

**Е. Л. ПИРОТТИ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**В. А. ОТДЕЛЬНОВ**, аспирант, НТУ «ХПИ»

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗА РЕШЁТКОЙ РАССЕИВАТЕЛЕЙ

Статья посвящена моделированию распределения электромагнитного поля за решёткой рассеивателей. Аппаратно имитирована диаграмма направленности электромагнитного поля. Здійснено математичне та технічне моделювання розподілу електромагнітного поля за наявністю одного та декількох розсіювачів, а також за змін положень останніх. Результати можуть бути враховані та використані у виробництві антен, елементів радіостанцій та інших радіотехнічних засобів.

Статья посвящена моделированию распределения электромагнитного поля за решёткой рассеивателей. Аппаратно имитирована диаграмма направленности электромагнитного поля. Осуществлено математическое и техническое моделирование распределения электромагнитного поля при наличии одного и нескольких рассеивателей, а также при изменении положения последних. Результаты могут быть учтены и использованы в производстве антенн, элементов радиостанций и других радиотехнических средств.

The article is devoted to the modeling of electromagnetic field distribution behind the grating of scatterers. The electromagnetic directivity diagram is simulated by hardware. The mathematical and technical design of electromagnetic field distribution in presence of one and a few scatterers, also as with regulations changes of the last ones is realized. The results can be used and allowed for antenna industries, radio station elements and other radio technical facilities manufacturing.

**Введение.** Рассеивающая антенна, электромагнитное поле которой рассеивается объектами биологического происхождения, незаменима в терапевтической отрасли медицины. Задачей является техническая реализация модели антенны с узким управляемым лучом.

**Математическая модель.** В статье предложена модель, демонстрирующая способы управления лучом. Используя функцию Грина [1,2], можно привести волновое уравнение к интегральным уравнениям Максвелла совместно с граничными условиями на разделе двух сред:

$$\begin{cases} \vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) + \frac{1}{4\pi} (\text{grad div} + k^2) \int_V (\varepsilon/\varepsilon_c - 1) \vec{E}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}'; \\ \vec{H}(\vec{r}) = H_0(\vec{r}) + \frac{i\omega\varepsilon_c}{4\pi} \text{rot} \int_V (\varepsilon/\varepsilon_c - 1) \vec{E}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}', \end{cases} \quad (1)$$

где  $f(x) = e^{-ikx}/x$ ,  $\vec{E}_0(\vec{r})$  и  $\vec{H}_0(\vec{r})$  – электрическое и магнитное поля соответственно, которые были бы в точке  $\vec{r}$  при отсутствии биологического рассеивателя,  $\varepsilon_c$  – диэлектрическая проницаемость среды,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\vec{E}$  – падающее поле,  $k$  – волновой вектор,

$\omega$  – круговая частота монохроматической электромагнитной волны. Для решения (1) удобно использовать (2) и (3).

**Результаты моделирования.** Электромагнитное поле с помощью расширения «Antenna toolbox» формируется дипольным излучателем. Частота исходного излучения была выбрана равной 600 МГц. В процессе моделирования поверхность излучателя разбивается на равные поверхностные элементы и с помощью расширения «PDE toolbox» находится распределение поверхностных токов. Следующим этапом после определения токов на поверхности излучателя является нахождение излучаемого электромагнитного сигнала в исследуемом пространстве. Нахождение электромагнитных полей осуществляется с применением дипольной модели. Суть метода заключается в замене каждого поверхностного элемента излучателя на малый диполь, обладающий тем же самым дипольным моментом. Поле, излучаемое малым диполем, представляет собой известное аналитическое выражение. Искомое излучаемое поле затем вычисляется как сумма полей, образованных малыми диполями.

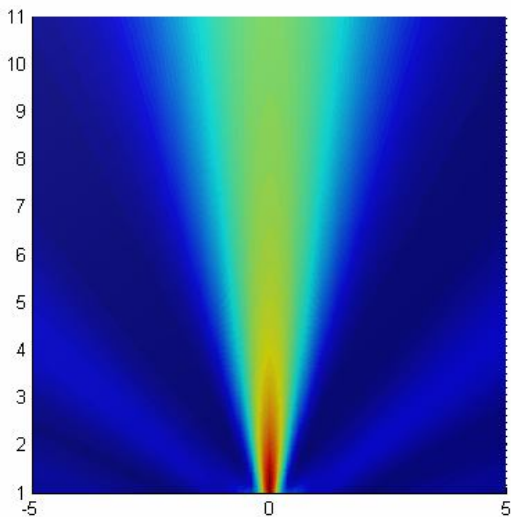


Рисунок 1 – Диаграмма направленности исходного излучения

Задаём диаграмму. На рис.1 продемонстрирован результат моделирования диаграммы направленности исходного излучения электромагнитного поля, учитывая ограничение его по мощности. Затем помещаем одиночный рассеиватель и сравниваем результаты.

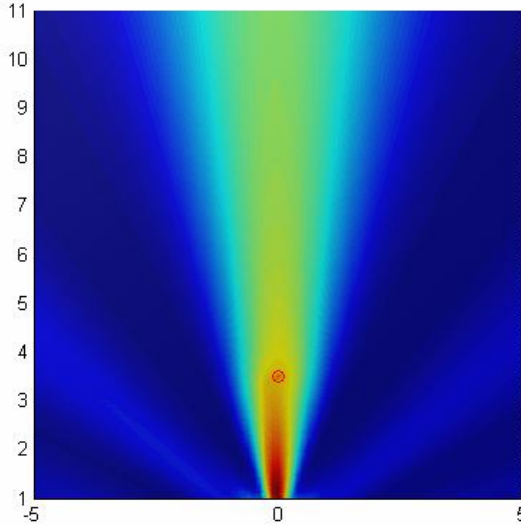


Рисунок 2 – Распределение электромагнитного поля. Один рассеиватель

Как было показано в [3], анализ рассеяния электромагнитного поля частицами [3] является весьма сложной задачей математического моделирования. Однако в данном случае изучаются частицы, представляющие собой сферы, линейные размеры которых намного меньше длины падающей волны, что позволяет применять результаты работы [4] для определения поля рассеяния.

В качестве рассеивателя берётся сфера радиуса  $r = 5\text{см}$ , с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 4.5$ .

Как видно на рис. 1 и 2, эффект рассеяния одной частицей невелик. Однако, уже здесь (рис.2) наблюдается небольшое отклонение направляющего луча от первоначального направления. При моделировании для вычисления составляющих поля [5] использованы формулы (2) и (3):

$$\vec{E}^{(0)}(\vec{r}) = \vec{E}_0^{(0)} + \frac{\tilde{A}}{4\pi\Delta} \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) R\vec{E}_0^{(0)}; \quad \vec{H}^{(0)}(\vec{r}) = \vec{H}_0^{(0)} + i\omega\varepsilon_c \frac{\tilde{A}}{4\pi\Delta} \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) S\vec{E}_0^{(0)}, \quad (2)$$

$$\tilde{R} = \begin{vmatrix} -\frac{4\pi}{3} + k^2 W' & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{4\pi}{3} + k^2 W' & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{4\pi}{3} + k^2 W' \end{vmatrix}, \quad \tilde{S} = \begin{vmatrix} 0 & \frac{4\pi z}{3} & -\frac{4\pi y}{3} \\ -\frac{4\pi z}{3} & 0 & \frac{4\pi x}{3} \\ \frac{4}{3}\pi y & -\frac{4}{3}\pi x & 0 \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где  $k$  – волновой вектор,  $W'$  – потенциал Ньютона.

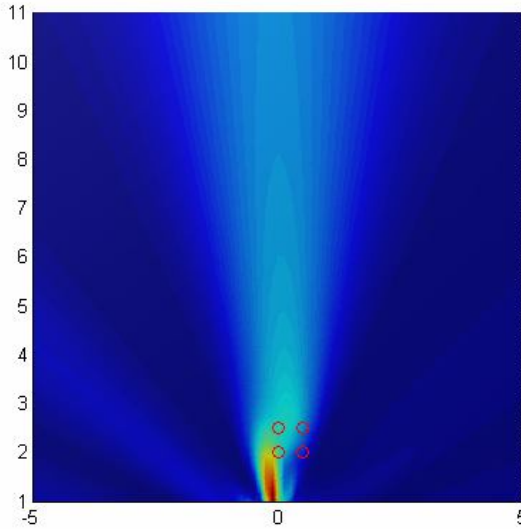


Рисунок 3 – Распределение электромагнитного поля. Четыре рассеивателя.

В случае четырёх рассеивателей (рис. 3) диаграмма направленности отклоняется заметнее. Эффект рассеяния электромагнитной волны СВЧ диапазона одной частицей малого радиуса практически не сказывается на распространении волны. При моделировании такой системы необходимо учитывать

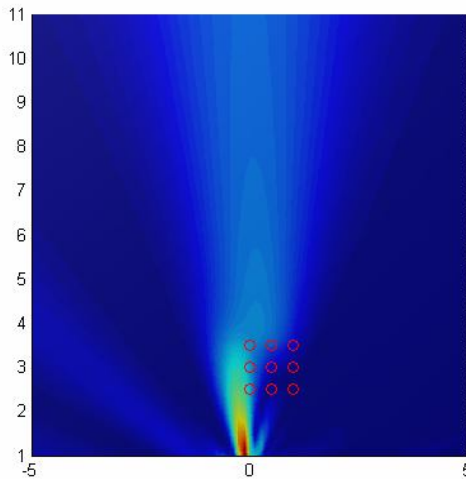


Рисунок 4 – Распределение электромагнитного поля. Девять рассеивателей

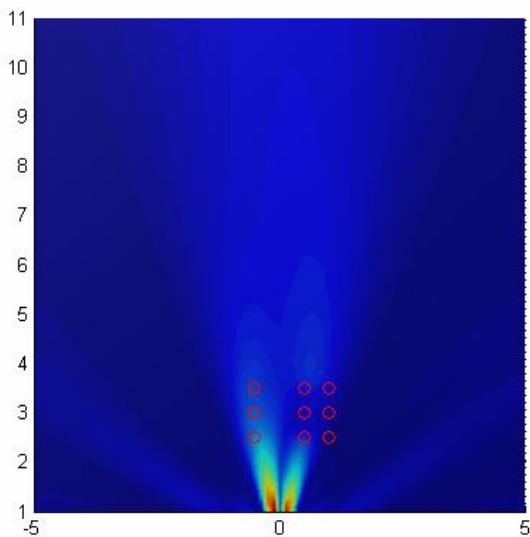


Рисунок 5 – Распределение электромагнитного поля. Девять рассеивателей, расположенных асимметрично

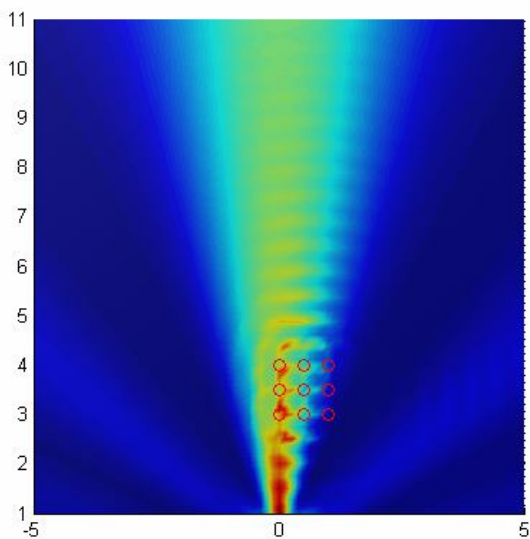


Рисунок 6 – Решётка с непостоянной диэлектрической проницаемостью

влияние полей, рассеянных частицами, на сами частицы. Простейшей системой является решётка из девяти рассеивателей. Форма и линейные размеры рассеивателей оставлены прежними.

Из рисунков 4 и 5 видно, что путём изменения положения шариков – рассеивателей можно менять основной луч диаграммы направленности. В частности, на рис. 5 расстояние между рассеивателями в антенной решётке выбрано неодинаковым. Варьируя расстояние, получаем возможные положения основного луча. На рис. 5 видно, что при выбранном положении рассеивателей луч более растянут и ослаблен по мощности излучения. Однако на практике для осуществления такого подхода потребуются некие механические приспособления, не очень удобные в применении. Намного проще дистанционно изменять диэлектрическую проницаемость материала, из которого изготовлены шарики в антенной решётке. На рис. 6 смоделировано поведение диаграммы направленности, когда диэлектрическая проницаемость есть величина непостоянная и увеличивается вдоль оси абсцисс. Плоская структура рассеивателей с различным распределением значений диэлектрической проницаемости, помещенная вблизи от источника рассеивания, приводит не только к рассеиванию поля, но также и к изменению вектора направленности электромагнитного поля. Этот вариант (рис. 6) является наиболее удобным для практического применения.

Теперь стало очевидно, что компьютерная модель управляемой антенны реализована успешно.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Полученные результаты открывают реальный путь к моделированию распределения поля с использованием трёхмерной решётки рассеивателей. Имеет смысл построение имитационной модели с изменением радиуса и диэлектрической проницаемости каждого рассеивателя с целью выявления наилучшего материала, из которого они будут изготавливаться. Важно знать, какое количество шариков в решётке будет оптимальным. Необходимо развивать теорию в этом направлении.

**Список литературы:** 1 *Хижняк Н.А.* Применение интегральных уравнений электродинамики к решению дифракционных задач // Ученые записки ХГУ. Труды радиофизического факультета. – 1957. – Т.2. – С. 13-32. 2. *Хижняк Н.А.* Функция Грина уравнений Максвелла для неоднородных сред // ЖТФ. – 1958. – Т. 28, № 7. – С. 1592 – 1609. 3. *Пиротти Е.Л., Отдельнов В.А.* Моделирование распределения электромагнитного поля в малых биологических сферах (приближения первого и второго порядка). // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Системный анализ, управление и информационные технологии». Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007. – №41. – С. 17-21. 4. *Пиротти Е.Л.* Внутренние электромагнитные поля в биообъектах, имеющих n-слойную структуру // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – Харьков: ХГТУРЭ. – 1997. – Вып. 106. – С. 154 - 159. 5. *Кальницкий Л.А., Добротин Д.А., Жевержеев В.Ф.* Специальный курс высшей математики. – М.: Высшая школа, 1976. – 389 с.

*Поступила в редколлегию 31.03.11*