

[文章编号] 1009-1300(2005)01-0005-04

用改进的 GRECO 方法预估飞航导弹的 RCS

黄兴军, 戴全辉

(中国航天科工集团公司第三研究院, 北京 100074)

[摘 要] GRECO 方法是快速计算飞航导弹雷达散射截面(RCS)的有效手段. 在 GRECO 计算 RCS 原理分析的基础上, 针对原始 GRECO 算法对全尺寸导弹的 RCS 计算时误差较大的问题, 提出一种分区技术来改进计算精度, 并编程进行了检验计算. 结果表明, 这种技术能够根据目标尺寸自动调节分区数的大小, 保证足够的像素分辨率, 满足 RCS 计算速度和精度要求.

[关键词] 飞航导弹; RCS ; GRECO; 电磁散射

[中图分类号] TJ760.2

[文献标识码] A

RCS Prediction of Aerodynamic Missile by Using Improved GRECO

Huang Xingjun, Dai Quanhui

(The Third Research Academy, CASIC, Beijing 100074, China)

Abstract : GRECO is a fast RCS prediction method of aerodynamic missile. To improve original GRECO ' s lower precision for electrically large targets , a dividing zone technology has been introduced on the basis of GRECO mechanism analysis. The results of RCS computing show that the technology has capability to divide zones automatically and improve efficiency and precision of RCS prediction of aerodynamic missile under enough graphical pixel resolutions.

Keywords : aerodynamic missile ; RCS ; GRECO ; electromagnetic scattering

1 引言

RCS 理论预估技术是飞行器雷达散射特性研究的有力工具, 在飞航导弹隐身外形设计和分析中具有不可替代的作用. 在飞航导弹这类电大尺寸目标的外形优化设计过程中, 为提高优化设计效率, 要求 RCS 计算速度越快越好, 而为了确保 RCS 的计算精度, 在导弹 RCS 计算分析过程中, 要求对导弹各个部件之间的遮挡情况进行处理(即消隐处理). 采用传统的物理光学面元积分方法进行 RCS 计算时,

消隐处理是十分耗时的, 这将大大影响导弹隐身外形优化设计效率.

为提高飞行器等复杂目标的 RCS 计算速度, 西班牙学者 J. M. Rius 等人^{[2][3]} 提出了一种图形电磁计算技术(graphical electromagnetic computing, GRECO). 这是一种利用计算机图形硬件加速技术实现 RCS 可视化计算的方法, 与面元法等传统 RCS 计算方法相比, GRECO 方法具有如下优势:

(1) 自动消隐, 计算速度快;

(2) 利用 NURBS 参数化建模, 可降低面元噪声;

[作者简介] 黄兴军, 高级工程师.

[收稿日期] 2004-08-06

(3) 计算速度不依赖于目标的复杂度, 因此可以为分析复杂结构如雷达舱的 RCS 提供快捷的计算手段;

(4) 可与 CAD 系统无缝集成, 特别适合于隐身目标优化设计。

GRECO 方法首先在具有图形加速卡的高档工作站上实现, 随着微型计算机技术的发展, 微型计算机的图形性能得到了极大提高, 使得我们可以在普通微机上用 GRECO 方法计算飞行器的 RCS, 因而大大加快了飞航导弹的 RCS 计算速度, 这对实现导弹隐身外形优化设计具有重要意义。然而, 基于 Open-GL 图形标准的 Z-缓冲区方法的计算精度与计算机图形分辨率有关, 这使得电大尺寸目标的 RCS 计算将受到限制。例如, 估算长度为 8m 的导弹, 在图形分辨率 1024×768 条件下, 每个像素点对应的面元尺寸达到 7.8mm, 不能很好地模拟导弹的每一个细节, 计算时会产生较大误差。本文在分析 GRECO 的计算原理的基础上, 试图对 GRECO 方法提出一种分区改进措施, 以提高 GRECO 方法对全尺寸飞航导弹模型的 RCS 预估精度, 并给出了计算实例。

2 GRECO 的原理及其存在的问题

GRECO 利用高频近似方法计算 RCS, 主要涉及到物理光学和物理绕射理论两种高频散射场预估方法:

(1) 用物理光学法(PO)计算良导体的镜面散射;

(2) 用物理绕射理论(PTD)计算边缘绕射系数, 然后利用等效电磁流计算后向散射场。

下面简要介绍 GRECO 中镜面散射场和绕射场的处理方法。

2.1 物理光学场

根据 Stratton-Chu 积分方程, 在远场条件下, 目标的散射场可以表示为^[1]

$$\vec{E}^s = -jk\psi \iint_S \hat{k}_s \times [z_0 \hat{k}_s \times (\hat{n} \times \vec{H}) + \hat{n} \times \vec{E}] \exp(-2jk\vec{r} \cdot \hat{s}) ds. \quad (1)$$

式中 \vec{E} 和 \vec{H} 分别为目标表面总电场和磁场; \vec{E}^s 分别

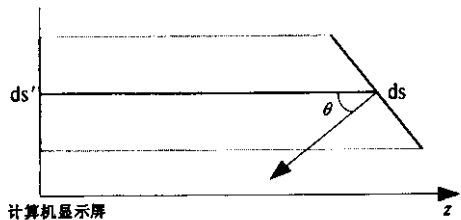


图1 面元投影关系

为散射电场和磁场; $\psi = \exp(-jkr)/4\pi r$ 为自由空间标量格林函数; \hat{n} 为曲面外法向; \vec{r} 为从参考点指向曲面上任意点的矢量; k 为波数; \hat{s} 为沿散射方向的单位矢量, 对于后向散射, $\hat{s} = -\hat{i}$ (\hat{i} 为入射波传播方向)。考虑到良导体目标表面切向电场为零, 根据物理光学假设, 后向镜面散射场可以表示为

$$\vec{E}_s = j2kZ_0\psi \int_S \vec{s} \times [\vec{s} \times (\hat{n} \times \vec{H}_i)] \exp(j2k\vec{r} \cdot \vec{s}) ds. \quad (2)$$

根据上式, 可以给出良导体表面散射体单站高频 RCS 近似表达式^[21]:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_S \cos\theta \exp(2jk\vec{r} \cdot \hat{s}) ds \right|^2. \quad (3)$$

其中, θ 为入射点处法向和入射方向的夹角; r 为入射点到观察点的距离; ds 为入射点邻域的面积。根据 GRECO 方法的思想, 屏幕上每点都对应散射体表面的一小块面元, 那么散射体表面的积分也就转化为对屏幕上每个像素点进行积分, 如图 1 所示。

$$ds' = ds \cdot \cos\theta. \quad (4)$$

并且由于满足远场条件, ds 到屏幕的垂直距离 $z \approx r$, 于是式(3)变为

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_{\text{screen}} e^{2jkz} ds' \right|^2. \quad (5)$$

将屏幕离散为大小一致的像素点, 则上式变为

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{\text{pixels}} e^{2jkz} \right|^2. \quad (6)$$

分析指出, 仅当像素点作为一个极小的天线辐射(即当它对应的面元 ds 为电小尺寸)时, 上式才成立。但是, 当掠入射即 $\theta \rightarrow 90^\circ$ 时, ds 可能很大而投射到屏幕上的 ds' 很小, 即像素点可能对应电大尺寸天线。所以, 不能简单地假设每个像素点作为一个极小的天线辐射。对这种情况的处理方法是,

将像素点等效为一个均匀辐射的矩形天线,它对远场的贡献可用 sinc 函数来近似,则上述物理光学积分式离散为^[3]

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{\text{pixels}} \text{sinc} \left(k \frac{l}{\cos\theta} \sin\theta \right) e^{2j k z} \Delta \right|^2. \quad (7)$$

其中, l 为屏幕上正方形像素点的边长, $l/\cos\theta$ 是该像素点对应面元 ds 的边长.

当用物理光学近似曲面的 RCS 时,经常出现的问题是 RCS 随频率变化曲线中存在“虚假振荡”,这些振荡是亮区和暗区交界处感应电流突变为 0 造成的. 根据高频散射理论,曲面单站 RCS 的贡献来源于镜面反射点,即该面法线与入射方向接近,即 $\theta \rightarrow 0^\circ$. 在阴影边界, $\theta \rightarrow 90^\circ$, 可不必修正镜面散射而通过乘上一个衰减函数 $\cos^n \theta$ 来消除振荡,即

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{\text{pixels}} \cos^n \theta \text{sinc} (k l \tan \theta) e^{2j k z} \Delta \right|^2. \quad (8)$$

其中 n 是控制驻相近似的调节因子.

2.2 边缘绕射

根据高频理论,边缘的远场散射可假设为边缘上等效线电流的辐射结果. 等效电磁流与入射角和观察角有关,因此,沿边缘边,它不是常数. 边缘的单站远区散射场为^[2]

$$\vec{E} = E_0 \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \int_{\text{edge}} [1 - D_{\parallel} \sin \gamma \hat{e}_{\parallel}^i - D_x \cos \gamma \hat{e}_{\parallel}^i - D_{\perp} \cos \gamma \hat{e}_{\perp}^i] e^{2j k z} dl'. \quad (9)$$

该处线积分沿着被入射波照射的边缘, \hat{e}_{\parallel}^i 和 \hat{e}_{\perp}^i 对应于平行或垂直于入射平面的方向矢量, γ 是入射电场与 \hat{e}_{\perp}^i 的夹角,而绕射系数的计算可参考文献[2].

2.3 GRECO 的基本实施过程

GRECO 计算 RCS 的基本过程是,在一定的光照模式下,通过计算机图形技术获得目标表面的像素信息,通过像素信息计算目标的 RCS . 其基本步骤包括:

(1) 获得目标几何外形数据

目标的几何模型包括面元 + 边缘和 NURBS (非均匀有理样条) 曲面两种,用面元 + 边缘的方式描述目标外形需要大量的面元,而 NURBS 曲面只需很少的曲面数量即可精确描述目标外形. 目标的几何外形数据可通过专业 CAD 软件来完成,利用有

关图形交换和接口技术将目标的几何外形数据输入到 RCS 计算程序中.

(2) 通过计算机图形加速卡获得特定光照条件下的图像信息

为了利用式(8)或(9)计算 RCS , 需要获得目标表面像素位置 (x, y) 及其法向信息 (n_x, n_y, n_z) . 其中,位置信息可根据像素在屏幕上的位置获得,而像素对应的法向信息可通过 Phong 光照模式下读取像素对应的三原色 (R, G, B) 分量获得^[2].

(3) 读取像素对应的 Z 缓冲区深度信息

为了计算目标表面各像素之间相位关系,还需要获得像素的 Z 坐标信息,这可通过读取 Open-GL 图形的 Z -缓冲区深度信息获得.

(4) 利用像素信息计算总的 RCS

通过(2)、(3)两步后,获得了目标表面各像素的位置信息 (x, y, z) 和法向信息 (n_x, n_y, n_z) , 利用式(8)或(7)就可以计算导体目标或涂覆吸波材料目标的 RCS , 而利用(9)可以计算边缘绕射,将镜面散射场和边缘绕射场叠加即可获得目标总的 RCS .

2.4 GRECO 存在的问题

分析表明,用 GRECO 方法计算 RCS 时,其计算精度与计算机视频分辨率相关,电尺寸很大且形状复杂的目标 RCS 计算将受到限制. 例如,估算长度为 8m 的导弹,在屏幕分辨率为 1024×768 像素时,每个像素对应的面元长度 $l = 8000/1024 \text{ mm} = 7.8 \text{ mm}$ 大小,而这个尺寸对于分辨复杂结构的电大尺寸目标来说是不够的,不能很好地反映导弹的局部细节,不满足像素应为电小尺寸近似的条件,从而影响 RCS 计算精度.

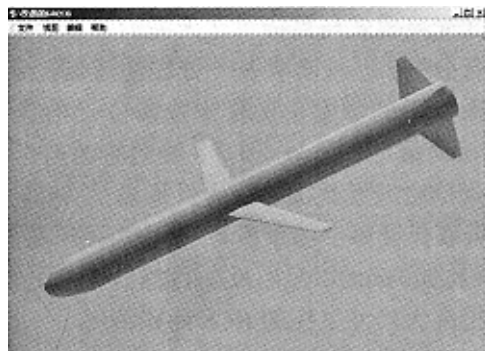


图 2(a) 某假想导弹模型

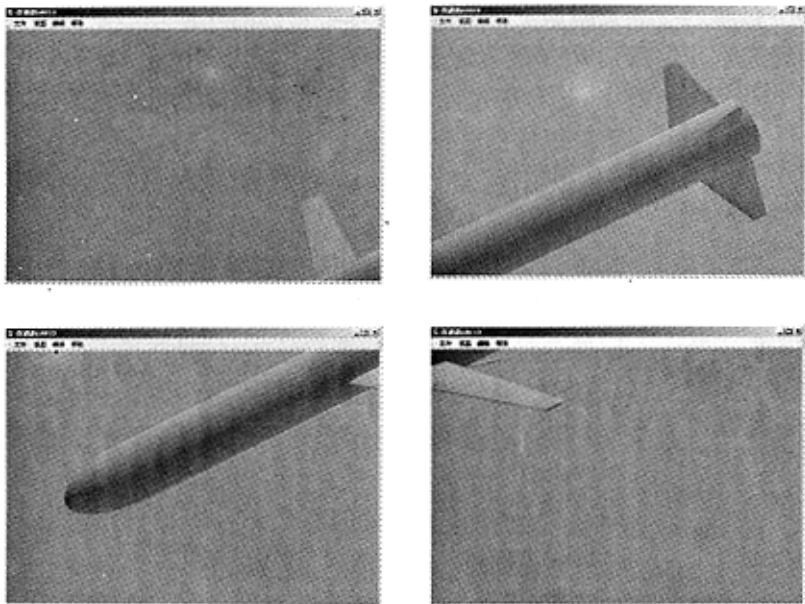


图 2(b) 某假想导弹模型分区显示图

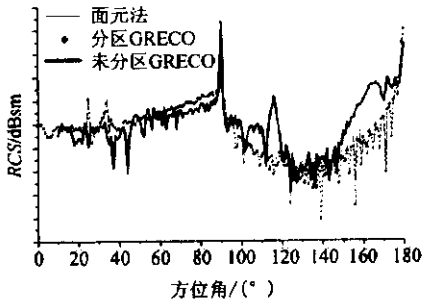


图 3 某假想导弹模型的 RCS 预估结果对比

3 改进方法

为改善这种状况,这里提出一种分区 GRECO 技术.分区 GRECO 的基本思想是,利用 GRECO 中平行光光照模式与目标尺寸无关的特点,将目标图像进行分割,通过读取各个分区的图像,分别处理各个图像中的像素,获取各像素位置信息(x, y, z)和法向信息(n_x, n_y, n_z),最后将各分区中所用的像素信息进行叠加,获得目标总的 RCS.通过分区,可以保证每个像素所对应的实际物理尺寸 l 足够小(比如 1mm),足以反映目标的各个局部细节,从而提高大尺寸目标的 RCS 计算精度.

4 算例

根据上述思想,利用 Borland Delphi 语言以及 Windows Open-GL 图形技术在微机上编制了飞行器 RCS 可视化预估程序,并利用该程序对某假想导弹模型的 RCS 进行了预估(图 2(a)为导弹模型分区前的 GRECO 图像,图 2(b)中的 4 张图分别为导弹分区后的 GRECO 子图像),并将结果与用物理光学面元法程序的计算结果进行了对比,如图 3 所示.从图 3 可见,未采取分区措施的 GRECO 的计算误差较大,而采取分区技术后, GRECO 与经过验证的经典面元法的计算结果基本一致.可见,利用分区方法可提高 GRECO 对大尺寸目标的 RCS 预估精度.

5 结论

根据飞航导弹的特点,对 GRECO 计算 RCS 的原理进行了分析,针对原始 GRECO 算法对全尺寸导弹 RCS 的计算精度不足的缺点,提出了分区技术改进计算精度,并编制了相应的计算程序.该计算程序能够根据导弹目标尺寸自动调节分区数的大小,保证屏幕像素有足够的分辨率,可满足 RCS 计算的要求,从而提高计算精度.

【参考文献】

- [1] [美] E. F. 克拉特,等著,阮颖铮,等译. 雷达散射截面——预估、测量和减缩 [M]. 北京:电子工业出版社,1988.
- [2] Rius(J. M.), FERANDO(M.), JOFRE(L.). GRECO: Graphical Electromagnetic Computing for RCS Prediction in Real Time[J]. IEEE AP Magazine 35, No. 2: 7~17.
- [3] Rius(J. M.), FERANDO(M.), JOFRE(L.). RCS of Complex Radar Targets in Real Time[C]. IEEE Trans. AP 41, No. 9: 1308~1319.
- [4] 彭晓明. OPEN-GL 编程技术 [M]. 北京:人民邮电出版社,1999.

雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、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。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

更多培训课程:

- **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>