

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ АБОНЕНТСКИХ СТАНЦИЙ

Голова пользователя абонентской станции (АС) находится в ближней зоне электромагнитного поля излучаемого антенной АС. Имеет место как потенциально вредное воздействие на биологические ткани со стороны поля, так и влияние тела человека на характеристики самой антенны. В настоящее время проводятся интенсивные исследования, связанные, как правило, с оценкой влияния электромагнитного поля на голову пользователя АС. Для расчета ближнего и дальнего полей, излучаемых антенной системой АС, используют моделирование электромагнитных явлений на компьютере. Моделирование выполняется с помощью численных методов на электродинамическом уровне. Численные методы решения уравнений Максвелла работают тем точнее, чем большими компьютерными ресурсами располагает исследователь. Добавление в качестве моделируемого объекта тела человека, представляющего собой диэлектрический материал с большими потерями, значительно усложняет задачу. Однако именно расчет и уменьшение мощности, поглощаемой в теле человека при работе АС, является одной из приоритетных задач проектирования АС.

Рассмотрим методы численного электродинамического анализа антенн АС и современные программы, реализующие эти методы.

Метод моментов (Method of Moments, MoM) предполагает описание антенны в виде многослойной планарной конструкции. Слои, где это необходимо, соединяются с помощью металлических перемычек. Считается, что токи в этих перемычках имеют только вертикальную составляющую по оси Z . Используя известные функции Грина для элементарных металлических форм, на которые разбивается вся металлическая форма плоской антенны, программа решает систему уравнений, составленную на основании непрерывности полей на границах слоев.

В 1993 компания Zeland представила программу IE3D для электромагнитного моделирования и оптимизации. Имитатор IE3D имеет много хороших особенностей для моделирования антенн в слоистой диэлектрической среде. Имитатор IE3D простой в использовании, точен и эффективен для моделирования различных структур типа волноводов и антенн. Однако метод моментов имеет некоторый свойственный ему недостаток в моделировании трехмерных диэлектрических структур, волноводных структур и структур с сильно неравномерным распределением напряженности электрического поля. Метод конечных элементов. В этом методе (Finite Element Method, FEM) все анализируемое пространство разбивается на конечные элементы, в соответствии с ожидаемой скоростью изменения поля. Формируется набор неизвестных (значения поля) на гранях конечных элементов, составляется система уравнений, которая решается в частотной области.

Одной из программ, которая рассчитывает СВЧ конструкции в трехмерном представлении, является программа HFSS. Эта программа совмещена с AutoCAD, поэтому рисование конструкции в ней аналогично черчению объектов в среде AutoCAD. Программа HFSS использует метод конечных элементов (FEM) для расчета электромагнитного поля во всех точках анализируемого пространства. Основная идея расчета мощности, поглощаемой в голове пользователя, состоит в использовании специального режима вывода результатов расчета модуля электромагнитного поля вдоль линии (LINE), пересекающей конструкцию насквозь. В этом случае можно рассчитать зависимость модуля поля от координаты удаления от антенны.

Программа HFSS делит все анализируемое пространство на тетраэдры, составляет систему уравнений для неизвестных (величины электрического и магнитного поля в вершинах). Погрешность метода конечных элементов, реализованного в программе HFSS, состоит в том, что разбиение на неодноразмерные тетраэдры дает скачки напряженности поля в промежу-

точных точках, поскольку в методе происходит сшивание и выравнивание величин поля только в определенных точках пространства.

Метод конечно-разностного домена времени (finite-difference time-domain, FDTD) состоит в использовании метода конечных разностей для решения системы уравнений Максвелла в форме алгебраических уравнений.

По сравнению с алгоритмами моделирования в частотной области типа MOM и FEM, FDTD имеет следующие характерные особенности:

1. Метод FDTD простой в программной реализации.

2. Окончательные алгебраические уравнения для FDTD записываются во временной форме. FDTD, не создает большие матричные уравнения, которые присущи MOM и FEM. Хотя основные вычислительные требования для FDTD обычно намного выше, чем для MOM при моделировании маленьких и средних структур, FDTD может требовать намного меньше вычислительные ресурсы, чем MOM, для больших структур. С другой стороны FDTD обычно требуют меньше вычислительных ресурсов, по сравнению с FEM для сильно изогнутых структур.

3. Моделирование FDTD дает обычно широкополосный результат. Одно единственное моделирование может выдавать широкополосную частотную характеристику. MOM и FEM обычно требуют широкой частотной полосы для полного анализа.

4. FDTD имитаторы могут обрабатывать сложный диэлектрик, структурируя его намного проще, чем MOM и FEM.

Для решения задачи поглощения электромагнитной энергии в теле пользователя (задача SAR) специально была разработана программа FIDELITY (фирма Zeland). Эта программа использует прямое интегрирование уравнений Максвелла во временной области, применяя импедансные эквиваленты электромагнитного поля (элементы Yee). Программа FIDELITY использует метод FDTD и рассчитывает переходной процесс в реальной трехмерной конструкции.

Метод FDTD использует для описания электромагнитных явлений в произвольной среде систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (4)$$

где \vec{E} – вектор напряженности электрического поля; \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля; $\vec{J} = \vec{J}_{\text{пров}} + \vec{J}_{\text{конв}} = \sigma \vec{E} + \rho \vec{v}$ – вектор плотности полного тока; σ – удельная проводимость среды; \vec{v} – вектор скорости движения заряженных частиц; ρ – объемная плотность заряда.

Уравнения (1) – (4) дополняются уравнениями, описывающими среду, в которой распространяется электромагнитная волна. В общем случае эти уравнения для произвольной среды имеют вид:

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}, \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (6)$$

где ϵ_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная постоянные; $\epsilon = \epsilon(x, y, z, t)$ и $\mu = \mu(x, y, z, t)$ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

Для понимания логики построения конечно-разностной схемы распишем подробно систему уравнений в частных производных (1) – (4) с учетом материальных уравнений (5) и (6) в декартовой системе координат.

$$\vec{i}\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right) + \vec{j}\left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}\right) + \vec{k}\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right) = J_x \vec{i} + J_y \vec{j} + J_z \vec{k} + \frac{\partial D_x}{\partial t} \vec{i} + \frac{\partial D_y}{\partial t} \vec{j} + \frac{\partial D_z}{\partial t} \vec{k}, \quad (7)$$

$$\vec{i}\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right) + \vec{j}\left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right) + \vec{k}\left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right) = \left(-\frac{\partial B_x}{\partial t} \vec{i}\right) + \left(-\frac{\partial B_y}{\partial t} \vec{j}\right) + \left(-\frac{\partial B_z}{\partial t} \vec{k}\right), \quad (8)$$

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = \rho, \quad (9)$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0, \quad (10)$$

$$D_x \vec{i} + D_y \vec{j} + D_z \vec{k} = \epsilon \epsilon_0 (E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k}), \quad (11)$$

$$B_x \vec{i} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k} = \mu \mu_0 (H_x \vec{i} + H_y \vec{j} + H_z \vec{k}), \quad (12)$$

где x, y, z – компоненты векторов напряженностей (\vec{E} , \vec{H}) и индукций (\vec{D} , \vec{B}) электрического и магнитного полей соответственно, а также вектора полного тока \vec{J} по осям x, y, z .

Пространственно-временная дискретизация позволяет перейти от непрерывного пространства и времени к дискретному. Это означает, что всё пространство вычисления покрыто равномерной сеткой пространственных координат x, y , и z , а также времени t . Узлы сетки электрического и магнитного полей смещены по отношению друг к другу во времени и пространстве на половину шага дискретизации по каждой из переменных [1, 2]. Используя конечно-разностные уравнения, можно определить значения электрического и магнитного полей в данный момент времени на основании известных значений в предыдущий момент времени.

На рис. 1 показано расположение компонентов электрического и магнитного поля. Построение такого шаблона позволяет осуществить переход по пространственным координатам x, y и z от системы дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений.

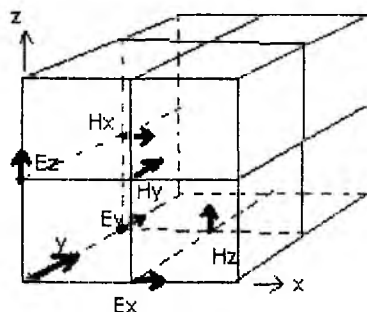


Рис. 1

В методике FDTD числовая модель анатомии человека составлена из трехмерной сетки небольших кубиков. Электрические свойства каждого кубика соответствуют свойствам ткани в этом месте. Сознательное ограничение модели человека только головой объясняется тем, что в случае облучения полями, идущими от АС, наибольшие величины SAR (SAR – specific absorption rate, удельная абсорбция) концентрируются именно в голове пользователя [3].

Необходимость создания инструмента для числовой симуляции того, как пользователь АС облучается радиочастотными полями, вызвана тем, что в действительности невозможно измерить распределение полей или величины SAR внутри человека. И в то же время SAR является важнейшей величиной, так как нормы облучения человека установлены в SAR [4].

Параметр SAR служит для оптимизации технических характеристик АС. Есть три взаимосвязанных фактора, которые учитывают производители: качество работы АС в сетях операторов, её привлекательность для потребителя в плане размера, веса и дизайна и, наконец, безопасность пользователя (величина SAR). Уменьшение габаритов телефона и улучшение качества связи приводит к увеличению SAR. Для выбора оптимального варианта конструкции АС производители используют моделирование,

Список литературы: 1. *Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media / Yee K.S. // Proc. IEEE. Transactions Antennas and Propagation. 1966. Vol. AP-14, P. 302 – 307.* 2. *Yee K.S. Conformal hybrid finite difference time domain and finite volume time domain. / Yee K.S., Chen J.S. // Proc. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1994. vol. 42, NO. 10.* 3. *L.W. Li Specific Absorbtion Rates in Human Head Due to Handset Antennas: A Comporative Study Using FDTD Method. / L.W. Li, M.S. Leong, P.S. Kooi, T.S. Yeo // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2000. Vol. 14. P. 987 – 1000.* 4. *P. J. Dimbylow Finite-difference time-domain calculations of SAR in a realistic heterogeneous model of the head for plane-wave exposure from 600 MHz to 3 GHz / P.J. Dimbylow, O.P. Gandhi // Phys. Med. Biol. 1991. Vol. 36. N. 1. P. 1075 – 1089.*

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 11.03.2004