

# 天线与天线罩的矩量法严格建模分析

包云朕 徐晓文 何 芒 路志勇

(北京理工大学信息科学技术学院 北京 100081)

**摘要** 传统计算天线罩对天线性能的影响,是基于天线的辐射场已知的条件下进行的。这样的计算没有考虑天线罩对天线本身电流分布的影响,尤其当天线罩位于天线近场区域的时候,这样的建模方式将带来严重的误差。利用等效原理和矩量法(MoM)对天线和天线罩进行了严格建模,并研究了天线罩对天线电流及辐射特性的影响。数值计算结果与相关参考文献的结果吻合良好。

**关键词** 天线 天线罩 矩量法

**中图分类号** TN82 **文献标识码** A **文章编号** 1003-3114(2005)05-0078-01

## 1 引言

天线罩可以保护天线免受自然环境影响,延长设备的使用寿命、提高设备的可靠性,但这层介质罩对天线所产生电磁场的反射和吸收,将会使天线电气性能发生改变。如何严格分析天线罩对天线电气性能的影响一直是人们关心的重要课题之一。

目前,分析天线罩问题的方法有多种,高频的计算方法主要有:矢量口径积分-表面积分法(AI-SI)和平面波谱-表面积分方法(PWS-SI)<sup>[1]</sup>,它们是以物理光学理论(PO)为基础,在高频端(电大尺寸情形)是计算天线罩的一类较为成熟的方法,其主要特点是物理概念明确,简便易实现,主要缺陷则是只适用于电尺寸较大且表面曲率半径远大于工作波长的情形,而对中小电尺寸问题误差将急剧增大。

低频端(中小电尺寸情形)计算天线罩的方法主要有矩量法(MoM)、时域有限差分法(FDTD)和有限元法(FEM)。以 MoM 为代表的积分方程法可将计算空间限定在目标(如天线罩和天线)表面,与微分方程法相比可相对节约计算空间;而且矩量法可以和快速多极子等加速算法完美结合,也是矩量法的优点之一。

公开发表的文献使用矩量法计算天线罩,都只对天线罩本身建模。而本文利用表面积分方程结合矩量法对天线与天线罩进行严格建模分析。

对天线和天线罩表面电磁流全部采用 RAO 提出的三角贴片函数作为基函数展开<sup>[2]</sup>,采用伽略金法,得到阻抗矩阵,求解即可得各表面的电磁流。

## 2 理论分析

对于任意形状的天线和天线罩,我们都可以用图 1 所示模型表示。天线表面为  $S_1$ ,介质的内外表面分别为  $S_2$  和  $S_3$ ,按介质的不同,分为 3 个区。

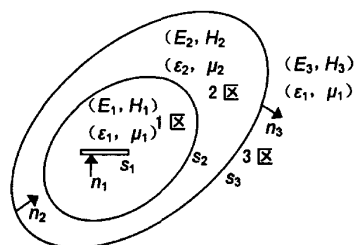


图1 天线和天线罩一体化建模的等效模型

设天线的  $S_1$  面上待求的电流分布为  $\vec{J}_1$ ,罩的内壁  $S_2$  上待求的电流和磁流分布分别为  $\vec{J}_2$  和  $\vec{M}_2$ ,罩的外壁  $S_3$  上待求的电流和磁流分布分别为  $\vec{J}_3$  和  $\vec{M}_3$ 。由等效原理和边界条件,可以得到含有上述 5 种未知数的方程如下:

$$[\vec{E}_1(\vec{J}_1) + \vec{E}_2(\vec{J}_2, \vec{M}_2)]_{1tan} = \vec{E}_{1tan}, \quad (1)$$

$$[\vec{E}_1(\vec{J}_1) + \vec{E}_2(\vec{J}_2, \vec{M}_2) + \vec{E}_2(\vec{J}_2, \vec{M}_2) + \vec{E}_3(\vec{J}_3, \vec{M}_3)]_{2tan} = 0, \quad (2)$$

$$[\vec{H}_1(\vec{J}_1) + \vec{H}_2(\vec{J}_2, \vec{M}_2) +$$

$$\vec{H}_2^2(\vec{J}_2, \vec{M}_2) + \vec{H}_3^2(\vec{J}_3, \vec{M}_3)_{2\text{tan}} = 0, \quad (3)$$

$$[\vec{E}_2^2(\vec{J}_2, \vec{M}_2) + \vec{E}_3^2(\vec{J}_3, \vec{M}_3) + \vec{E}_3^3(\vec{J}_3, \vec{M}_3)]_{3\text{tan}} = 0, \quad (4)$$

$$[\vec{H}_2^2(\vec{J}_2, \vec{M}_2) + \vec{H}_3^2(\vec{J}_3, \vec{M}_3) + \vec{H}_3^3(\vec{J}_3, \vec{M}_3)]_{3\text{tan}} = 0. \quad (5)$$

式中:  $\vec{E}_{1\text{tan}}^i$  表示天线的激励场,  $\vec{E}_3^2(\vec{J}_3, \vec{M}_3)$  表示  $S_3$  上的电流  $\vec{J}_3$  和磁流  $\vec{M}_3$  在 2 区的电场, 下脚标 1tan 表示场在  $S_1$  上的切向分量, 其他的表示依此类推。式(1)~(5)可展开为:

$$\vec{E}_i^v(\vec{r}) = -j\omega\vec{A}_i^v(\vec{r}) - \nabla V_i^v(\vec{r}) - \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \vec{F}_i^v(\vec{r}), \quad (6)$$

$$\vec{H}_i^v(\vec{r}) = -j\omega\vec{F}_i^v(\vec{r}) - \nabla U_i^v(\vec{r}) + \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}_i^v(\vec{r}), \quad (7)$$

$$\vec{A}_i^v(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{S_i} \vec{J}_s \frac{e^{-jk_v R}}{R} dS', \quad (8)$$

$$V_i^v(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{S_i} \rho_s^v \frac{e^{-jk_v R}}{R} dS', \quad (9)$$

$$\vec{F}_i^v(\vec{r}) = \frac{\epsilon}{4\pi} \int_{S_i} \vec{M}_s \frac{e^{-jk_v R}}{R} dS', \quad (10)$$

$$U_i^v(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\mu} \int_{S_i} \rho_s^m \frac{e^{-jk_v R}}{R} dS'. \quad (11)$$

其中, 标号  $s=1, 2, 3$  和  $v=1, 2, 3$  分别为表面标号和区域标号。基函数定义如下: 设公共边的函数为  $f_n(\vec{r})$ , 且在各三角形中电荷密度为 1 个常数, 则有:

$$f_n(\vec{r}) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \rho_n^+, & \vec{r} \text{ 在 } T_n^+ \text{ 中} \\ \frac{l_n}{2A_n^-} \rho_n^-, & \vec{r} \text{ 在 } T_n^- \text{ 中} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

这样, 所有表面上的电磁流均可以近似表示为如下形式:

$$\vec{J}_l \approx \sum_{n=1}^{N_l} I_n \vec{f}_n(\vec{r}) \quad (l=1, 2, 3), \quad (13)$$

$$\vec{M}_k \approx \sum_{n=1}^{N_k} M_n \vec{f}_n(\vec{r}) \quad (k=2, 3). \quad (14)$$

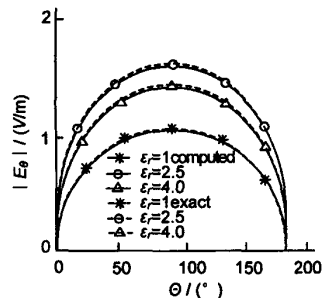
然后, 选择与基函数相同的权函数(即采用 Galerkin 法), 与方程(1)至(5)做内积运算可得到如下矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} [Z_{11}] \cdot [Z_{12}] \cdot [C_{12}] \cdot [Z_{13}] \cdot [C_{13}] \\ [Z_{21}] \cdot [Z_{22}] \cdot [C_{22}] \cdot [Z_{23}] \cdot [C_{23}] \\ [D_{21}] \cdot [D_{22}] \cdot [Y_{22}] \cdot [D_{23}] \cdot [Y_{23}] \\ [Z_{31}] \cdot [Z_{32}] \cdot [C_{32}] \cdot [Z_{33}] \cdot [C_{33}] \\ [D_{31}] \cdot [D_{32}] \cdot [Y_{32}] \cdot [D_{33}] \cdot [Y_{33}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_1] \\ [I_2] \\ [M_2] \\ [I_3] \\ [M_3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V_1] \\ [0] \\ [0] \\ [0] \\ [0] \end{bmatrix}. \quad (15)$$

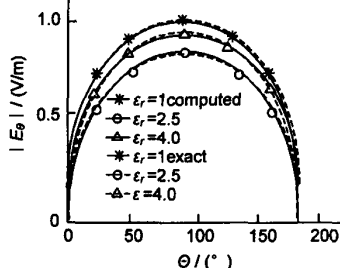
其中  $[V_1]$  表示天线激励场与权函数的内积结果。另外, 系数矩阵中子矩阵的下标表示其大小, 如  $Z_{21}$  为  $N_2 \times N_1$  的矩阵,  $N_2$  是表面  $S_2$  的公共边数,  $N_1$  是表面  $S_1$  的公共边数, 其他依此类推。解矩阵方程(15)可直接得到各个表面的电磁流, 而其他电气参量可利用求得的电磁流进一步求解得到。

### 3 数值结果和讨论

首先考虑如下沿  $z$  向放置的带罩赫兹电偶极子, 其中天线罩为球壳, 罩的壁厚 0.1 波长, 天线位于该球形罩的中心。辐射方向图的数值仿真结果如图 2 所示。其中图 2(a)为当介质罩内壁半径为 0.5 波长, 介电常数分别为 1.0、2.5 和 4.0 时的结果, 而图 2(b)为罩的内壁半径变为 0.9 波长时的相应结果。图中将本文计算结果与文献[3]中给出的结果进行了比较, 取得了很好的一致性, 证明了本文理论分析与数值模型的正确性。



(a) 球内半径为 0.5 波长



(b) 球内半径为 0.9 波长

图 2 通过球形罩电偶极子的远场方向图

(下转第 29 页)

之间的交互,促进无处不在的融合通信、计算、信息采集(传感器等)和存储等各种应用于一体的新一代信息环境的发展。

## 4 结束语

随着 IEEE 802.11 系列标准引发笔记本电脑无线上网的巨大市场,虽然其支持的 Ad hoc 工作模式还具有速率低等不足,但从市场角度来分析,目前已有多家厂商推出了基于 802.11 的 VoIP 等产品,这对传统的蜂窝移动通信市场产生的冲击和激烈竞争,将是本文提出的 IAIN 在 4G 中发展应用的一个重要的推动力。

本研究表明,应用这种新型的自组织、低成本

的集成 Ad hoc 与基础设施网络方法,可以为 4G 设计一个分布式、可扩展的、高可靠的新型宽带信息网格平台。该平台将支持宽带多媒体等多种业务,提供多种选择来实现网络性能和工程成本之间的优化。

### 参考文献

- [1] P. Gupta, P. R. Kumar. The capacity of wireless networks [J]. IEEE Trans. Information Theory, 2000, 46 (2): 388 ~ 404.
- [2] Matthias Grossglauser, David Tse. Mobility Increases the capacity of Ad-hoc wireless networks [C]. In Proc. 20th IEEE INFOCOM Conf., Anchorage, Alaska, 2001. 4, 3: 1360 ~ 1369.

(上接第 15 页)

然后考虑如下带罩天线结构:天线罩为绕长轴旋转的旋转椭球,罩的内壁长轴为  $1.0\lambda$ ,短轴为  $0.56\lambda$ ;罩的外壁长轴为  $1.2\lambda$ ,短轴为  $0.66\lambda$ 。天线为半波振子,沿着椭球的长轴中心对称放置,天线直径设为  $0.001\lambda$ ,中心为理想  $\delta$  源激励。

图 3 给出了与上例相同结构的带罩对称振子天线表面电流和辐射方向图随天线罩介电常数变化的数值仿真结果,其中图 3(a)表示天线表面电

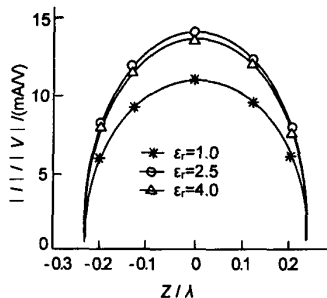
流变化,而图 3(b)则表示加罩后天线方向图的变化。由图 3 可能看出,天线罩对半波振子天线表面电流和辐射方向图特性均具有较大的影响,例如在本例当中,加罩后天线电流幅度明显上升,而 E 面辐射方向图的最大值也显示出明显下降,且其 3 dB 波瓣宽度明显变宽。

## 4 结束语

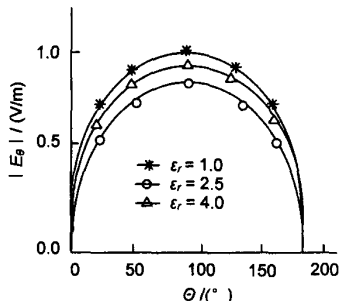
本文利用表面积分方程结合矩量法对天线与天线罩进行了严格建模分析。通过对比公开发表的文献结果,取得了很好的一致性,从而证明了理论分析与数值模型的正确性。通过严格理论分析和数值仿真,结果表明,天线罩位于天线附近时,其媒质特性参数的变化对天线的电流分布和辐射方向图均会产生显著影响,此时传统的高频光学近似以及将天线与天线罩分别建模分析的有关理论和方法都会产生严重误差。

### 参考文献

- [1] 杜耀惟. 天线罩电信设计方法 [M]. 北京:国防工业出版社, 1993.
- [2] S. M. Rao, D. R. Wilton and A. W. Glisson. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape [J]. IEEE Trans. Ant. and Prop., 1982, 30: 409 ~ 418.
- [3] E. Arvas, A. Rahhalari, U. pekeli, E. Gundogan. Electromagnetic transmission through a small radome of arbitrary shape [J]. IEE Proceedings H, 1990, 137: 401 ~ 405.



(a) 随着介电常数变化,表面电流变化



(b) 随着介电常数变化,加罩后方向图的变化

图 3 半波天线加罩后各参数的变化

## 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](http://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](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、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](http://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>