскольку в данной среде моделирования имеется возможность производить необходимые электродинамические расчеты с использованием метода конечных разностей во временной области.

Выбирая различные виды модуляции и ее параметры, можно обеспечить концентрацию излучения в необходимой области диэлектрика. В моделировании использовалась дипольная антенна. Стоит отметить, что при отклонении частоты чирп-сигнала менее 10 % рупорную антенну можно заменить вибраторной антенной, как это было сделано в исследовании для увеличения скорости расчета. В качестве модели неидеального диэлектрика для исследования была выбрана сферическая модель мозга (средний размер) [5, 6]. Это упрощенная модель, состоящая из слоев кожи и костей и самого мозга. Данная модель дает возможность визуально исследовать механизм действия испускаемого СВЧ-сигнала. Следующие формулы, необходимые для наших расчетов, получены из основных уравнений Максвелла, открытых и доказанных им в начале XIX века [7].

Окончательные уравнения электромагнитного поля для сферического неидеального диэлектрика (1,2), полученные из уравнений Максвелла, выглядят так:

$$H_x^\sigma(I, J, K)^{(n+1)} = H_x^\sigma(I, J, K)^n e^{\left(-\frac{\sigma+\mu}{\mu}\right)} + \left(1 - e^{\left(-\frac{\sigma+\mu}{\mu}\right)}\right) \left(-H_x^\sigma(I, J, K)^{\left(n+\frac{1}{2}\right)} - \frac{\mu-\mu_0}{\sigma^*} H_x^\sigma(I, J, K)^{\left(n+\frac{1}{2}\right)}\right) - (E_z^\sigma(I, J+1, K)^{\left(n+\frac{1}{2}\right)} J - \frac{E_z^\sigma(I, J, K)^{\left(n+\frac{1}{2}\right)}}{(\sigma^*(Y_0(J+1)-Y_0(J)))} + E_y^\sigma(I, J, K+1)^{\left(n+\frac{1}{2}\right)} J - \frac{(E_y^\sigma(I, J, K)^{\left(n+\frac{1}{2}\right)})}{\sigma^*(Z_0(K+1)-Z_0(K))}) \quad (1)$$

$$E_x^\sigma(I, J, K)^{(n+1)} = E_x^\sigma(I, J, K)^{\left(n+\frac{1}{2}\right)} e^{\left(-\frac{\sigma+\mu}{\mu}\right)} + \left(1 - e^{\left(-\frac{\sigma+\mu}{\mu}\right)}\right) \left(-E_x^\sigma(I, J, K)^n - \frac{\varepsilon-\varepsilon_0}{\sigma^*} E_x^\sigma(I, J, K)^n + (H_z^\sigma(I, J, K)^n - \frac{H_z^\sigma(I, J-1, K)^n}{\sigma^*(Y(J)-Y(J-1))} - (H_y^\sigma(I, J, K)^n - \frac{H_y^\sigma(I, J, K-1)^n}{(\sigma^*(Z(K)-Z(K-1)))}) \quad (2)$$

где  $\mathbf{H}$  – вектор напряженности магнитного поля;  $\mathbf{E}$  – вектор напряженности электрического поля;  $I, J, K, x, y$  – пространственные координаты;  $\varepsilon, \mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

В теоретическом аспекте мы имеем круговой волновод, в котором при прохождении монохроматического сигнала происходит концентрация волны E11 согласно рис. 1 [8].

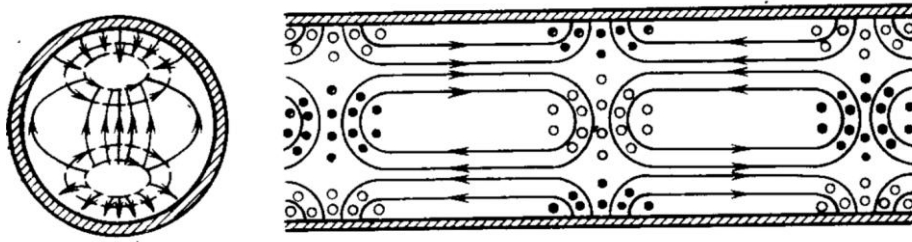


Рис. 1. Распространение волны E11 в круглом волноводе

Выбирая различные типы и параметры модуляции, можно обеспечить концентрацию излучения в нужной области диэлектрика. Для моделирования использовалась дипольная антенна. Стоит отметить, что при отклонении частоты ЛЧМ-сигнала менее 10 % рупорная антенна может быть заменена вибратором, как это было сделано в исследовании для увеличения скорости расчета.

В качестве модели неидеального диэлектрика для исследования была выбрана сферическая модель мозга (среднего размера). Это упрощенная модель, состоящая из кожного и костного слоев и самого мозга. Данная модель позволяет визуально исследовать механизм действия излучаемого СВЧ-сигнала.

Представлены результаты моделирования, когда излучение представляет собой монохроматический сигнал, показанный на рис. 2.

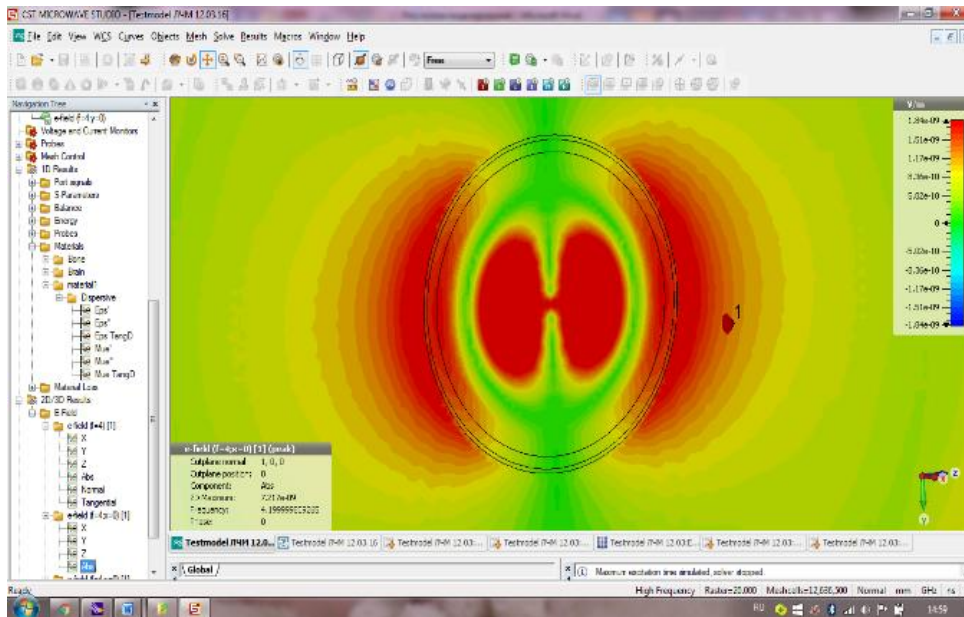


Рис. 2. Напряженность поля в горизонтальной плоскости при излучении монохроматического сигнала

В ходе моделирования было получено, что при излучении немодулированного сигнала концентрация электромагнитного поля в диэлектрике превышает концентрацию волны  $E_{11}$  в круговом волноводе [8].

Голова человека как биологическое тело имеет достаточно сложную структуру и состоит из нескольких видов биологических тканей с потерями, в которых энергия поглощается неравномерно из-за разницы в проводимости каждого слоя. Поэтому точное построение модели головы является важным условием точности расчета внутреннего поля.

### Выводы

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы. ЛЧМ-сигнал фокусируется преимущественно в центре диэлектрика, в горизонтальной плоскости имеются боковые области концентрации излучения в виде окружностей, расстояние между которыми зависит от частоты отклонения.

Необходимо также учитывать, что напряжение источника, работающего на входе антенны, изменяется со временем. Поэтому для каждого временного шага необходимо рассчитать значения электрического и магнитного полей во всех точках анализируемого пространства, в соответствии с методом временной области (метод FDTD).

Использование метода FDTD является особенно выгодным при исследовании нестационарных процессов, например, электромагнитного поля антенн при возбуждении короткими импульсами или модулированных сигналов.

Это исследование поможет в прогнозировании лечения таких заболеваний, при которых необходимо влиять на определенные участки мозга. В радиолокации, при изучении колебания модулированного сигнала на сферическом объекте.

#### Библиографический список

1. Frey, A. Auditory system response to radio frequency energy / A. Frey. *Aerospace Med*, 1961, 32. – P. 1140–1142.
2. Elder, J.A. Auditory Response to Pulsed Radiofrequency Energy / J.A. Elder, C.K. Chou // *Bioelectromagnetics*. – 2003. – 24. – С. 162–173.
3. Баринов, А.Е. Коагуляция частиц крови под воздействием СВЧ-излучения / А.Е. Баринов, В.И. Тамбовцев, Д.А. Кыдырбаева // *Материалы XIII Международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов»*. – Казань; Самара, 2015. – С. 353–355.
4. Budden, K.G. *The Waveguide Mode Theory of Wave Propagation* / K.G. Budden. – London: Logos Press, 1961. – 325 p.
5. Terman, F.E. *Electronic and Radio Engineering*, McGraw-Hill Book Company / F.E. Terman. – New York, 1995. – 1078 p.
6. Kunz, K. *The Finite Difference Time Domain for Electromagnetics* / K. Kunz, R. Luebbers. – 1993. – P. 90–91.
7. Семенов, Н.А. *Техническая электродинамика. Учебник для вузов* / Н.А. Семенов. – М., 1973. – 480 с.
8. IEEE C95.1-1991, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*, New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1992.

[К содержанию](#)