

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЕЙ ПОЛЕЙ ОКОЛО АНТЕННЫ АБОНЕНТСКОЙ СТАНЦИИ ПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

При работе АС электромагнитное излучение воспринимается не только приемником базовой станции, но и телом пользователя и, в первую очередь, его головой. Голова пользователя находится в ближней зоне электромагнитного поля (ЭМП), 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 с оценкой влияния ЭМП на пользователя АС. В мировой практике для оценки влияния электромагнитного поля ближней зоны на тело человека как параметр применяют специальный коэффициент абсорбции [1] (или коэффициент удельного поглощения) – SAR (SAR – specific absorption rate), определяемый в соответствии с формулой

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{\sigma \cdot E^2}{\rho} = c \frac{dT}{dt},$$

где σ – проводимость биологической ткани; ρ – плотность (удельный вес) биологической ткани; E – действующее (среднеквадратическое) значение напряженности электрического поля в биологической ткани; c – удельная теплоемкость биологической ткани; dT/dt – прирост температуры биологической ткани.

Параметр SAR представляет собой мощность dW , поглощаемую биологической тканью массой dm за время dt и, таким образом, при его определении учитываются практически все аспекты, связанные с ЭМП ближней зоны: технические характеристики источника излучения, биологические характеристики тканей, искажения поля, вносимые телом человека.

Определение значений SAR проводится двумя основными методами: с помощью «фантома» и с помощью компьютерного моделирования.

«Фантом» представляет собой имитатор тканей человеческого организма. «Фантомы» с различной степенью точности копируют человеческое тело. Электрические свойства наполнителя фантома должны в той или иной степени соответствовать электрическим свойствам реальных биологических тканей (кожи, мускулов, жира, кости, крови и т.д.). Измеряя с помощью датчика, расположенного внутри «фантома», напряженность электрического поля в различных точках имитатора и, учитывая электрические параметры наполнителя, можно определить величину SAR. Для определения SAR используют также имплантируемый датчик температуры.

Необходимость применения компьютерного моделирования 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. Моделирование выполняется с помощью численных методов, основанных на решении уравнений Максвелла. Эти методы 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 такое моделирование, близкое к реальным условиям, позволяет наиболее точно произвести расчет мощности, поглощаемой в теле человека при работе АС. Рассмотрим некоторые наиболее распространенные методы численного электродинамического анализа антенн АС.

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.

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.

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 [2].

Проведем сравнительный анализ перечисленных методов. По сравнению с алгоритмами моделирования в частотной области типа МоМ и FEM, метод FDTD прост в программной реализации. Окончательные алгебраические уравнения для FDTD записываются во временной форме. FDTD не создает большие матричные уравнения, которые присущи МоМ и FEM. Хотя основные вычислительные требования для FDTD обычно намного выше, чем для МоМ при моделировании маленьких и средних структур, FDTD может требовать намного меньшие вычислительные ресурсы, чем МоМ, для больших структур. С другой стороны, метод FDTD обычно требует меньше вычислительных ресурсов, по сравнению с методом FEM для сильно изогнутых структур. Моделирование FDTD дает обычно широкополосный результат. Одно единственное моделирование может выдавать широкополосную частотную характеристику. МоМ и FEM обычно требуют широкой частотной полосы для полного анализа. FDTD имитаторы могут обрабатывать сложный диэлектрик, структурируя его намного проще, чем МоМ и FEM.

Любой из перечисленных методов является технически очень сложным, трудоемким, до конца не отработанным. Оснащение испытательной лаборатории при работе с «фантомом» требует значительных капитальных затрат, а «фантомы» недостаточно точно копируют человеческие тела и их разнообразие. Компьютерное моделирование электромагнитных структур указанными методами обуславливает необходимость использования мощных, дорогостоящих программ, требующих больших ресурсов компьютера и продолжительного времени для расчета.

Одним из возможных способов определения величины напряженности ЭМП, создаваемого АС является решение интегрального уравнения в частотной области, записанного для одной конкретной частоты. В системах радиосвязи с подвижными объектами вид спектра и его форма существенно зависят от способа уплотнения абонентских каналов. Используемые методы уплотнения можно разделить на 3 класса: частотное уплотнение, временное и кодовое (в подвижной радиосвязи – аббревиатуры FDMA, TDMA и CDMA соответственно) [3].

Частотное уплотнение. При частотном уплотнении частотные полосы спектров абонентских сигналов не пересекаются на частотной оси, и абонентские каналы объединяются посредством частотно-избирательных (частотно-разделительных) устройств. Во избежание интермодуляционных искажений при частотном уплотнении объединение абонентских сигналов осуществляется в линейной части системы. Это делает необходимым использование отдельных передатчиков для каждого абонентского канала. Выходные тракты передатчиков объединяются посредством частотно-разделительного устройства (или устройства сложения другого типа). Поэтому с точки зрения физических основ и технической реализации частотное уплотнение представляет собой объединение радиоканалов на одновходовую антенну посредством частотно-разделительного или мостового устройства сложения. В пределах каждого из объединяемых радиоканалов организуется один абонентский канал.

Отмеченная особенность частотного уплотнения позволяет передатчик каждого абонентского канала рассматривать в качестве самостоятельного технического средства. При этом, поскольку полосы частот, занимаемые абонентскими сигналами, невелики, возникает возможность традиционного подхода к оценке электромагнитной безопасности на основе

определения совокупной интенсивности воздействия, включая те случаи, когда полосы частот различных абонентских каналов оказываются в разных нормируемых диапазонах.

Временное уплотнение. При временном уплотнении абонентский сигнал представляется в цифровой форме и передается посредством коротких импульсов. При этом каждому сигналу для импульса выделяется вполне определенное место на оси времени в пределах некоторого промежутка времени (временного кадра), общего для нескольких уплотняемых каналов. С математической точки зрения, временное уплотнение соответствует представлению исходного сигнала (в цифровой форме) в базисе периодических (периодом здесь является период следования временных кадров) кусочно-постоянных функций, которые образуют ортогональную систему функций, поскольку не пересекаются на оси времени. При этом импульсная работа приемника соответствует скалярному умножению суммарного сигнала на соответствующую базисную функцию.

Передача абонентского сигнала в виде коротких импульсов приводит к существенному расширению (по сравнению с частотным уплотнением) частотной полосы, занятой его спектром. Соответственно существенно расширяется частотная полоса одного радиоканала, обслуживаемого одним передатчиком.

Кодовое уплотнение состоит в кодировании исходных абонентских сигналов специальными функциями (импульсными) – псевдослучайными последовательностями, функциями Уолша и т.д., которые образуют ортогональные системы или близкие к таковым.

С математической точки зрения, при кодовом уплотнении использован тот же принцип, что и при временном уплотнении. Различие состоит в выборе базисных функций. Именно этим объясняется возможность уплотнения значительно большего числа каналов по сравнению с временным уплотнением. Соответственно существенно расширяется полоса частот, занятая спектром отдельного абонентского сигнала и суммарного сигнала, т.е. полоса частот радиоканала, обслуживаемого одним передатчиком.

Излучающими элементами АС являются антенна и проводники, расположенные на печатной плате. В непосредственной близости от АС необходим учёт реальной конфигурации антенны и возможной асимметрии противовеса (печатной платы). Задачу нахождения распределения поля антенны АС целесообразно решать путем ее сведения к интегральному или интегро-дифференциальному уравнению относительно поверхностного тока проводимости [4]. Полагаем, что в качестве данного интегрального уравнения используется уравнение Поклингтона в тонкопроволочном приближении. При анализе в пространственно-временной области может быть найдена искомая функция координат и времени $j(r, t)$, при анализе в пространственно-частотной области – функция координат и частоты, $j_\omega(r, \omega)$ которая при каждой фиксированной точке r имеет смысл спектральной плотности тока, локализованного в окрестности этой точки.

В пространственно-временном представлении интегральное уравнение задачи можно записать в следующем виде:

$$E_{t(cm)}(r, t) = \tau_o(r) \int_{-\infty}^{\infty} \int_S K_t(r, r', t, t') j(r', t') ds' dt', \quad r, r' \in S, \quad (2)$$

где S – совокупная поверхность металлических рассеивателей; $E_{t(cm)}$ – тангенциальная к S составляющая стороннего поля, возбуждающего излучающую структуру; $\tau_o(r)$ – τ -орт (тангенциальный к S) в точке r ; $K_t(r, r', t, t')$ – ядро уравнения – функция, имеющая смысл взятая с обратным знаком поля в точке r в момент времени t , создаваемого элементом тока, локализованным в окрестности точки r' в момент времени t' .

Заметим, что в (2) $t' < t$ (причем $t' = t$ при $r' = r$), и разность $\Delta t = t - t'$ представляет собой временную задержку при передаче через среду воздействия из точки источника в точку наблюдения (отклика). Временная задержка определяется скоростью распространения электромагнитных волн в данной среде v . Это позволяет ядро в (2) переписать в виде

$$K_t(r, r', t, t') = K_o(r, r') \cdot \delta(|r - r'| / v - \Delta t), \quad (3)$$

где $K_0(r, r')$ – функция, имеющая смысл взятого с обратным знаком поля в точке r , создаваемого элементом тока, локализованным в окрестности точки r' в стационарном режиме; $\delta(|r - r'|/v - \Delta t)$ – дельта-функция Дирака, учитывающая задержку.

Переходя к пространственно-частотному представлению и выполняя преобразование Фурье для обеих частей (3), в левой части получим спектральную плотность стороннего поля $E_{\omega(cm)}(r, \omega)$. Что касается правой части, то с учетом показанного выше вида ядра уравнения (3), а также учитывая свойства дельта-функции и выполняя интегрирование по t' , получаем спектральную плотность тока $j_\omega(r', \omega)$, что приводит к уравнению [5]:

$$E_{\omega(cm)}(r, \omega) = \tau_o(r) \int_S K_\omega(r, r', \omega) j_\omega(r', \omega) ds', \quad r, r' \in S, \quad (4)$$

где $K_\omega(r, r', \omega) = K_0(r, r') e^{-i\beta(\omega)|r-r'|}$ – ядро уравнения, которое теперь имеет смысл взятого с обратным знаком гармонического поля в точке r , колеблющегося с частотой ω и создаваемого элементом колеблющегося с той же частотой гармонического тока, локализованного в окрестности точки r' ; $\beta(\omega) = \omega/v$ – волновое число для данной среды (вещественная постоянная распространения в предположении отсутствия потерь в среде).

Поскольку ядро уравнения (4) зависит от частоты, стороннее поле и ток как функции частоты (для некоторой фиксированной точки $r = r'$) имеют различный вид. Это означает, что в данной структуре происходит преобразование спектра стороннего поля.

Используя модифицированное интегро-дифференциальное уравнение в пространственно-частотной области, можно рассчитать уровень ЭМП, создаваемого одним техническим средством. Если же пространство находится под воздействием ЭМП от нескольких технических средств, работающих в одном диапазоне, то энергетическая экспозиция определяется путем суммирования энергетических экспозиций, создаваемых каждым источником (техническим средством).

Результирующую величину ЭМП в определенной точке пространства можно выразить как сумму влияний:

$$K_\Sigma = K_{AC} + K_{BO} + K_{\text{остальные_факторы}}, \quad (5)$$

где K_{AC} – влияние ЭМП создаваемого антенной АС; K_{BO} – влияние биологического объекта (БО) на ЭМП АС; $K_{\text{остальные_факторы}}$ – факторы, учитывающие электромагнитную обстановку в данной точке пространства.

Влияние ЭМП АС можно оценить, воспользовавшись формулой (4).

Влияние БО на ЭМП учитывается при компьютерном моделировании, если в качестве моделируемого объекта добавляется тело человека (или часть тела, обычно голова).

К числу остальных факторов можно отнести:

- ЭМП, создаваемые различными техническими устройствами. В связи с интенсивным развитием эфирного телевизионного и радиовещания, подвижной и производственной радиосвязи места временного пребывания производственного персонала достаточно часто находятся в зоне действия мощных ЭМП. В качестве таких мест можно указать крыши и технические этажи административных зданий вблизи антенн мощных передающих радиосредств, высотные сооружения (башни, мачты, трубы и т.п.), на которых установлены антенны радиопередающих средств, пути и маршруты следования персонала по производственным нуждам, проходящие вблизи излучающих антенн, фидеров и генераторного оборудования. Кроме того, пользователи АС зачастую находятся рядом с бытовыми приборами, излучающими ЭМП. Такими бытовыми приборами могут быть микроволновые печи, компьютеры, телевизоры и т. п.;

- отражающие поверхности. Следует учитывать, что в условиях экранирования (автомобиль, железобетонные здания) плотность потока электромагнитного излучения, действующего на человека многократно усиливается.

Суммируя совокупность влияния всех перечисленных факторов, можно с различной степенью точности моделировать ЭМП, воздействующее на БО. Для оценки степени влияния факторов, учитывающих электромагнитную обстановку в данной точке пространства, необходимо ввести весовые коэффициенты. Весовые коэффициенты определяются из эвристических предположений таким образом, чтобы максимально достоверно отразить реальную электромагнитную обстановку.

Список литературы: 1. Li L. W. 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. 2. Chavannes N. Suitability Of FDTD-Based TCAD Tools for RF design of Mobile Phones. / Chavannes N., Yew-Siow R., Nikolaski N., Kuster N. // IEEE Antennas and Propagation. Magazine. Vol. 45, No. 6, December 2003 P. 52 - 66. 3. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. М.: Технологии электронных коммуникаций, 1996. 240 с. 4. Вишняков М. Г. Учет вида передаваемого сигнала в задачах исследования ближних полей антенн. Электродинамика и техника СВЧ, КВЧ и оптических частот, 2001, №3 (31). 5. Вишняков М. Г. Метод интегрального уравнения в частотно-пространственной области для исследования полей передающих средств систем связи с различными способами уплотнения каналов // Радиотехника. 2001. № 11.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 05.12.2005