

# 天线罩远场方向图的一种数值仿真方法

戎 华<sup>1,2</sup>

(1. 大连理工大学机械工程学院 辽宁 大连 116024 ; 2. 大连海军水面舰艇学院 辽宁 大连 116018)

**摘 要** :在分析天线罩综合电性能数值仿真方法基础上 ,结合平面波谱 – 表面积分法和样条函数理论 ,探讨了天线罩远场方向图的数值仿真方法。并根据加工后的天线罩实测数据 ,对其进行了实例计算 ,获得了较好效果。同时还重点讨论了由天线方程和天线罩曲面方程所确定的天线罩表面积分的积分区域的计算方法。

**关键词** :天线罩 ;样条函数 ;数值积分 ;模拟

**中图分类号** :TN820 **文献标识码** :A

## Numerical Simulation Method for Solving Far Directional Pattern of Radome

RONG Hua<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering , Dalian University of Technology , Dalian 116024 , China ; 2. Dalian Navy Academy , Dalian 116018 , China )

**Abstract** :A numerical simulation method for solving far directional pattern of radome is investigated. It is based on the plane wave spectrum surface integration method of radome electric property and the theory of B – spline function. And according to the measured data , a practical far directional pattern of radome is simulated and a satisfied result is obtained. Meanwhile , the computing method of the integrated field is studied deeply by solving a set of nonlinear equations consisting of antenna equation and radome surface equation.

**Keywords** :Radome ; Spline function ; Numerical integration ; Simulation

## 1 前 言

导弹天线罩位于导弹的头部 ,是用于保护导引头回波天线在飞行过程中免受外界环境影响的一个保护罩 ,它又是导弹弹体的头部 ,由于天线罩对电磁波的折射 ,使真实目标位置和视在目标位置之间产生一个角度差 ,造成导弹跟踪时的偏差 ,因此天线罩又是导弹控制回路的一个环节 ,其性能的优劣将影响导弹的作用距离、脱靶量和稳定性。为保证导弹在飞行过程中的正常工作及达到所规定的战术技术指标的要求 ,天线罩既要适应导弹气动力、气动热和飞行过程中的恶劣环境 ,又要满足电气性能要求 ,保证天线罩的存在对导引头回波天线及导弹跟踪系统影响最小。然而 ,由于诸多因素的影响 ,经过加工后的天线罩不能完全满足设计要求 ,其瞄准误差和误差斜率仍得不到很好的保证。为保证综合电性能 ,修正各点几何厚度是一种行之有效的办法。为获得该修正值 ,必须建立几何厚度误差与修正量之间的关系。因此 ,首先要研究天线罩几何形状误差对天线罩综合电性能影响规律。本文根据该指导思想 ,着重探讨了用平面波谱 – 表面积分法分析天线罩电性能时 ,远场方向图计算的数值仿真方法。

## 2 天线场的平面波谱表示

为分析天线罩综合电性能 ,本文采用了平面波谱 – 表面积分法。该方法采用子平面波叠加 ,对天线罩内电磁场进行分析 ,是目前用于分析天线罩性能的一个较好的方法。

### 2.1 天线近场分析的平面波谱法

在线性、均匀、各向同性的无源媒介中 ,对简谐时间变化 ( $e^{j\omega_0 t}$ ) 的电磁场 ,满足下面的 Helmholtz 方程

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

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

$$E_{k_0}(r) = A(k_0) e^{-j k_0 \cdot r} \quad (2)$$

式中  $E$  —— 电场矢量 ;  $k_0$  —— 矢量波数 ,代表平面波的传播方向 ;  $r$  —— 观察点矢量 ;  $A(k_0)$  —— 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

$$E(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(k_x, k_y) e^{-j k_0 r} dk_x dk_y \quad (3)$$

式中  $k_x, k_y$  ——  $k_0$  在  $X, Y$  方向上的分量 ,与  $Z$  方向分量

满足

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left( \frac{2\pi}{\lambda_0} \right)^2 \quad (4)$$

$\lambda_0$ ——单频电磁波波长。根据平面波谱概念,位于天线前半球空间的电场分量为

$$E(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(k_x, k_y) e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y \quad (5)$$

$i = x, y, z$

离开天线口径几个波长,可以认为天线建立的波数谱带宽是有限的。式(5)可近似为

$$E(x, y, z) = \sum_{l=-L}^L \sum_{p=-L(l)}^{L(l)} \Delta E_{lp}(x, y, z) \quad (6)$$

其中

$$L = \frac{k_0}{\Delta k_x}, L(l) = \frac{\sqrt{k_0^2 - l^2 \Delta k_x^2}}{\Delta k_y} \quad (7)$$

$$\Delta E_{lp} = \Delta E_{xlp} i + \Delta E_{y lp} j + \Delta E_{z lp} k \quad (7)$$

$$\Delta E_{ilp} = \frac{1}{2\pi} \Delta k_x \Delta k_y A_i(k_{xl}, k_{yp}) e^{-j(k_{xl} x + k_{yp} y + k_{zlp} z)} \quad (8)$$

$i = x, y, z$

再根据单一频率平面电磁波电场矢量与磁场矢量之间的关系

$$H = \frac{1}{\omega_0 \mu_0} k_0 \times E \quad (9)$$

可得空间的磁场分量为

$$H(x, y, z) = \sum_{l=-L}^L \sum_{p=-L(l)}^{L(l)} \Delta H_{lp}(x, y, z) \quad (10)$$

其中

$$\Delta H_{lp} = \Delta H_{xlp} i + \Delta H_{y lp} j + \Delta H_{z lp} k \quad (11)$$

$\Delta H_{xlp}, \Delta H_{y lp}, \Delta H_{z lp}$ —— $x, y, z$  3 个方向上的子平面波。

应用式(6)式(10)即可求出天线罩内表面上任一点处的电场矢量和磁场矢量,并且已分解为一组正交的局部平面波的和。

## 2.2 天线近场穿过罩壁的透射

根据平面电磁波通过单一介质平板的有关结论可知,第  $lp$  子平面波通过天线罩后成为

$$\Delta E_{lpR} = T_{//}(\theta_i) \Delta E_{lp//} + T_{\perp}(\theta_i) \Delta E_{lp\perp} \quad (12)$$

式中  $T_{//}(\theta_i), T_{\perp}(\theta_i)$ ——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

$$T(\theta_i) = T_1 e^{-j\phi_i} \quad (13)$$

$$T_1 = \frac{1 - r_{ab}^2}{[(1 - r_{ab}^2)^2 + 4r_{ab}^2 \sin^2 \phi_b]}^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$\phi_i = \phi_b + \arctan \frac{r_{ab}^2 \sin 2\phi_b}{1 - r_{ab}^2 \cos 2\phi_b}$$

$$\phi_b = \frac{2\pi h}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i}$$

其中  $r_{ab}$ ——水平极化波或垂直极化波的反射系数  $r_{ab\perp}$ ,

$r_{ab//}$

$$\text{万芳数据} \quad \frac{(\epsilon \cos \theta_i - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i})}{(\epsilon \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i})} \quad (15)$$

$$r_{ab\perp} = \frac{(\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i})}{(\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i})} \quad (16)$$

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

$$E_{MR}(x, y, z) = \sum_{l=-L}^L \sum_{p=-L(l)}^{L(l)} \Delta E_{lpR}(x, y, z) \quad (17)$$

## 2.3 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,可以求得天线罩外表面  $M$  点处的磁场  $H_{MR}$  类似的表达。将罩外场  $E_{MR}, H_{MR}$  作为二次源,根据等效原理,利用表面积分技术,则天线-天线罩体的远区辐射场为

$$E = -\frac{j k_0}{4\pi r} e^{-jk_0 r} \mathbf{R}_1 \times \iint_{S_R} \mathbf{n}_{km0} \times \mathbf{E}_{MR}(x_R, y_R, z_R) - \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon}} \mathbf{R}_1 \times [\mathbf{n}_{RM0} \times \mathbf{H}_{MR}(x_R, y_R, z_R)] e^{jk_0 r'} \cdot \mathbf{R}_1 dS_R \quad (18)$$

其中  $r$ ——观测点到天线罩坐标原点的距离;  $\mathbf{R}_1$ ——观测方向单位矢量;  $r'$ ——天线罩外表面矢径;  $\mathbf{n}_{RM0}$ ——天线罩外表面上源点( $M$ 点)处的单位外法线方向。对式(18)进行数值积分,便可求出天线罩体在给定方向上的远区方向图。

## 3 远场方向图的数值仿真方法

从式(18)可以看出,对远场方向图的数值仿真关键在于被积函数的确定和积分区域的确定。

### 3.1 被积函数的确定

在被积函数的确定过程中,天线罩曲面的数值仿真是一个关键问题,因为天线罩曲面的数学描述直接影响天线罩综合电性能。加工后的天线罩曲面是由实测的离散数据构成的。由于天线罩外形一般设计为流线型鼻锥或卵型,且鼻锥形天线罩的外形曲面一般为回转面,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

$$\mathcal{X}(Z_R) = M_{j-1} \frac{(Z_{R_i} - Z_R)^3}{6h_{j-1}} + M_j \frac{(Z_R - Z_{R_{j-1}})^3}{6h_{j-1}} + \left[ \mathcal{X}(Z_{R_{j-1}}) - \frac{M_{j-1}h_{j-1}^2}{6} \right] \frac{Z_{R_i} - Z_R}{h_{j-1}} + \left[ \mathcal{X}(Z_{R_j}) - \frac{M_j h_{j-1}^2}{6} \right] \frac{Z_R - Z_{R_{j-1}}}{h_{j-1}} \quad (19)$$

其中  $Z_R \in [Z_{R_{j-1}}, Z_{R_j}]$ ,  $h_j = Z_{R_j} - Z_{R_{j-1}}$ ,  $j = 1 \dots n$

将上述曲线进行旋转,得到天线罩曲面  $\mathcal{A}(x_R, y_R, z_R)$  为

$$\mathcal{A}(x_R, y_R, z_R) = -\sqrt{x_R^2 + y_R^2} + M_{j-1} \frac{(Z_{R_i} - Z_R)^3}{6h_{j-1}} + M_j \frac{(Z_R - Z_{R_{j-1}})^3}{6h_{j-1}} + \left[ \mathcal{X}(Z_{R_{j-1}}) - \frac{M_{j-1}h_{j-1}^2}{6} \right] \frac{Z_{R_i} - Z_R}{h_{j-1}} + \left[ \mathcal{X}(Z_{R_j}) - \frac{M_j h_{j-1}^2}{6} \right] \frac{Z_R - Z_{R_{j-1}}}{h_{j-1}} \quad (20)$$

式中  $Z_R \in [Z_{R_{j-1}}, Z_{R_j}]$ ,  $h_j = Z_{R_j} - Z_{R_{j-1}}$ ,  $j = 1 \dots n$   
式(20)即为曲线式(19)绕  $Z_R$  轴旋转而成的三维曲面。由上述公式可对实测天线罩离散数据进行曲面数学描述。

### 3.2 积分区域的确定

如式(18)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

$$\iint_{S_R} E dS_R = \iint_{D_{R_{xy}}} E \sqrt{1 + Z'_R(x_R, y_R)^2 + Z''_R(x_R, y_R)^2} dx_R dy_R$$

其中  $D_{R_{xy}}$ ——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。

$$Z_R = Q_1 x_R + Q_2 y_R + Q_3 \quad (21)$$

式(21)是天线罩平面(天线坐标系)在天线罩坐标系中的方程, 其中

$$Q_1 = \frac{-\tan\Omega}{\cos\omega} \quad Q_2 = -\tan\omega$$

$$Q_3 = \frac{L_3}{\cos\Omega \cdot \cos\omega} \quad (22)$$

如果要求该平面与天线罩相交后在  $x_R O_R y_R$  平面上的投影, 则联立

$$\begin{cases} \Phi(x_R, y_R, z_R) = 0 \\ Z_R = Q_1 x_R + Q_2 y_R + Q_3 \end{cases} \quad (23)$$

从中消去  $Z_R$ , 即可得投影曲线方程

$$\Phi(x_R, y_R, Q_1 x_R + Q_2 y_R + Q_3) = 0 \quad (24)$$

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(21)与哪一段函数相交。

显然这是由  $n$  段函数组成的, 如果方程(21)和方程(20)相交, 即把式(20)中的  $Z_R$  代换成  $Q_1 x_R + Q_2 y_R + Q_3$ 。但方程(20)受到  $Z_R \in [Z_{R_{j-1}}, Z_{R_j}]$  的限制, 所以在进行相交计算时,  $Z_R \in [Z_{R_{j-1}}, Z_{R_j}]$  是判断方程(21)和某一段样条曲面相交的条件。为便于说明, 将式(20)同方程(21)相交的曲线表示为

$$\sqrt{x_R^2 + y_R^2} = \phi_j(x_R, y_R) \quad (25)$$

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。

$$\text{令} \quad x_R = \rho_R \cos\theta_R, y_R = \rho_R \sin\theta_R \quad (26)$$

则式(25)变为

$$\rho_R = \phi_j(\rho_R \cos\theta_R, \rho_R \sin\theta_R)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (27)$$

由此获得积分投影区域。程序框图如图1。

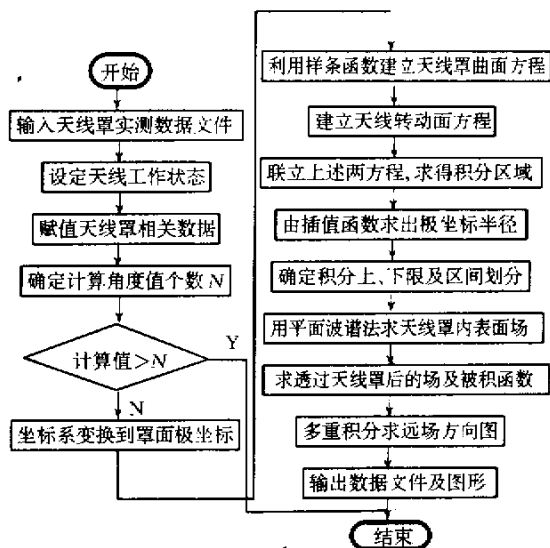


图1 程序框图

## 4 数值算例

我们用上面的方法计算了某带罩天线的远区方向图(见图2), 其中观察角  $\Omega = 10^\circ$ , 得到较好的效果。

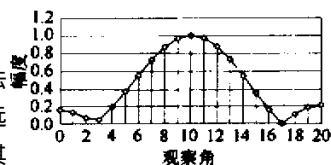


图2 远区方向图

## 5 结论

导弹天线罩由于受其材料均匀性和几何厚度制造精度的限制, 一般其电性能分散性较大, 因此, 对天线罩电性能进行精确预测在实际生产中具有重要的意义。本文采用平面波谱-表面积分法对天线罩电性能进行了较为深入的探讨, 并结合样条函数统一处理各种实测数据, 有效减小了计算的复杂性, 大大提高了计算速度, 获得了较好的结果。同时, 这一方法对研究天线罩几何厚度误差及介电常数不均匀性对天线罩综合电性能影响规律, 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] 杜耀耀. 天线罩电信设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [2] 刘建芬, 万伟. 天线罩系统的分析[J]. 航空学报, 1987, 8(1): 67~76.
- [3] 张谟杰. 超音速导弹天线罩及其设计[J]. 指导与引信, 2000, 21(1): 1~6.

## 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>