

# 有限导体地面上的圆锥单极子天线

郭景丽, 刘其中, 周 斌

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 本文利用矩量法分析任意形状导体地面上的线栅型圆锥单极子天线. 文中对面结构选用三角形面元矢量基函数, 对细线结构选用三角基函数, 对线面结合处采用一种特殊的基函数, 将导体地面和天线作为整体进行分析, 大大提高了分析计算的精度. 最后, 以圆形和方形地面为例, 分析了一副 400MHz~2100MHz 的圆锥单极子天线, 其数值计算结果与实验结果吻合良好, 表明了有限地面对天线阻抗匹配的重要性和本文方法的有效性.

**关键词:** 圆锥单极子天线; 导体地面; 矩量法; 面元矢量基函数

**中图分类号:** O441 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 03-0560-03

## Conical Monopole Antennas on Finite Ground Planes

GUO Jing-li, LIU Qi-zhong, ZHOU Bin

(National Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Wire conical monopole antennas at an arbitrarily conducting ground plane are analyzed by the Method of Moment (MM). The basis function presented by RWG is used to present the current on the surfaces. The triangular basis function is used to present the current on the wires, and a special basis function is used to present the current on the wire/surface junctions. Finally, as an example, conical antennas on a circular and a square ground plane in 400MHz~2100MHz frequency band are analyzed respectively. Numerical results and comparisons show the efficiency of the method and the finite ground plane plays an important role in adjusting the impedance matching.

**Key words:** conical monopole antennas; arbitrarily conducting ground plane; method of moment; triangular basis function

## 1 引言

随着军事保密通信技术中的跳频扩频技术的快速发展, 宽带天线的研制越来越迫切. 展宽天线工作带宽的方法多种多样, 其中之一是采用较大锥角的圆锥天线. 所谓圆锥单极子天线就是用倒立的圆锥代替直立在地面上的导线而成的天线. 当这种圆锥天线的锥角比较大时, 便具有良好的宽频带特性<sup>[1]</sup>. 一般的圆锥天线是由金属圆锥体或圆锥面构成, 为了减轻天线的重量及易于工程制作, 也常采用导线栅来代替圆锥的导体面, 即所谓的线栅型圆锥天线.

1979年, Smith等人首次分析了线栅型双锥天线的一些特性<sup>[2]</sup>. 九十年代, Austin等人讨论了距离地面的高度对双锥天线的影响<sup>[3]</sup>, 而Givati等人用电磁场计算软件NEC详细研究了锥角, 线栅根数以及线栅半径对天线电特性的作用<sup>[4]</sup>. 这些方法对于分析双锥天线或是无限大导体地面上的圆锥单极子天线来说是可行的. 但通常, 天线都是位于一定的载体上的. 对于放置于有限大导体地面上的圆锥单极子天线来说, 地面的外边缘将产生各个方向的绕射, 从而改变按无限大地面计算的圆锥单极子天线上的电流分布和地面上的电流分布. 这样, 忽略有限尺寸导体地面对圆锥单极子天线电特性的影响,

这显然是有较大误差的.

本文利用矩量法分析任意形状导体地面上的圆锥单极子天线. 对面结构, 细线结构及线面结合处, 分别选用三种不同的三角形类型基函数. 着重处理了多线段相连的电流连续性问题, 文中将计算结果与实验结果作了比较, 充分说明了本文方法的有效性.

## 2 理论分析

### 2.1 分析模型

参看图1所示的线栅模型圆锥单极子天线结构, 圆锥天线放置于完全导体地面上. 圆锥面由线栅条组成, 图中圆锥顶端圆圈的半径为 $b$ , 圆锥的半锥角为 $\theta_0$ , 圆锥高度为 $h$ , 组成锥面的导线的半径为 $a$ , 根数为 $M$ .

三角形面元由于

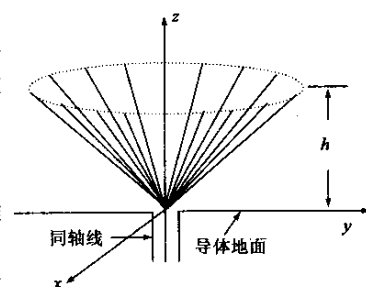


图1 线栅模型圆锥单极子天线

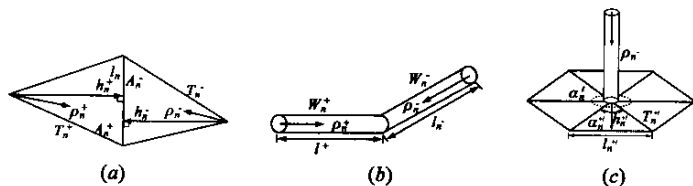


图 2 (a) 三角形面元矢量基函数; (b) 分段三角基函数; (c) 线面结合处的基函数

其灵活性在分析任意形状物体的电磁问题中有着不可替代的优越性<sup>[5]</sup>。本文对于面结构采用三角形面元分割,对于细线结构采用直线分段。

## 2.2 基函数和阻抗矩阵

众所周知,在矩量法计算中,基函数的选取至关重要,下面给出不同结构所用基函数。

对面结构,选用 RWG 所提出的三角形面元矢量基函数,如式(1)所示。

$$f_n^s(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \rho_n^+, & \mathbf{r} \in T_n^+ \\ -\frac{l_n}{2A_n^-} \rho_n^-, & \mathbf{r} \in T_n^- \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$f_n^w(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{\rho_n^+}{l_n^+}, & \mathbf{r} \in W_n^+ \\ -\frac{\rho_n^-}{l_n^-}, & \mathbf{r} \in W_n^- \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$f_n^j(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{\alpha_n^{+l}}{\alpha_n^{+l}} \frac{1}{l_n^{+l}} \left[ 1 - \frac{(h_n^{+l})^2}{(\hat{h}_n^{+l} \cdot \rho_n^{+l})} \right] \frac{\rho_n^{+l}}{h_n^{+l}}, & \mathbf{r} \in T_n^+, l=1, 2, \dots, N_n^J \\ -\frac{\rho_n^-}{l_n^-}, & \mathbf{r} \in W_n^- \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

对细线结构采用分段三角基函数,如式(2)所示。式中变量分别如图 2(a),图 2(b)所示。式(3)给出适用于线面结合处的基函数<sup>[6]</sup>,变量如图 2(c)所示。式中上标 S 表示面结构, W 表示线结构, J 表示线面结合处。

有了上述基函数,面结构上的电流可表示为:

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) \approx \sum_{n=1}^{N_S} I_n^S f_n^S(\mathbf{r}) + \sum_{n=1}^{N_J} \sum_{l=1}^{N_J^J} I_{nl}^J f_n^J(\mathbf{r}) \quad (4)$$

线结构上的电流可表示为:

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) \approx \sum_{n=1}^{N_W} I_n^W f_n^W(\mathbf{r}) + \sum_{n=1}^{N_J} \sum_{l=1}^{N_J^J} I_{nl}^J f_n^J(\mathbf{r}) \quad (5)$$

其中,  $N_\beta$ , ( $\beta=S, W, J$ ) 分别是面结构, 细线结构以及线面结合处未知电流展开系数的个数。

权函数的选取采用类似 Rao<sup>[5]</sup>采用的方法,即权函数仍选用展开函数  $f_m^S, f_m^W$  和  $f_m^J$ ,然后采用中心近似以简化求解过程。

有了上面的电流基函数和权函数,利用导体表面切向电

场为零的边界条件,可得到如下的阻抗矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}^{SS} & \mathbf{Z}^{SW} & \mathbf{Z}^{SJ} \\ \mathbf{Z}^{WS} & \mathbf{Z}^{WW} & \mathbf{Z}^{WJ} \\ \mathbf{Z}^{JS} & \mathbf{Z}^{JW} & \mathbf{Z}^{JJ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}^S \\ \mathbf{I}^W \\ \mathbf{I}^J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}^S \\ \mathbf{V}^W \\ \mathbf{V}^J \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{Z}^{ij}$ , ( $i, j=S, W, J$ ) 分别表示面结构, 细线结构, 线面结合处之间的相互作用及自作用矩阵元素,  $\mathbf{I}^i, \mathbf{V}^i$ , ( $i=S, W, J$ ) 分别代表不同结构的电流展开系数矩阵和电压矩阵。矩阵元素的推导和计算在文献<sup>[7]</sup>中有

详细的描述。

## 2.3 多线段相连时的电流连续性

众所周知,在应用矩量法时,必须保障目标物体上电流分布的连续性。由式(2)可以看出,此基函数保障了两个线段相连时的电流连续性,但对于多线段相连时,显然要经过特殊的处理。

由电路理论中的基尔霍夫定理可知,流入一个节点的电流应该与流出这个节点的电流相等。此处,借用相同的原理,要求流入公共点的电流等于流出这个点的电流。下面,以三条线段共用一个顶点为例来说明应用原则。设三条线段  $l_1, l_2, l_3$  形成一个公共顶点  $P$ 。将这三条线段分成两组,  $l_1, l_2$  共用的顶点  $P$  记为  $P_1$ ,  $l_1, l_3$  共用的顶点  $P$  记为  $P_2$ ,即将一个公共点化为两个公共点。此时,线段  $l_1$  中的电流将由  $P_1$  和  $P_2$  这两个公共点对应的电流叠加而成,而线段  $l_2$  和  $l_3$  分别由  $P_1$  和  $P_2$  所对应的电流形成。这样,顶点  $P$  处的电流自动满足电流连续性定理,从而保证了分析计算的准确性。

## 3 数值计算与结果

下面分别以圆形和方形地面上的线栅型圆锥单极子天线为例,验证本文方法的有效性。首先,考察矩量法的收敛特性。图 3 给出了具体的计算结果,其中线栅型圆锥单极子天线的结构参数为:  $b=0.17\text{m}$ ,  $\theta_0=45^\circ$ ,  $h=0.17\text{m}$ ,  $a=0.0014\text{m}$ ,  $M=20$ , 频率  $f=800\text{MHz}$ , 地面半径为  $0.185\text{m}$ 。由图中可以看出,当每波长线栅分段数  $N_1 \geq 20$  和每  $\lambda^2$  地面三角形数  $N_2 \geq 200$  时,计算天线输入阻抗随分段数变化已较小。

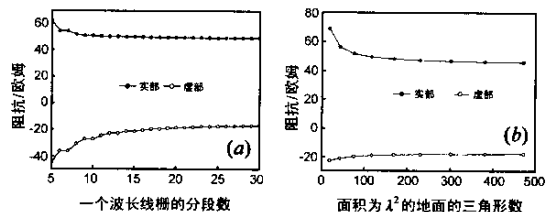


图 3 (a) 线栅型圆锥单极子天线随线栅分段数的收敛性; (b) 线栅型圆锥单极子天线随地面三角形数的收敛性

下面分析此副天线工作在  $400 \sim 2100\text{MHz}$  频段时的电特性。分别计算了此天线位于半径  $0.185\text{m}$  的圆形导体地面,和边长为  $0.4\text{m}$  的方形导体地面上时的电压驻波比,并分别与实验值和著名的电磁场计算软件 NEC 的计算结果作了比较。结果如图 4(a)和图 4(b)所示。

由图中可以看出,本文方法计算结果与实验值吻合良好。而按照无限大地面计算的 NEC 的结果与实验值的结果相差较大,充分说明了本文计算方法的精确性,也表明有限导体

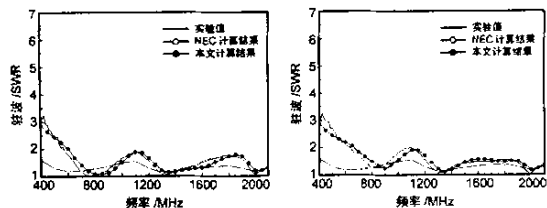


图 4 (a) 400~2100MHz 圆形地面上线栅型圆锥单极子驻波比  
(b) 400~2100MHz 方形地面上线栅型圆锥单极子驻波比

地面对天线的电性能的影响是不可忽略的。另外,虽然文中是以圆形和方形地面为例的,但方法本身适用于任意形状的导体地面。

#### 4 结论

本文采用矩量法分析任意形状导体地面上的圆锥单极子天线。文中实际分析了分别位于圆形和方形导体地面上的线栅型圆锥单极子天线,数值结果显示,计算结果与实验值吻合良好,充分说明了本文方法在分析任意形状导体地面上圆锥单极子天线的有效性及实用性。当然由于矩量法本身受到计算机内存和计算速度的限制,单纯使用本文方法不能解决导体地面电尺寸太大的情况,此时,可利用本文方法结合高频方法(如:UTD、PTD)来分析。

#### 参考文献:

- [1] 王元坤,李玉权. 线天线的宽频带技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1995. 11—24.
- [2] C E Smith, C M Bulter, K R Umashankar. Characteristics of a wire biconical antenna[J]. Microwave J, 1979, 22(9): 37—40.

- [3] B A Austin, A P C Fourie. Characteristics of the wire biconical antenna used for EMC measurements [J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1991, 33(3): 179—187.
- [4] Givati, A P C Fourie. Analysis of skeletal wire conical antennas [J]. IEEE Trans on AP, 1996, 44(6): 844—858.
- [5] S M RAO, D R Wilton, A W Glisson. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape[J]. IEEE Trans on AP, 1982, 30(3): 409—417.
- [6] S U Hwu, D R Wilton, S M Rao. Electromagnetic scattering and radiation by arbitrary conducting wire/surface configurations[J]. AP-S Digest, 1988, 6(2): 890—893.
- [7] S U Hwu, D R Wilton. Electromagnetic Scattering and Radiation by Arbitrary Configurations of Conducting Bodies and Wires[R]. Technical Report No. 87—17, USA: Applied Electromagnetic Lab, Dept of Electrical Engr, Univ. of Houston, Dec, 1987.

#### 作者简介:



郭景丽 女, 1979 年生于山西闻喜, 分别于 1999 年、2001 年获得西安电子科技大学电磁场与微波技术专业的学士、硕士学位, 现为该专业博士研究生, 主要研究方向为电磁场数值计算、电磁散射和电磁兼容分析等。E-mail: jingli-guo@yahoo.com.cn

刘其中 男, 1938 年生于重庆, 1961 年毕业于成都电讯工程学院雷达系, 现为西安电子科技大学天线与电磁散射研究所教授、博士生导师, 主要研究方向为天线数值计算与 CAD, 宽带小型化天线和智能天线、电磁散射以及电磁兼容等。

## 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>