

# 离散天线罩曲面电性能分析的方法及数值实现

戎 华<sup>[1,2]</sup> 郭东明<sup>[1]</sup> 王小明<sup>[1]</sup> 贾振元<sup>[1]</sup> 宣兆成<sup>[1]</sup>

(<sup>①</sup>大连理工大学机械工程学院, 大连 116024 <sup>②</sup>大连海军水面舰艇学院五系, 大连 116018)

**摘要** 研究了离散曲面天线罩的电性能分析方法, 求解由天线方程与天线罩表面曲面样条函数联立的非线性方程组, 得出天线罩表面积分的积分区域, 使用平面波谱-表面积分方法, 计算出带罩天线的远场方向图, 得到较好的计算结果, 为对天线罩外形进行修磨处理提供了依据。

**关键词** 天线罩, 样条函数, 平面波谱

**中图分类号** V411.8

由于天线罩系统的复杂性, 天线罩经过精加工满足空气动力学要求后, 其瞄准误差和瞄准误差斜率仍得不到很好的保证, 因此, 为保证综合电性能, 必须进行修磨处理, 修整各点厚度。为建立天线罩电厚度误差、几何厚度误差与修磨量之间的关系, 必须首先研究天线罩几何形状误差及介电常数不均匀性对天线罩综合电性能影响规律, 进而建立由天线罩的几何形状数据及瞄准误差, 计算天线罩电厚度误差的工程反问题求解技术。本文主要探讨用平面波谱-表面积分数值方法, 对有罩天线方向图加以分析, 其目的就是建立瞄准误差、介电常数与电性能参数之间的函数关系, 为反求工程奠定基础。

## 1 平面波谱-表面积分法

求解天线罩远场方向图的方法很多, 本文采用平面波谱-表面积分法<sup>[1]</sup>, 其基本步骤为: 首先, 利用对辐射天线的积分确定入射于天线罩内表面上的近场; 其次, 计算透过天线罩壁的外表面上的透射场; 最后, 根据由沿罩外表面上的切线场分布, 对天线罩外表面积分求得天线-天线罩综合体的远区辐射方向图。为解决计算速度和计算精度的矛盾, 采用数值仿真方法, 获得较好效果。

### 1.1 由平面波谱公式计算天线罩内表面附近的场

在线性、均匀、各向同性的无源媒介中, 对简谐时间变化  $\exp(j\omega t)$  的电磁场, 满足下面的 Helmholtz 方程

收稿日期: 2001-01-15

$$\nabla^2 E + k_0^2 E = 0 \quad (1)$$

在自由空间里,  $k_0^2 = \omega_0^2 \mu_0 \epsilon_0$ , (1) 式在直角坐标系下的基本解为

$$E_{k_0}(\mathbf{r}) = A(k_0) \exp(-jk_0 \mathbf{r}) \quad (2)$$

式中,  $E$  表示电场矢量;  $k_0$  为矢量波数, 代表平面波的传播方向;  $\mathbf{r}$  为观察点矢量;  $A(k_0)$  为该平面波的复数振幅。

根据电磁场理论, 在线性, 均匀, 各向同性的无源介质中, 任何单频电磁波都可以表示为沿不同方向传播的一系列平面电磁波的叠加。

$$E(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{+\infty} A(k_x, k_y) \exp(-jk_0 \mathbf{r}) dk_x dk_y \quad (3)$$

$$E_i(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{+\infty} A_i(k_x, k_y) \exp[-j(k_x x + k_y y + k_z z)] dk_x dk_y \quad (i = x, y, z) \quad (4)$$

离开天线口径几个波长后, 就可以认为天线建立的波数谱带宽是有限的, (4) 式可近似为

$$E(x, y, z) = \sum_{i=1}^L \sum_{p=-L(i)}^{L(i)} \Delta E_{ip}(x, y, z) \quad (5)$$

$$\Delta E_{ip} = \Delta E_{xip} \mathbf{i} + \Delta E_{yip} \mathbf{j} + \Delta E_{zip} \mathbf{k} \quad (6)$$

$$\Delta E_{ip} = \Delta k_x \Delta k_y A_i(k_{xi}, k_{yp}) \exp[-j(k_{xi} x + k_{yp} y + k_{zi} z)] / 2\pi \quad (i = x, y, z) \quad (7)$$

再根据单一频率平面电磁波电场矢量与磁场矢量之间关系, 可得空间的磁场分量为

$$\mathbf{H} = \mathbf{k}_0 \times \mathbf{E} / \omega_0 \mu_0 \quad (8)$$

采用高斯积分, 获得积分子区间划分, 分别为 4, 8, 16 时的幅度值。

## 1.2 透过天线罩并在罩的外表面上切线场的分布

由于罩处于天线近区场, 为此, 我们利用入射场的子平面分解, 通过分别讨论这些子平面波穿过罩壁的传输, 来研究罩外表面上的场。根据平面电磁波通过单一介质平板的有关结论可知, 第  $l$  子平面波通过天线罩后成为

$$\Delta E_{ipK} = T_h(\theta_i) \Delta E_{iph} + T_v(\theta_i) \Delta E_{ipv} \quad (9)$$

式中,  $T_h(\theta_i), T_v(\theta_i)$  分别表示水平极化波和垂直极化波的透过系数, 这对于无耗介质可统一表示为

$$T(\theta_i) = T_0 \exp(-j\phi_i) \quad (10)$$

$$T_1 = (1 - r_{ab}^2) / [(1 - r_{ab}^2)^2 + 4r_{ab}^2 \sin^2 \phi_b]^{1/2} \quad (11)$$

式中,  $\phi_i = \phi_b + \arctan(r_{ab}^2 \sin 2\phi_b / (1 - r_{ab}^2 \cos 2\phi_b))$ ,  $\phi_b = 2\pi h \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i} / \lambda_0$ 。其中,  $r_{ab}$  代表水平极化波或垂直极化波的反射系数  $r_{abv}, r_{abh}$

$$r_{abh} = (\epsilon \cos \theta_i - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i}) / (\epsilon \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i}) \quad (12)$$

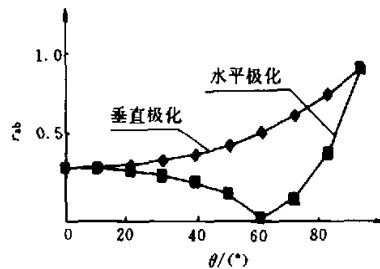


图1 平板界面反射系数与入射角的关系

$$r_{\text{abh}} = \left( \cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i} \right) / \left( \cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i} \right) \quad (13)$$

这样,便可求得天线罩外表面某点处总电场  $E_{MR}(x, y, z)$

$$E_{MR}(x, y, z) = \sum_{l=-L}^L \sum_{p=-L'(l)}^{L'(l)} \Delta E_{l,pR}(x, y, z) \quad (14)$$

### 1.3 天线-天线罩体的远区辐射场

在求得  $E_{MR}$  后,对磁场作相应的分析,也可得  $H_{MR}$  类似的表达.将罩外场  $E_{MR}, H_{MR}$  作为二次源,利用表面积分技术,则远区场<sup>[2]</sup>为

$$E = -(jk/4\pi) \iint_S \{ \sqrt{\mu/\varepsilon} (\mathbf{n} \times \mathbf{H}_{MR}) - [\sqrt{\mu/\varepsilon} (\mathbf{n} \times \mathbf{H}_{MR}) \mathbf{r} - \mathbf{r} \times (\mathbf{E}_{MR} \times \mathbf{n})] \exp(-jkr) r \} \mathrm{d}s \quad (15)$$

## 2 天线罩电性能的数值求解法

为了对远场方向图进行数值仿真,首先要对天线罩曲面进行数学描述,进而确定被积函数和积分区域.

### 2.1 天线罩曲面的数学表示

机载、弹载等飞行器上的天线罩除具有保护天线免受自然环境影响外,还兼有改善气动外形的作用,一般设计成流线型鼻锥或卵形.由于鼻锥形天线罩的外形曲线一般为回转面,可视为直角坐标系  $XOZ$  平面上的一条曲线,对离散点,样条函数表示为

$$S(Z_R) = M_{j-1}(Z_{Rj} - Z_R)^3/6h_{j-1} + M_j(Z_R - Z_{Rj-1})^3/6h_{j-1} + [S(Z_{Rj-1}) - M_{j-1}h_{j-1}^2/6](Z_{Rj} - Z_R)/h_{j-1} + [S(Z_{Rj}) - M_jh_{j-1}^2/6](Z_R - Z_{Rj-1})/h_{j-1} \quad (16)$$

其中,  $Z_R \in [Z_{Rj-1}, Z_{Rj}]$ ,  $h_j = Z_{Rj} - Z_{Rj-1}$ ,  $j = 1, \dots, n$ . 将上述曲线进行旋转,得到天线罩曲面.其中,

$$\Phi(x_R, y_R, z_R) = -\sqrt{x_R^2 + y_R^2} + M_{j-1}(Z_{Rj} - Z_R)^3/6h_{j-1} + M_j(Z_R - Z_{Rj-1})^3/6h_{j-1} + [S(Z_{Rj-1}) - M_{j-1}h_{j-1}^2/6](Z_{Rj} - Z_R)/h_{j-1} + [S(Z_{Rj}) - M_jh_{j-1}^2/6](Z_R - Z_{Rj-1})/h_{j-1} \quad (17)$$

其中  $Z_R \in [Z_{Rj-1}, Z_{Rj}]$ ,  $h_j = Z_{Rj} - Z_{Rj-1}$ ,  $j = 1, \dots, n$ . (17) 式即为曲线(16)绕  $Z_R$  轴旋转而成的三维曲面.确定了天线罩的数学表示方法后,根据(15)可求出被积函数.

### 2.2 积分区域的确定

如式(15)所示,天线-天线罩综合体的远区辐射方向图,是由天线罩外表面上的切平面内的电场和磁场进行沿天线罩外表面积分得到的,对于一般的曲面积分

$$\iint_{S_R} E \mathrm{d}S_R = \iint_{D_{R \times R_V}} E \sqrt{1 + Z_R^2(x_R, y_R) + Z_R^2(x_R, y_R)} \mathrm{d}x_R \mathrm{d}y_R \quad (18)$$

这里  $D_{R_1 R_2}$  是天线罩曲面向  $x_R o_R y_R$  平面的投影, 当天线在罩内作机械或电子扫描时, 在天线罩坐标系内, 积分区域或投影面积可依据下列各式来确定.

$$z_R = Q_1 x_R + Q_2 y_R + Q_3 \quad (19)$$

上式是天线罩平面(天线坐标系)在天线罩坐标系中的方程, 其中,  $Q_1 = -\tan\Omega/\cos\omega$ ,  $Q_2 = -\tan\omega$ ,  $Q_3 = L_3/\cos\Omega\cos\omega$ . 如果要求该平面与天线罩相交后的  $x_R o_R y_R$  平面上的投影则联立

$$\begin{cases} \Phi(x_R, y_R, z_R) = 0 \\ z_R = Q_1 x_R + Q_2 y_R + Q_3 \end{cases} \quad (20)$$

从中消去  $z_R$ , 即可得投影曲线方程

$$\Phi(x_R, y_R, Q_1 x_R + Q_2 y_R + Q_3) = 0 \quad (21)$$

对于天线罩曲面方程是由分段函数组成, 如样条函数, 上述投影曲线变得十分复杂, 因为必须判断在各数值区域上方程(19)与哪一段函数相交.

显然这是由  $n$  段函数组成的, 如果方程(19)和(17)相交, 就是把(17)式中的  $z_R$  换成  $Q_1 x_R + Q_2 y_R + Q_3$ . 这里存在的问题是方程(17)受到  $z_R \in [z_{Rj-1}, z_{Rj}]$  的限制, 所以在进行相交计算时,  $z_R \in [z_{Rj-1}, z_{Rj}]$  是判断方程(19)和某一段样条曲面相交的条件. 为说明方便起见, 将(17)式同方程(19)相交的曲线表示为

$$\sqrt{x_R^2 + y_R^2} = \Phi_j(x_R, y_R) \quad (22)$$

因为投影区域是封闭的凸光滑区域, 且包含  $x_R o_R y_R$  的原点  $o_R$ , 所以可以用极坐标来表示, 从而构成一一对应关系. 令  $x_R = \rho_R \cos\theta_R$ ,  $y_R = \rho_R \sin\theta_R$ , 所以变为

$$\rho_R = \phi_j(\rho_R \cos\theta_R, \rho_R \sin\theta_R), j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (23)$$

这里  $\theta_R$  是由  $0^\circ$  到  $360^\circ$ .

图 2 分别是某天线罩在天线俯仰角为  $10^\circ$ , 方位角为  $10^\circ$  和俯仰角为  $-10^\circ$  方位角为  $0^\circ$  的积分区域图.

我们用上述方法对长细比为 2:1 的某天线罩进行了远区辐射方向图的计算(观察角  $\Omega$  为  $10^\circ$ ), 并与无罩天线方向图作一比较, 可以看出, 效果是比较理想的(图 3).

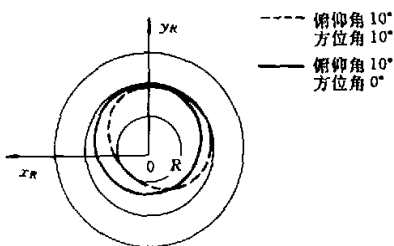


图 2 积分区域

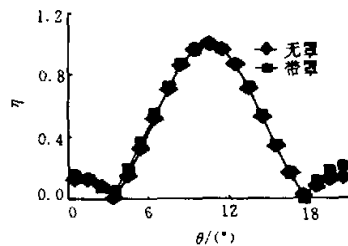


图 3 远场方向图比较

## 4 结束语

由于对天线罩电性能进行精确预测在实际应用中具有重要的意义,因此,本文采用平面波谱-表面积分法对其电性能进行了较为深入的探讨,运用样条函数处理实验数据的离散性和计算的复杂性,利用数值运算,大大提高了计算速度,并得到较好的结果,同时,可由此方法研究天线罩几何形状误差及介电常数不均匀性对天线罩综合电性能影响规律,为建立由天线罩的几何形状数据及瞄准误差,计算天线罩电厚度误差的工程反问题求解技术提供了依据。

## 参 考 文 献

- 1 杜耀惟, 天线罩电信设计方法. 北京: 国防工业出版社, 1993
- 2 刘建芬, 万伟, 天线罩系统的分析. 航空学报, 1987, 8

## A NUMERICAL SIMULATION METHOD FOR ANALYZING THE ELECTROMAGNETIC PERFORMANCE OF RADOME CONSTRUCTED WITH DISCRETE POINTS

Rong Hua<sup>1,2</sup> Guo Dongming<sup>1</sup> Wang Xiaoming<sup>1</sup> Jian Zhenyuan<sup>1</sup> Xuan Zhaocheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024  
<sup>2</sup>Dalian Navy Academy, Dalian, 116018

**Abstract** A numerical method for analyzing the electromagnetic performance of radome is investigated. Firstly, based on the measuring data, the geometry of radome is represented by means of the spline function and the fairing technique is used in order to obtain a smooth radome surface. Then, the system of nonlinear equations, which are composed of the surface equation of antenna and the piecewise spline curve functions of radome, are solved using dichotomy and the integration area is obtained, which is used in the plane wave spectrum method. Further, the directional diagram of far field of radome is simulated by virtue of the plane wave spectrum surface integration (PWS-SI). Finally, some practical examples verified that the proposed method is feasible and efficient.

**Key words** radome, spline function, plane spectrum, numerical integration

## 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>