

Doi:10.3969/j.issn.1003-5060.2012.05.019

等效偶极矩法分析金属天线电磁辐射特性研究

胡 庆¹, 高 荣², 肖 琴³, 袁家德⁴

(1. 成都大学 电子信息工程学院, 四川 成都 610106; 2. 成都电子机械高等专科学校 机械工程系, 四川 成都 611730; 3. 中国电子技术标准化研究院 DPA 实验室, 北京 100176; 4. 福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350108)

摘要:文章用等效偶极矩方法分析金属天线的电磁辐射特性。以矩量法和 RWG 基函数为基础, 金属天线被剖分成一定数量的三角形网格。把三角形面元对等效成电偶极子模型, 当 2 个电偶极子模型之间的距离大于某一临界距离时, 两三角形面元对之间的作用(采用一点数值积分时需 4 次计算)等效为两电偶极子之间的作用(仅需 1 次计算)。等效偶极矩法简单、易操作, 数值结果表明了该方法与原方法几乎相同的计算精度。

关键词:矩量法; 电磁辐射; 金属天线; 等效偶极矩法

中图分类号: TN820.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-5060(2012)05-0648-04

Analysis of electromagnetic radiation characteristics of metal antenna using equivalent dipole-moment method

HU Qing¹, GAO Rong², XIAO Qin³, YUAN Jia-de⁴

(1. School of Electronic and Information Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China; 2. Dept. of Mechanical Engineering, Chengdu Electromechanical College, Chengdu 611730, China; 3. DPA Laboratory, China Electronics Standardization Institute, Beijing 100176, China; 4. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Electromagnetic radiation characteristics of metal antenna are analyzed using the equivalent dipole-moment method. The proposed method is based on the conventional method of moments (MoM) and the Rao-Wilton-Glisson(RWG) basis function, in which each RWG common face element is viewed as a dipole model. The action between two triangular face elements is calculated by the action between two dipoles when the distance between the equivalent dipole element and the observation point is beyond a critical distance(only calculated for once instead of four times by using numerical integration). The dipole model method is easy to operate, and the numerical results show the nearly same computational accuracy compared with conventional MoM.

Key words: method of moments(MoM); electromagnetic radiation; metal antenna; equivalent dipole-moment method

0 引言

在金属天线电磁辐射特性的数值方法中, 时域有限差分法(FDTD)可用来分析此类问题, 但需要构造吸收边界以及对细导线、馈源进行特殊处理。基于积分方程方法的矩量法(MoM)能够准确分析各类金属天线问题。采用矩量法分析可

以很好地解决线天线与金属面的连接问题, 将细线天线用带状线进行模拟^[1], 导体面和带状线均采用平面三角形单元剖分和 RWG 基函数作电流展开函数, 将线面连接问题转化为面面连接问题, 给分析和计算带来了很大的方便。

采用传统矩量法进行数值求解时, 在计算机内存占用量和计算量 2 个方面都存在不可逾越的

收稿日期:2011-10-14;修回日期:2011-11-05

基金项目:四川省教育厅自然科学基金资助项目(11ZB278);成都大学青年自然科学基金资助项目(2010XJZ16)

作者简介:胡 庆(1977—),女,四川梁平人,成都大学讲师。

困难^[2], 近年来, 以矩量法为基础的快速计算成为研究热点之一。已发展的快速算法有: 预校正-快速傅里叶变换(P-FFT)^[3]、快速多极子方法(FMM)及多层快速多极子方法(MLFMM)^[4]、共轭梯度-快速傅里叶变换方法(CG-FFT)^[5-6]、自适应积分方法(AIM)^[7]、特征基函数方法(CBFM)^[8]等。

等效偶极矩方法是一种加速矩量法中阻抗矩阵元素填充的新技术。该方法优点是: 编程简单方便, 易于与传统矩量法软件集成; 与其他快速算法结合, 能进一步提高分析电大目标介质体的电磁散射能力。本文运用该方法分析了金属天线的电磁辐射特性, 并通过具体的算例说明了该方法的有效性以及计算精度与传统矩量法相当。

1 理论分析

1.1 电场面积分方程的矩量法

考虑任意形状的理想导体。运用等效性原理, 理想导体用等效面电流 \mathbf{J}_s 代替, 并置在自由空间中, 因此在后面的公式中使用的格林函数都是自由空间的标量格林函数, \mathbf{J}_s 在自由空间中产生的散射电场为 $\mathbf{E}_s^s(\mathbf{r})$ 。根据边界条件, 在理想导体表面 S 上, 总的电场切向分量为 0, 即

$$(\mathbf{E}^i(\mathbf{r}) + \mathbf{E}_s^s(\mathbf{r}))|_{\text{tan}} = 0, \mathbf{r} \in S \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{E}_s^s(\mathbf{r}) = -j\omega \mathbf{A}_s(\mathbf{r}) - \nabla \varphi_s(\mathbf{r}) \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{A}_s(\mathbf{r}) = \mu_0 \int_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') dS' \quad (3)$$

$$\varphi_s(\mathbf{r}) = \frac{1}{\epsilon_0} \int_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \rho_s(\mathbf{r}') dS' \quad (4)$$

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \quad (5)$$

其中, $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 为标量格林函数; k 为波数, \mathbf{r}, \mathbf{r}' 分别为观察点和源点的位置矢量。把(2)~(4)式代入(1)式, 并考虑电流连续性方程

$$\nabla' \cdot \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') = -j\omega \rho_s(\mathbf{r}') \quad (6)$$

可得到电场面积分方程为:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) &= j\omega \mu_0 \int_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') dS' - \\ &\quad \nabla \frac{1}{j\omega \epsilon_0} \int_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \nabla' \cdot \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') dS' \end{aligned} \quad (7)$$

使用 RWG 基函数 $f_n(\mathbf{r}')$, 将面电流 $\mathbf{J}_s(\mathbf{r}')$ 展开为:

$$\mathbf{J}_s(\mathbf{r}') = \sum_{n=1}^{N_s} I_n f_n(\mathbf{r}') \quad (8)$$

其中, I_n 表示第 n 个基函数的复系数; N_s 为理想导体剖分的三角形面元的公共边总数, 注意 N_s 不包括开放边界的棱边。把(8)式代入(7)式, 采用伽略金法, 两边对权函数 $f_m(\mathbf{r})$ 取内积, 经整理后得:

$$\sum_{n=1}^{N_s} Z_{m,n} I_n = V_n, m = 1, 2, \dots, N_s \quad (9)$$

其中

$$Z_{m,n} = -\langle \mathbf{E}_s^s(\mathbf{r}), \mathbf{f}_m(\mathbf{r}) \rangle \quad (10)$$

$$V_n = \delta_n = \begin{cases} 1, & \text{源所在位置;} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$\mathbf{E}_s^s(\mathbf{r})$ 为基函数 $f_n(\mathbf{r}')$ 产生的散射电场。

1.2 等效偶极子模型法

公共边长为 l_n 的 2 个相邻三角形面元 T_n^\pm 构成的第 n 个面元对, 如图 1 所示。

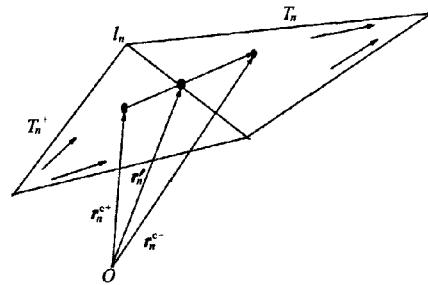


图 1 第 n 公共边及对应的三角形面元对结构示意图

用偶极子模型来等效通过公共边 l_n 的面电流分布, 其等效电偶极子的偶极矩 \mathbf{m} 可表示为^[9]:

$$\mathbf{m} = \int_S \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') dS' = I_n \mathbf{m}_n \quad (12)$$

其中, \mathbf{m}_n 为第 n 个偶极子模型对应的偶极矩, 即

$$\mathbf{m}_n = l_n (\mathbf{r}_n^c - \mathbf{r}_n^{c+}), \quad T_n^\pm \in S \quad (13)$$

其中, \mathbf{r}_n^c 、 \mathbf{r}_n^{c+} 分别表示标号为 n 的公共边所对应的 T_n^- 、 T_n^+ 的质心位置矢量。将文献[9]中电偶极矩的表达式结合(12)式、(13)式, 得等效电偶极矩 \mathbf{m}_n 产生的电场表达式为:

$$\mathbf{E}_n(\mathbf{r}) = \frac{\eta}{4\pi} \left[(M_n - m_n) \left(\frac{ik}{R} + C \right) + 2M_n C \right] e^{-jkr} \quad (14)$$

其中

$$C = \frac{1}{R^2} \left[1 + \frac{1}{jkR} \right] \quad (15)$$

$$M_n = \frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{m}_n) \mathbf{R}}{R^2} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$; $R = |\mathbf{R}|$, η 和 k 分别为自由空间

的波阻抗和波数。(14)式是精确的表达式,没有作任何的近似,该式在电偶极子的近场和远场都成立。但是,根据偶极子的特性,若观察点离偶极子模型的距离小于某一阈值时,这时就不能把三角形面元对看做是偶极子模型,从而(14)式也就不再成立,这时仍需用传统的矩量法计算对应的阻抗矩阵元素 $Z_{m,n}$,此外可用等效偶极矩法计算 $Z_{m,n}$ 。仿真经验表明,通常情况下偶极子中心到场点的距离大于 $0.15\lambda_0$ 时(λ_0 是自由空间的波长),计算精度较高。

把(14)式应用于矩量法,进一步整理可得含电偶极矩的矩量法阻抗矩阵元素表达式,详细过程参照文献[9]。传统矩量法计算1个矩阵元素需要4次计算,而当把三角形面元对等效成2个电偶极子模型时,计算1个矩阵元素仅需要1次计算,从而可以节省矩阵填充时间。

2 数值实验结果分析

算例1 研究了半波偶极子的电流分布。如图2所示, $a=1$ m, 天线工作频率 $f=75$ MHz, 天线被剖分成84个三角形, 馈源位于天线的中心。

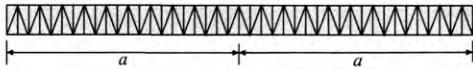


图2 半波偶极子天线结构示意图

分别用传统矩量法、等效偶极矩方法计算了图2中半波偶极子表面的电流分布,如图3所示。为了验证本文所用矩量法程序的正确性,把数值结果与文献[10]中的计算结果做了比较。从图3中可以看出,3种方法的计算结果吻合较好,表明用等效偶极矩方法分析金属天线的辐射特性可保持较高的计算精度。

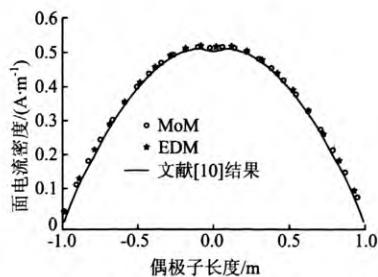


图3 偶极子天线表面电流分布

算例2 单极子天线的辐射特性。图4a为

单极子天线辐射模型,它是由穿过接地面的同轴线实现非平衡馈电的,该馈电方式类似于微带天线的同轴线馈电。

对于单极子天线与地面相交的结合边,如图4b所示,有3个三角形(标号分别为1、2、3)与之相连。因此,对应同一个边会有2个RWG元,即标号1、3和2、3。

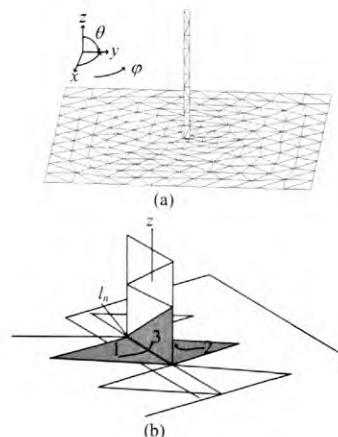


图4 天线模型

目标体为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 接地面上 1 m 长单极子天线,被剖分成1 028个三角形单元,产生1 495个未知量。分别用矩量法和等效偶极矩方法计算了天线在工作频率 $f=75$ MHz时的E面辐射增益方向图,如图5所示,可以看出,结果吻合得非常好。矩量法阻抗矩阵填充时间,传统MoM需要68.9 s,而加入EDM方法后仅需18.0 s,表明EDM方法具有较高的计算效率。

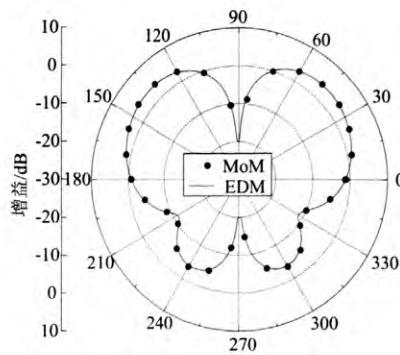


图5 单极子天线的辐射方向图

算例3 微带贴片天线的辐射特性。微带天线的同轴馈电模型如图6所示,微带天线介

质厚度为 0.05 m, 馈线宽度为 0.016 m, 馈线中点坐标 $(x, y) = (0.1, 0.166)$ 。

分别用传统矩量法和等效偶极矩方法计算了天线的反射系数(S_{11})和在 yoz 面上的辐射增益方向图, 如图 7 所示, 谐振频率约为 $f = 380$ MHz, 图 8 给出了本文方法在 $f = 380$ MHz 时计算的辐射增益方向图, 可以看出, 2 种方法的计算结果吻合得较好。金属目标体被剖分成 326 个三角形单元, 产生 453 个未知量。填充 1 次阻抗矩阵, 传统 MoM 需要 21.3 s, 而加入 EDM 方法后仅需 7.9 s。

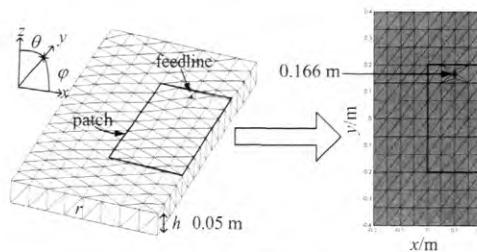


图 6 微带天线示意图

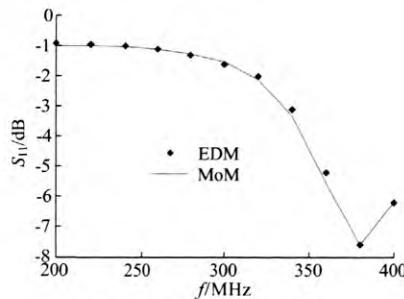


图 7 空气介质微带天线的 S_{11}

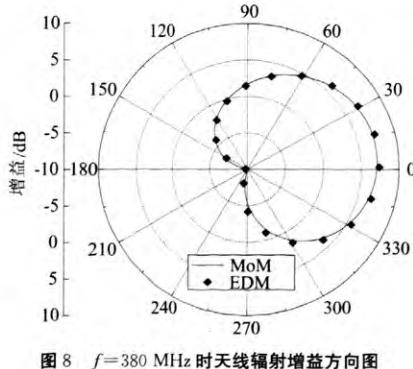


图 8 $f = 380$ MHz 时天线辐射增益方向图

3 结束语

本文在矩量法的基础上, 用等效偶极矩方法分析了金属天线的电磁辐射特性。把单极子与

地面相交的结合边处的电流等效成 2 个偶极子模型, 实现了等效偶极矩方法对金属天线表面电流、反射系数及辐射方向图等参量的精确计算。等效偶极矩法能大幅度减少矩量法中阻抗矩阵填充的计算量, 提高矩量法的计算效率; 不足之处是不能节省计算机内存需求。等效偶极子模型法适合与其他快速算法混合使用, 对进一步提高分析电大目标介质体电磁散射特性的能力是有益的。

[参考文献]

- [1] Bekker V, Seemann K, Leiste H. A new strip line broadband measurement evaluation for determining the complex permeability of thin ferromagnetic films [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 270 (3): 327–332.
- [2] 吴萍, 陈俊奇. 基于高阶叠层矩量法的二维导体宽频带计算[J]. 合肥工业大学学报, 自然科学版, 2011, 34 (5): 705–708, 738.
- [3] Okhmatovski V, Yuan M, Jeffrey I, et al. A Three-dimensional precorrected-FFT algorithm for fast method of moments solutions of the mixed-potential integral equation in layered media [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(12): 3505–3517.
- [4] Vande G D, Michielssen E, Olyslager F, et al. A High-performance upgrade of the perfectly matched layer multilevel fast multipoles algorithm for large planar microwave structures [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(6): 1728–1739.
- [5] Wang C F, Xia L, Li L W, et al. BCG-FFT analysis of microstrip structure in multilayered media [C]//Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2001: 212–215.
- [6] Sarkar T K, Arvas E, Rao S M. Application of FFT and the conjugate gradient method for the solution of electromagnetic radiation from electrically large and small conducting bodies [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(5): 635–640.
- [7] 胡俊, 王晓峰, 聂在平, 等. 三维目标电磁散射的自适应积分方法[J]. 电波科学学报, 2007, 22(4): 614–618.
- [8] Yeo J, Prakash V S, Mittra R. Efficient analysis of a class of microstrip antennas using the characteristic basis function method (CBFM) [J]. Microwave and Optical Technology Letter, 2003, 39(6), 456–464.
- [9] Jiade Y, Changqing G, Guodong H. Efficient generation of method of moments matrices using equivalent dipole-moment method [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 716–719.
- [10] Makarov S N. Antenna and EM modeling with MATLAB [M]. New York: John Wiley & Sons, 2002: 63–65.

(责任编辑 何晓雄)

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>