

一种新型基站天线的非均匀网格 FDTD 分析¹

张 玉 梁昌洪

(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

摘要 板状振子型基站天线是一种现代移动通信中广泛使用的基站天线。为了比较准确地对其天线单元和槽形板进行建模，同时考虑到计算资源限制，该文应用一种非均匀网格 FDTD 方法对其辐射方向图特性进行了分析。数值结果表明该文方法处理天线辐射问题的有效性。

关键词 基站天线，非均匀网格 FDTD，方向图

中图号 TN820

1 引言

时域有限差分 (FDTD) 方法^[1] 已被广泛用于电磁散射问题的分析，也可用于研究具有复杂结构的天线辐射问题。应用 FDTD 方法不仅能方便地模拟各种具有复杂结构的天线，而且可以形象地描绘电磁波在天线及其附近的辐射过程，由此可加深对天线物理特性的认识，有助于天线的设计和改进；其次，FDTD 方法作为一种时域方法，只需一次计算便可获得很宽频带内天线的频域信息。

另一方面，工程实用问题 FDTD 模型常常要求较小的网格尺寸，较高的精度，以及较少的计算资源。应用传统的 FDTD 差分格式所能模拟的最小尺度不小于一个网格，若模拟的结构很小（如细导线，窄缝隙等），需要采用特殊网格处理技术。

本文应用 FDTD 方法对现代移动通信中广泛采用的一种板状振子型基站天线（见图 1）的辐射特性进行了分析。为了较好地模拟天线及其槽形板（其折上去的部分仅仅为 0.05 个波长），同时节省计算资源，我们使用了非均匀网格技术^[2]。第 2 节中我们详细的描述了本文采用的非均匀网格 FDTD 的公式及算法。第 3, 4 节给出天线特性的数值结果。

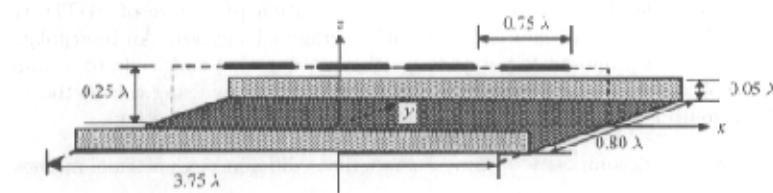


图 1 板型天线几何结构

2 非均匀网格 FDTD 算法

2.1 非均匀网格 FDTD

如图 2 所示，整个计算空间被分成细网格区域和粗网格区域，细网格区域常常用来对研究对象进行建模，而粗网格区域用于划分天线与吸收边界之间的空间。由于整个物体区域全部使用细网格，所以，具有复杂结构的细小天线也可以按照常用方式建模。模拟时，时间步长的选

¹ 2002-01-28 收到， 2002-07-05 改回

择取决于最小的网格尺寸。为了简单起见, 可以直接采用细网格尺寸决定的时间步长, 而不采用变化的时间步长。通过在物体与吸收边界之间使用与细网格成较大比例的粗网格, 可以使用较少的计算资源进行仿真。也可以仅仅对天线的馈电点和天线的边界附近使用细网格, 其余区域使用较粗的网格以减少计算资源。

使用非均匀网格 FDTD 时, 一个主要问题是由于相邻网格尺寸的变化引入了一阶误差项。因而研究如何处理粗细网格交界处的电磁场就很重要。为了避免由于网格尺寸变化造成的计算偏差, 在不同网格尺寸交界处需要进行插值处理, 本文介绍一种线性插值方法。

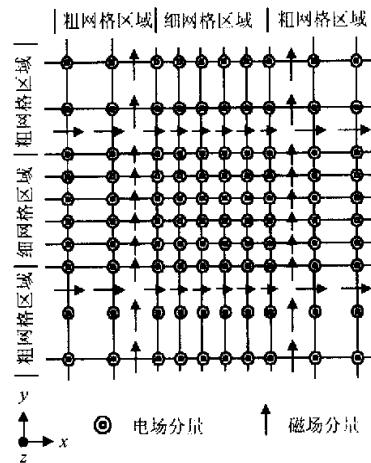


图 2 非均匀网格场分布示意

2.2 线性插值

首先, 在距离粗细网格交界面半个细网格尺寸距离处虚构一个磁场分量 $H'_y(I, J, K)$, 如图 3 所示。 $H'_y(I, J, K)$ 的值由 $H_y(I - 1, J, K)$ 和 $H_y(I, J, K)$ 分量由线性插值求出。在下半个时间步, 当我们要更新电场时, 粗细网格交界处的电场 $E_z(I, J, K)$ 由 $H_y(I - 1, J, K)$ 和虚构磁场 $H'_y(I, J, K)$ 求出。而与交界面相邻的场量 $E_z(I + 1, J, K)$ 和 $E_z(I - 1, J, K)$ 用原来各区域的磁场求出。通过这样处理, 由于网格位置错位造成的偏差就可以得到改善, 文献 [2] 对该插值方法的误差做了分析。

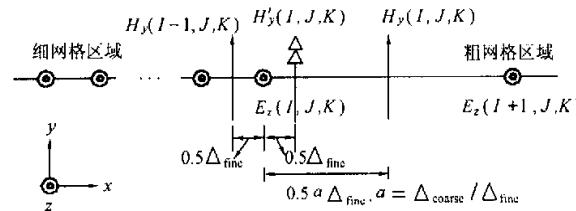


图 3 线性插值公式

由图 3, 可以推导出 $+x$ 方向虚构磁场的插值公式如下:

$$H'_y(I, J, K) = \frac{a-1}{a+1} H_y(I-1, J, K) + \frac{2}{a+1} H_y(I, J, K) \quad (1)$$

公式中 a 是两种网格尺寸的比值。同理, 在 3 维计算中可以求出需要的 $H'_z(I, J, K)$ 和 $H'_x(I, J, K)$, 下面给出 3 维情况下的各个交界面处不同场量的虚构磁场插值公式。

$$H'_x(I, 0, K) = B_y H_x(I, J-1, K) + A_y H_x(I, J, K) \quad -y\text{方向交界面} \quad (2-a1)$$

$$H'_x(I, 1, K) = A_y H_x(I, J-1, K) + B_y H_x(I, J, K) \quad +y\text{方向交界面} \quad (2-a2)$$

$$H'_x(I, J, 0) = B_z H_x(I, J, K-1) + A_z H_x(I, J, K) \quad -z\text{方向交界面} \quad (2-a3)$$

$$H'_x(I, J, 1) = A_z H_x(I, J, K-1) + B_z H_x(I, J, K) \quad +z\text{方向交界面} \quad (2-a4)$$

$$H'_y(0, J, K) = B_x H_y(I-1, J, K) + A_x H_y(I, J, K) \quad -x\text{方向交界面} \quad (2-b1)$$

$$H'_y(1, J, K) = A_x H_y(I-1, J, K) + B_x H_y(I, J, K) \quad +x\text{方向交界面} \quad (2-b2)$$

$$H'_y(I, 0, K) = B_z H_y(I, J, K-1) + A_z H_y(I, J, K) \quad -z\text{方向交界面} \quad (2-b3)$$

$$H'_y(I, 1, K) = A_z H_y(I, J, K-1) + B_z H_y(I, J, K) \quad +z\text{方向交界面} \quad (2-b4)$$

$$H'_z(0, J, K) = B_x H_z(I-1, J, K) + A_x H_z(I, J, K) \quad -x\text{方向交界面} \quad (2-c1)$$

$$H'_z(1, J, K) = A_x H_z(I-1, J, K) + B_x H_z(I, J, K) \quad +x\text{方向交界面} \quad (2-c2)$$

$$H'_z(I, 0, K) = B_y H_z(I, J-1, K) + A_y H_z(I, J, K) \quad -y\text{方向交界面} \quad (2-c3)$$

$$H'_z(I, 1, K) = A_y H_z(I, J-1, K) + B_y H_z(I, J, K) \quad +y\text{方向交界面} \quad (2-c4)$$

$$B_x = \frac{2}{a_x + 1}, \quad A_x = \frac{a_x - 1}{a_x + 1}, \quad B_y = \frac{2}{a_y + 1}$$

$$A_y = \frac{a_y - 1}{a_y + 1}, \quad B_z = \frac{2}{a_z + 1}, \quad A_z = \frac{a_z - 1}{a_z + 1}$$

公式中 a_x, a_y, a_z 是在 x, y, z 方向上两种网格尺寸的比值。

2.3 ABC 区域的非均匀网格处理

由于非均匀网格的使用, 使得在吸收边界区域也要进行特殊处理, 在 ABC 区域的非均匀网格分布情况如图 4 所示。如果采用 Mur 作为 ABC, 则要注意在两种不同的网格区域, 其网格分辨率不同。如果采用理想匹配层 (PML) 作为 ABC, 那么由于不同吸收层之间的网格尺寸是相同的, 所以, 不需要特殊处理。而在同一层上, 按照计算区域内部的求解方法求解。由于非均匀网格不会出现在 PML 的角形区域, 所以只要讨论 PML 区域的面和棱上的区域就可以了。在本文中, 将采用 PML 作为吸收边界条件。

2.4 FDTD 具体算法

由前, 利用线性插值的非均匀网格 FDTD 算法可以简单描述如下:

(1) 在 $T = n$ 时间步:

用标准 FDTD 迭代方程更新磁场。由粗细网格分界面两侧的磁场按照 (2) 式求出虚构磁场值。

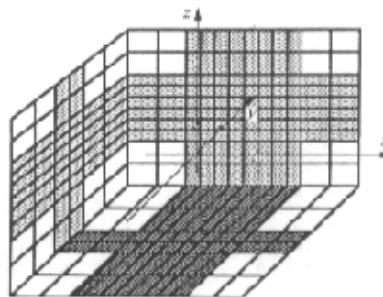


图 4 边界上的非均匀网格示意

处理磁场吸收边界条件(仅当用 PML 作为 ABC 时)。

(2) 在 $T = n + 1/2$ 时间步: 求解电场, 包括: 用细网格区域内的磁场和虚构磁场计算分界面处的电场; 其它处的电场用标准 FDTD 迭代方程求解; 处理电场吸收边界条件。

(3) 返回 (1)

限于篇幅, 本文不详述天线输入阻抗和近远场变换^[3]的处理方法。值得注意的是, 在求解输入阻抗时, 用细网格的尺寸进行磁场积分求馈电点处电流。

3 计算结果

为了验证这种非均匀网格 FDTD 算法和整个程序的有效性, 我们选取了两个例子进行了数值模拟。

3.1 方板上单极子天线辐射方向图特性

首先, 为了验证 FDTD 方法分析方向图特性的有效性, 分析了放置于边长为 1.22m 的有限大导电平板上, 工作频率为 1GHz 单极天线的辐射问题^[4], 得到了比较好的结果。计算用 5 层 PML 作为吸收边界。我们采用电压源馈电模型, 激励电压采用正弦稳态源的形式: $V(t) = \sin(2\pi f n \Delta t)$ 。方向图曲线见图 5。

3.2 单极天线输入阻抗特性研究

在前面的基础上, 我们对单极天线输入阻抗特性运用非均匀网格 FDTD 方法进行了数值模拟。采用高斯脉冲型激励源分析无限大地板上的单极子天线的输入阻抗特性, 图 6 的阴影部分

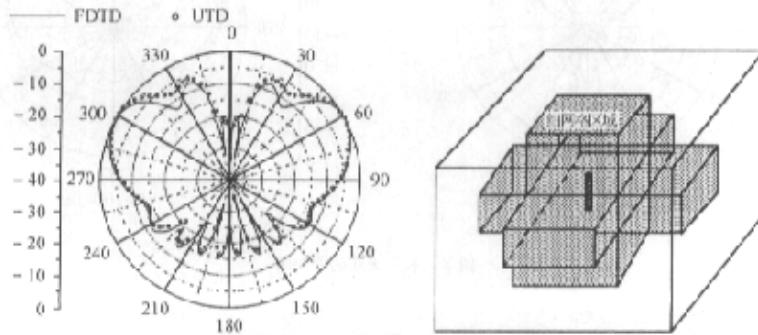


图 5 方形地平面上单极子的主平面方向图

图 6 计算区域示意图

给出了采用细网格的计算区域。采用电压源馈电模型,为了保证源的初始条件,即 $V(t=0) \rightarrow 0$,选取 $t_0 = 4T$,有 $V(t) = e^{-(t-\beta)^2/(\beta/4)^2}$,式中,我们选取 $\beta = 32$ 。

由图 7 可知,用这种非均匀网格方法分析天线输入阻抗特性,粗细网格比例为 4:1 以下都可以获得与全部细网格时比较一致的结果,这种方法节省了很大计算资源。

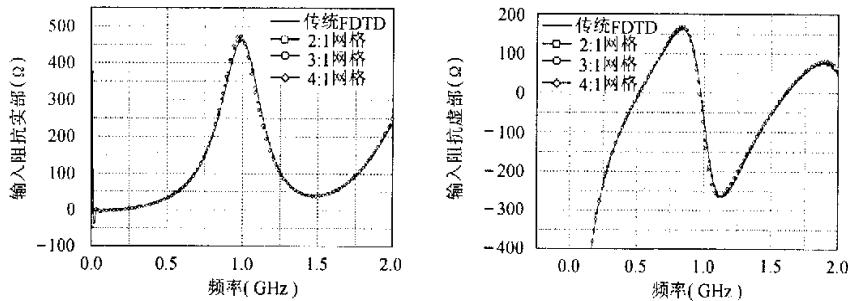


图 7 单极天线输入阻抗特性

4 振子型板状基站天线的非均匀网格 FDTD 分析

我们用前述方案对图 1 中的板型天线辐射特性进行了数值模拟。为了较好地模拟槽形板的结构,我们采用 2:1 网格比例,在板和天线构成的区域取比较小的网格尺寸。

图 8 给出了板型天线的方向图特性,同时还给出了采用 NEC^[5] 分析(用线栅模型代替薄的槽形板)所得的结果。可见,在槽形板上方,两种结果是非常吻合的,而在槽形板下方,矩量法线栅模型计算的结果比 FDTD 结果偏大。

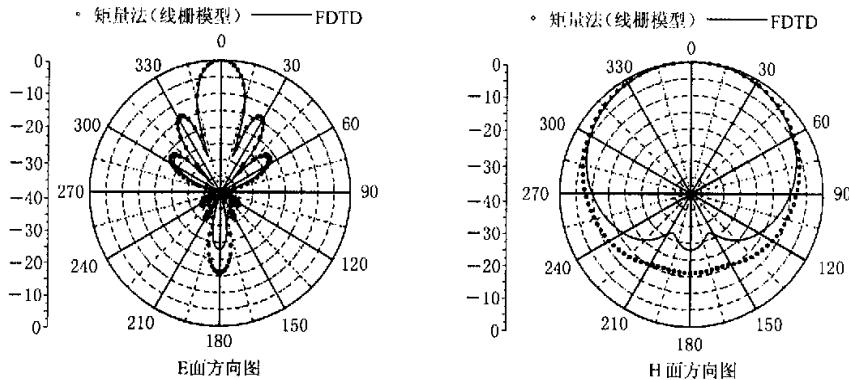


图 8 板型天线的方向图

5 结 论

本文应用非均匀网格 FDTD 方法分析了放置于无限大理想导体地面上的线天线的输入阻抗特性，并对一种振子型板状基站天线的辐射特性做了数值计算，数值结果表明该方法处理天线问题的有效性。可以预料，该方法在含有细小结构的天线阵列的分析中将有着重要的实用前景。

参 考 文 献

- [1] K. S. Yee , Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, IEEE Trans. on AP, 1966, 14(5), 302-307.
- [2] Jiang Huiling, Analysis of computation error in antenna's simulation by using non-uniform mesh FDTD, IEICE Trans., E00-A, No.1 January 1998, 1-9.
- [3] R. Luebbers, L. Chen, T. Uno, S. Adachi, FDTD calculation of radiation patterns, impedance, and gain for monopole antenna on a conducting box, IEEE Trans. on AP, 1992, 40(11), 1577-1583.
- [4] 汪茂光, 几何绕射理论, 西安, 西安电子科技大学出版社, 1994, 70-71.
- [5] Jian Peng, A. Balanis, NEC and ESP codes: Guidelines, limitations, and EMC applications, IEEE Trans. on EMC, 1993, 35(2), 124-133.

ANALYSIS OF A NOVEL BASE STATION ANTENNA WITH NON-UNIFORM FDTD

Zhang Yu Liang Changhong

(School of Electronic Eng., Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract The dipole antenna array with trough reflector is widely applied to base stations for mobile communications. In order to simulate the antenna units and the trough reflector accurately and take the limitation of computation resources into account, this paper employs a kind of non-uniform FDTD algorithm in analyzing the radiation pattern. The numerical results show the effectiveness of this algorithm for antenna problems.

Key words Base station antenna, Non-uniform FDTD, Radiation pattern

张玉：男，1978 年生，博士生，主要感兴趣的领域为：缝隙阵分析与设计、电磁兼容分析、电磁场数值并行计算等。

梁昌洪：男，1943 年生，教授，博士导师，曾任西安电子科技大学校长，中国电子学会会士、IEEE Senior member 等职。研究方向包括计算场论、计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等方面。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>