

文章编号:1671-0576(2006)04-0032-04

# 射线跟踪技术分析电大尺寸天线罩的寻迹算法

邹 姝, 朱守正

(华东师范大学信息学院, 上海 200062)

**摘要:** 用几何光学—单一平面波射线跟踪技术解决电大尺寸多层介质罩内电磁波传播问题的关键任务是求解射线与各介质分界面的交点, 尤其是该文的背景课题为了考虑介质分界面曲率的影响, 需要计算波阵面的曲率矩阵, 因此有必要用更严格的方法来求射线与曲面的交点。该文论述了在已知天线罩各介质分界面曲面方程的情况下, 如何用数值方法中的二分法来计算射线和介质分界面的交点, 其算法直观、可靠, 而且适用的曲面方程形式广泛。

**关键词:** 射线; 非线性方程; 天线罩

中图分类号: TN015

文献标识码: A

## Trailing Algorithm for Analysis of Large Wavelength Radome by Ray Tracing Technique

ZOU Shu, ZHU Shou-zheng

(Department of Information, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** When applying GO associated with monochromatic plane wave ray tracing technique to analyze how electromagnetic wave propagates through large wavelength multi-layered radome, the exact point where one ray penetrates through a boundary surface must be determined, especially when curvature of wave front is wanted. Based on method of bisection, this paper presents an algorithm used to solve the intersecting point assuming that the equation of each boundary surface is definite. The algorithm advantages in its simplicity, accuracy and being adaptive for various kinds of surface.

**Key words:** ray; nonlinear equation; radome

## 0 引言

用射线跟踪技术分析天线罩的关键问题是求

收稿日期: 2006-10-24

基金项目: 机载天线罩金属周期结构曲率效应数值分析。

作者简介: 邹 姝(1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事计算电磁学的研究; 朱守正(1949-), 男, 教授, 博导, 主要从事微波技术、电磁波遥感、天线、计算电磁学等的研究。

射线与介质分界面的交点<sup>[1]</sup>, 其数学本质是解射线方程与曲面方程构成的方程组, 该方程组能够化为一个非线性方程。非线性方程包括高次代数方程及超越方程<sup>[2]</sup>, 虽然求解高次代数方程的数值方法已相当成熟, Fortran 语言的 IMSL 库有丰富的函数用来求高次代数方程的根<sup>[3]</sup>, 但这些函数求出的是方程所有的根, 而分析天线罩的计算中需要的只是当中的某一个或者一个也不是。因此

调用它们来解方程显得比较浪费,而且求高次代数方程的系数既费劲又容易出错;尽管 IMSL 库也有函数用于求任意非线性方程的根,但调用它们必须提供根的初始值和逼近次数等,而且它们不能明确地给定根是否存在或者保证在根存在时绝对能找到根。工程上用得较多的是把曲面局部近似为平面来求射线和介质分界面的交点<sup>[4]</sup>,却没法考虑曲面曲率对电磁波传播的影响。

由于求射线与曲面交点存在的不足,现在比较准确的、计算速度又不是太慢的分析天线罩的方法是射线法与积分方法或低频方法的混合方法<sup>[5]</sup>。本文以二分法为基础提出的算法能够直观而准确地求出射线与曲面的交点,能够适应相当多的曲面方程形式,可以促进射线法在电大尺寸天线罩分析中的应用。

## 1 问题陈述

用几何光学-单一平面波射线跟踪技术分析电大尺寸天线罩的基本前提是天线口径线度大于 10 个波长,在此条件下天线辐射的近区场可近似成一个单一的平面波(文献[1]对此有详细论述),该平面波可以用几何光学的语言描述为一束从天线口径面出发并与口径面外法线同向的射线,它们如同光线一样照射到天线罩内壁,如图 1 所示。

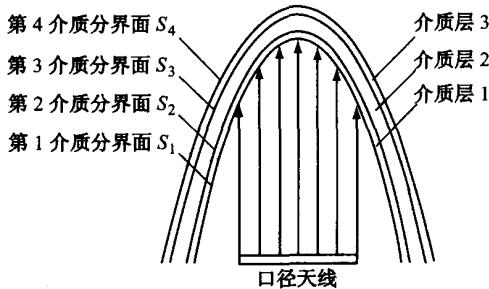


图 1 电大尺寸口径天线-天线罩系统

设  $n$  为天线罩介质的层数,各介质分界面由里到外分别用  $S_1, S_2, \dots, S_{n+1}$  表示。由 Fermat 原理可以求出电磁波在各介质面上的透射和反射<sup>[6,7]</sup>,透射波和反射波也用射线表示,因此后文都用射线来描述电磁波在天线罩中的传播。

如图 2 所示,  $S_j$  的入射线  $R_j$  在它与  $S_j$  的交点处发生透射和反射得到透射线  $R_j^t$  和反射线  $R_j^r$ ,如果  $R_j^t$  与  $S_{j+1}$  相交,则会产生新的透射线和反射线,同样如果  $R_j^r$  与  $S_{j-1}$  或与  $S_j$  相交,也会产生新的透射线和反射线,这些新产生的射线像  $R_j^t$  和  $R_j^r$  或者像  $R_j^r$  一样在与之相交的介质分界面再产生新的射线,直到射线所代表的电磁波的能量降到足够小<sup>[8]</sup>。由此可见,求射线与介质分界面交点的问题有两大类:一是射线端点在  $S_j$  内侧时,射线与  $S_j$  的相交情况;二是射线端点在  $S_j$  上时,射线与  $S_j$  和  $S_{j-1}$  的相交情况。

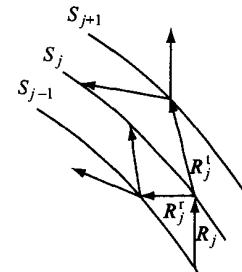


图 2 射线的繁衍

## 2 算法思路

### 2.1 射线与曲面的交点

本节将以天线罩各介质分界面均为 Von Karman 曲面的情况为例,来说明已知天线罩各介质分界面曲面方程时,求射线与介质分界面交点的算法。

求射线与曲面交点的计算在天线罩坐标系(天线罩坐标系在文献[1]中有说明)下进行,射线端点为  $P_0(x_0, y_0, z_0)$ ,射线方向为  $e = (e_x, e_y, e_z)$ ,射线上任意一点的坐标为  $(x, y, z)$ ,它到  $P_0$  的距离为  $l(l \geq 0)$ ,则射线方程为

$$\begin{cases} x = x_0 + le_x \\ y = y_0 + le_y \\ z = z_0 + le_z \end{cases} \quad (1)$$

Von Karman 曲面的曲面方程形式如下:

$$\left( \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{a} \right)^c + \left( \frac{z}{b} \right)^c = 1$$

$$(a > 0, b > 0, c > 1, 0 \leq z \leq b) \quad (2)$$

式中,曲面上任意一点的坐标为( $x, y, z$ ); $a, b$ 和 $c$ 为表示曲面几何特征的常量,则 $S_j$ 和 $S_{j-1}$ 的曲面方程分别如下:

$$\left( \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{a_j} \right)^c + \left( \frac{z}{b_j} \right)^c = 1$$

$$(a_j > 0, b_j > 0, c > 1, 0 \leq z \leq b_j) \quad (3)$$

$$\left( \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{a_{j-1}} \right)^c + \left( \frac{z}{b_{j-1}} \right)^c = 1$$

$$(a_{j-1} > 0, b_{j-1} > 0, c > 1, 0 \leq z \leq b_{j-1}) \quad (4)$$

式中, $j = 2, 3, \dots, n+1$ ; $j=1$ 时是 $S_{j-1}$ 不存在而 $S_j$ 为天线罩内壁的特殊情况。

由式(3)可以确定刚好能容下 $S_j$ 的长方体 $Box_j$ ,如图3和图4所示。 $Box_j$ 用长、宽和高来描述,由这些参数可以求出射线与 $Box_j$ 唯一的交点 $P'_j$ ,设 $P_o$ 到 $P'_j$ 的距离为 $l'_j$ ;另外,用 $\Omega_j$ 和 $\Omega_{j-1}$ 分别表示 $S_j$ 和 $S_{j-1}$ 在 $Box_j$ 底面的投影。

射线端点 $P_o$ 在 $S_j$ 内侧时,求射线与 $S_j$ 的交点,联合射线方程式(1)和 $S_j$ 的曲面方程式(3),得到关于变量 $l$ 的非线性方程如下:

$$f_j(l) = \left( \frac{\sqrt{(x_o + le_x)^2 + (y_o + le_y)^2}}{a_j} \right)^c + \left( \frac{z_o + le_z}{b_j} \right)^c - 1 = 0 \quad (5)$$

若 $P'_j$ 在 $Box_j$ 底面且在 $\Omega_j$ 内,如图3所示,射线与 $S_j$ 不相交;否则,射线在线段 $P_oP'_j$ 上有且仅有一个与 $S_j$ 的交点 $P_j$ ,如图4所示。于是式(5)在区间 $(0, l'_j]$ 上有且仅有一个根 $l_j$ ,可以用二分法求之。

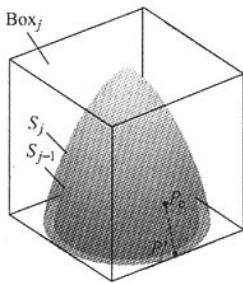


图3 射线与外层曲面不相交

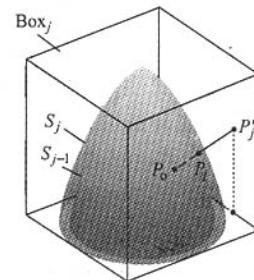


图4 射线与外层曲面有交点

射线端点 $P_o$ 在 $S_j$ 上时,求射线与 $S_j$ 的另一个交点,若 $P'_j$ 在 $Box_j$ 底面且在 $\Omega_j$ 内,如图5所示,射线与 $S_j$ 没有另一个交点;否则,求线段 $P_oP'_j$ 上的点 $P'$ ,设 $P_o$ 到 $P'$ 的距离为 $l'_j/2^m$ (其中 $m$ 是满足使 $P'$ 在 $S_j$ 内侧的自然数),则射线在线段 $P'oP'_j$ 上有且仅有两个与 $S_j$ 的交点 $P_j$ ,如图6所示。于是式(5)在区间 $(l'_j/2^m, l'_j]$ 上有且仅有两个根 $l_j$ ,可以用二分法求之。

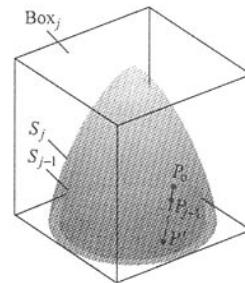


图5 射线与内层曲面有唯一交点

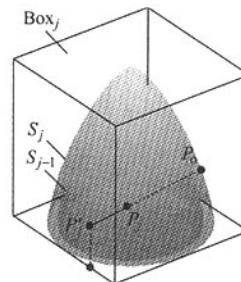


图6 射线与内层曲面有两个交点

射线端点 $P_o$ 在 $S_j$ 上时,还要求射线与 $S_{j-1}$ 的交点,联合射线方程式(1)和 $S_{j-1}$ 的曲面方程式

(3), 得到关于变量  $l$  的非线性方程如下:

$$f_{j-1}(l) = \left( \frac{\sqrt{(x_0 + le_x)^2 + (y_0 + le_y)^2}}{a_{j-1}} \right)^c + \left( \frac{z_0 + le_z}{b_{j-1}} \right)^c - 1 = 0 \quad (6)$$

若  $P'_j$  在  $\text{Box}_j$  底面且在  $\Omega_{j-1}$  内, 射线在线段  $P_oP'_j$  上有且仅有一个与  $S_{j-1}$  的交点  $P_{j-1}$ , 如图 5 所示, 于是方程式(6)在区间  $(0, l'_{j-1})$  上有且仅有一个根  $l_{j-1}$ , 可以用二分法求之; 否则, 调用分割程序处理线段  $P_oP'_j$ , 当分割程序求出线段  $P_oP'_j$  没有在

$S_{j-1}$  内侧的部分时, 射线与  $S_{j-1}$  没有交点, 当分割程序求出了线段  $P_oP'_{j-1}$  上处于  $S_{j-1}$  内侧的一点  $P'_{j-1}$  时, 设  $P_o$  到  $P'_{j-1}$  的距离为  $l'_{j-1}$ , 射线在线段  $P_oP'_{j-1}$  上有且仅有且一个与  $S_{j-1}$  的交点  $P_{j-1}$ , 如图 6 所示, 于是方程式(6)在区间  $(0, l'_{j-1})$  上有且仅有且一个根  $l_{j-1}$ 。

## 2.2 线段分割算法

自定义一个双向串行型链表, 初始化链表时, 起始单元为空, 其后的单元记录要被分割的线段两个端点的坐标, 分割程序的流程图如图 7 所示。

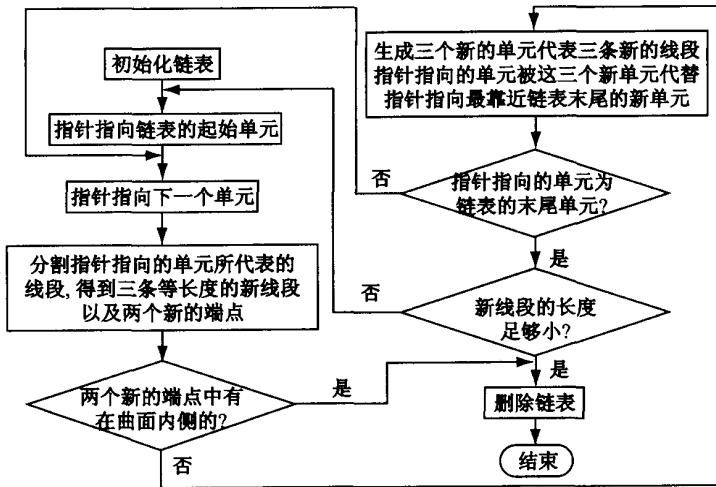


图 7 分割程序流程图

在链表各个单元所代表的线段长度比较小时, 可以对链表各单元所代表的线段逐个用分割程序进行处理, 处理完后就删除该单元。若在该单元所代表的线段上找到了处于曲面内侧的点就删除整个链表, 否则处理下一个单元所代表的线段。分割程序会在线段没有在曲面内侧的部分的情况下有点费时, 但对整个分析天线罩程序的计算速度影响很小。

## 3 验证

本文的算法在用二分法求射线与曲面交点之前, 可以确定有意义的交点是否存在以及有意义的交点存在时只含该交点的射线上的线段, 于是

就确定了非线性方程有且仅有那个有意义解的范围。用二分法解方程的过程, 就是要让最终得到的方程在该范围里的解最大限度地逼近方程在该范围的真实解, 因此该算法本身就具有验证性质, 可以实现步步验证, 保证每一步的计算都准确, 从而得到可靠的计算结果。

## 4 讨论

本文提出的算法虽然能够适应相当多的曲面方程形式, 但这些曲面不能是凹凸起伏的, 否则算法中的一些思路是不可行的, 有幸的是飞行器上的天线罩要保持好的气动性能, 所以现今无需考

(下转第 39 页)

这些波形去噪后提取的主要特征量,均示于表1中。

表1 高度不同对特征量的数值影响

| 高度<br>(m) | 波形面积    | 波形峰值<br>(v) | 最大斜率          | 脉宽<br>(ms) |
|-----------|---------|-------------|---------------|------------|
| 0.80      | 0.029 4 | 5.599 7     | 2.1211e + 003 | 5.5        |
| 0.95      | 0.022 5 | 4.881 9     | 1.8848e + 003 | 4.9        |
| 1.30      | 0.013 0 | 3.709 4     | 1.7221e + 003 | 3.6        |
| 1.40      | 0.003 1 | 2.033 8     | 1.6660e + 003 | 2.3        |

从以上数据可以看出,辐射计距离目标的高度对输出信号的四个特征量均有影响:随着高度增大,波形面积、波形峰值、波形最大斜率及脉宽都显著减小,辐射计距离目标的高度是影响目标输出信号的一个重要因素。这与理论相吻合,从而验证了该实验方法的可行性。

(上接第35页)

虑凹凸起伏的曲面;另外,介质分界面不能简单地用一个曲面方程式表达时,用本文的算法无法求出射线与曲面的交点,但会对解决这类问题有参考价值。

## 5 结论

本文论述了已知天线罩各介质分界面曲面方程时,如何用数值方法中的二分法来计算射线和介质分界面的交点,所提出的算法直观、可靠,能够自我验证计算结果的正确性,能够适应相当多的曲面方程形式。

## 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,1993:380-395.

## 4 结 论

本文介绍了毫米波辐射计的缩比测试方法以及一个具体的测试实验。在满足一定条件下,缩比测试以较小的模型测试替代真实情况下的机载或塔载测试。该方法可以极其简便地在实验室进行,不仅可节省测试的巨额费用,而且为实验和研究工作带来极大的便利。

## 参 考 文 献

- [1] 李兴国. 毫米波近感技术及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1991.
- [2] 张祖荫,郭伟,文光华,等. 金属目标微波辐射特性的理论分析和缩比测量[J]. 华中理工大学学报,1994,(4).
- [3] 陈保辉. 雷达目标反射特性[M]. 北京:国防工业出版社,1993.
- [4] 金一庆,陈越. 数值方法[M]. 北京:机械工业出版社,2002:10-29.
- [5] 彭国伦. Fortran 95 程序设计[M]. 北京:中国电力出版社,2002:435-465.
- [6] 张路. 机载天线罩分析和设计的研究[D]. 西安:西北工业大学,2001.
- [7] M.A. Adel Moneum. Hybrid PO-MoM Analysis of Large Axi-symmetric Radomes [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 2001,49(12):1657-1666.
- [8] 汪茂光. 几何绕射理论[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社,1985:83-91.
- [9] Georges A. Deschamps. Ray Techniques in Electromagnetics[J]. IEE Pro, 1972, 60(9):1022-1035.
- [10] B. Phillips, et al. Ray Tracing Analysis of the Transmission Performance of Curved FSS[J]. IEE Proc., Microw. Antennas Propag, 1995,142(3):193-200.

## 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](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>