

## 复杂目标高频区 RCS 的实时计算

于 洋 曾智勇 朱劲松 王宝发 周荫清  
(北京航空航天大学电子工程系, 北京, 100083)

COMPUTING HIGH-FREQUENCY RCS OF COMPLEX TARGETS IN REAL TIME

Yu Yang, Zeng Zhiyong, Zhu Jinsong, Wang Baofa, Zhou Yinqing  
(Department of Electronic Engineering, Beijing University  
of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

**摘 要** 提出一种在安装图形加速卡的高性能微机上实时计算复杂目标高频区雷达散射截面(RCS)的方法。该方法利用了“图形电磁计算(GRECO)”的新技术。目标用  $G^2$  Catmull-om(C-R)几何样条模拟,由图形加速卡硬件完成遮挡、消隐运算,运用 Phong 光照模型着色渲染目标可见表面,应用物理光学(PO)、等效电流法(MEC)、物理绕射理论(PTD)及阻抗边界条件(IBC)等方法计算目标高频区雷达散射截面(RCS)。

**关键词** 图形电磁计算(GRECO) 复杂目标 电磁散射

**中图分类号:** V243

**Abstract** A new approach is presented to compute the high-frequency radar cross section (RCS) of complex radar targets in real time, using a Personal Computer with a 3-D graphics hardware accelerator. This method implements a new technique called “Graphical Electromagnetic Computing(GRECO)”. The target is modeled with  $G^2$  Catmull-Rom(C-R) geometric spline and the image of the target is rendered and displayed on the screen in real time using Phong illumination model and the 3-D graphics accelerator, and then the high-frequency RCS can be computed through Physical Optics(PO), Method of Equivalent Currents(MEC), Physical Theory of Diffraction(PTD), and Impedance Boundary Condition(IBC) techniques.

**Key words** GRECO, complex radar targets, electromagnetic scattering

复杂军事目标的电磁散射计算问题在国际上倍受重视,近年来各国学者最新的研究成果中,GRECO 方法<sup>[1~3]</sup>具有很大优越性,主要表现在:

(1) 它用参数表面模拟目标外形,能更准确地模拟目标,大大减少对计算机存储量的要求,并且还可消除面元法中由虚假棱边造成的面噪声(facet noise);

(2) 由图形加速卡硬件完成遮挡和消隐计算,CPU 只需完成电磁部分计算,大大提高了运算速度;

(3) RCS 计算中的面积分和线积分通过对屏幕上目标的可视像素求和实现,因此,对于固定大小的视窗而言,计算目标 RCS 所需的计算时间及对存储量要求与目标复杂性和电尺寸无关。

本文提出一种在微机上安装图形加速卡,利用 Windows NT 上三维图形软件标准接口 OpenGL,从而在微机上实现 GRECO 技术的方法。该方法的实现使大多数微机用户只需在微机上安装一块图形加速卡,即可在微机上运行 GRECO 方法,从而给广大微机用户提供

极佳的性能价格比, 拓展了 GRECO 方法的应用空间。

## 1 $G^2$ Catmull-Rom(C-R)几何样条建模

采用近年来刚刚兴起的 Catmull-Rom 几何连续样条函数对目标进行几何建模, 它吸收了传统意义上插值样条函数和逼近样条函数这两大类样条函数的优点, 既可用于插值也可用于逼近, 相对于现在电磁散射几何建模中常用的 B 样条和 NUBRS 曲面而言, 具有直观、稳定、灵活、不需反求控制顶点等优点, 特别适用于对具有复杂外形的飞行器进行几何描述。

Catmull-Rom 样条<sup>[4]</sup> (简称 C-R 样条) 的一般形式为

$$F(u) = \sum_i P_i(u)N_i(u) \quad (1)$$

式中: 插值函数  $P_i(u)$  是由插值  $(k+1)$  个点矢  $V_i, \dots, V_{i+k}$  来构造的,  $k$  称为插值窗口宽度; 插值点  $V_i$  对应参数区间的节点, 即  $P_i(q) = V_q, q = i, i+1, \dots, i+k$ ; 调配函数  $N_i(u)$  只在参数

区间  $D$  内为非零, 第  $i$  个调配函数  $N_i(u)$  仅在开区间  $(i-1, i+1)$  内为非零, 且  $\sum_{i=0}^m N_i(u) = 1, u \in [0, m]$ 。给定矩形网格点  $P_{i,j}(i=0, \dots, m; j=0, \dots, n)$  及形状参数  $B_{1u}, B_{2u}$  和  $B_{1v}, B_{2v}$ , 则由  $(G^2, K=2)$  Catmull-Rom 样条生成的任意曲面块方程为

$$S_{i,j}(u, v) = \sum_{s=-2}^3 \sum_{t=-2}^3 5_{i,s}(2; B_{1u}, B_{2u}; u) P_{i+s, j+t} 5_{j,t}(2; B_{1v}, B_{2v}; v) \quad (0 \leq u, v \leq 1) \quad (2)$$

式中:  $5_{i,s}(2; B_{1u}, B_{2u}; u)$ ,  $5_{j,t}(2; B_{1v}, B_{2v}; v)$  为  $(G^2, K=2)$  Catmull-Rom 样条基函数。第  $(i, j)$  块曲面由 36 个顶点  $P_s(s=i-2, \dots, i+3; t=j-2, \dots, j+3)$  及形状参数  $B_{1u}, B_{2u}$  和  $B_{1v}, B_{2v}$  所决定。对目标进行几何描述以后, 即可应用图形软件标准接口 (Open GL) 和图形加速卡硬件对目标进行显示和消隐, 从而在微机上实现 GRECO 电磁计算。

## 2 目标图象生成

(1) Open GL<sup>[5,6]</sup> 作用机制 Open GL 是由 SGI, Microsoft, DEC, IBM 和 Inter 等多家计算机领域处于领导地位的世界著名计算机公司制定的一个通用共享的开放式三维图形标准, 使用 Open GL 可大大减轻三维图形应用的编程量。Open GL 和专对 Open GL 进行硬件加速的三维图形加速卡的结合使用, 可极大地提高微机的图形处理能力, 使微机的图形处理能力达到 GRECO 方法的要求, 从而在微机上实现 GRECO 方法。

本文所用的图形加速卡 AGC-300 以 Windows NT 下的 Open GL 作为其硬件接口。Open GL 在 Windows NT 下的作用机制为: Open GL 图形库封装在动态连接库 OPENGL32.DLL 内, 受客户程序调用的 Open GL 函数都先在 OPENGL32.DLL 中处理, 然后再传给 WIN32.DDI, 从而把图形命令送到视频驱动程序。图形卡的客户驱动程序 (Installable Client Driver, ICD) 加在客户一边, 硬件指定 DDI 被加到服务器一边, 完成图形卡对图形命令的加速支持。

(2) 目标图象的生成及显示 Open GL 基本图象生成、显示的步骤如下:

1 对  $(G^2, k=2)$  C-R 插值曲线构成的目标外形进行数学描述。本文取四边形对角线矢量叉积作为该小面元的法向矢量。

° 设置视景物。为使物体投影后相对大小尺寸不变, 应设置正射投影的视景物, 其为一个长方体形的平行管道。此视景物应大于物体, 否则在剪切变换过程中, 目标部分表面将被剪切掉; 同时应使物体图象尽可能充满整个窗口。

» 设置光照模型及物体材质(散射体物理特性)。运用 Phong 光照模型<sup>[7]</sup>着色渲染目标可见表面,光源设为方向性而非位置性的,且光强在传播过程中没有衰减。各单色光源均设为只有漫反射光而取消环境光和镜面发射光。材质也设为只反射漫反射光,而对环境光和辐射光均不起作用。由于颜色分量均为正值,而法矢则需区分其正负。因此,为区分法向分量在  $x, y, z$  各方向的大小和正负,需要不同颜色光源分别在  $\pm x, \pm y$  及  $z$  向照射。同时,为区分不同材质,需在  $x, y, z$  个方向设不同光源。

¼ 调用目标显示列表,快速将目标图象显示在屏幕上。

在绘制图形时,图形加速卡内存中必须为每个象素点均匀地保存其所有信息(包括颜色值、深度值等)。在 Open GL 中,这些数据存放在称为帧缓存(Framebuffer)的图形卡内存区。本程序从帧缓存的颜色缓存区读取(R, G, B)颜色分量来求取法向矢量,从帧缓存的深度缓存区读取  $z$  值(代表各点间的相互作用),用于目标图象的遮挡和消隐,即可得到电磁计算所需参量。在硬件进行图形计算时,它将每一可见面转换成一系列窗口内象素点,同时计算出从观察点到该点的距离,作为深度值。在每一象素点被显示出之前,将它的深度值与该点已存储的深度值作比较,如果新点深度值小于旧点深度值,即表示新点更接近观察点,则用新点颜色和深度值代替旧点已写入的颜色和深度值,表明新点可见而遮挡了旧点;相反,如果新点深度值比旧点更大些,表示新点比旧点更远离观察点,则表明旧点遮挡新点,新点为不可见,因而丢弃其颜色和深度值。这样就完成遮挡和消隐运算。这部分工作完全由硬件很快速完成,代替其它代码需由 CPU 来完成的最困难、最耗时的工作,从而大大提高运算速度。

### 3 可视化电磁散射理论模型<sup>[8]</sup>

对复杂目标进行几何建模、消隐处理和光照渲染后,在计算机屏幕上所生成的目标图象由象素点可分为代表目标面元片的影射点和代表目标棱边的影射点。并且在可视成象过程中,通过对光照模型中目标表面不同材质的设置,面象素中还分为理想导体和涂敷雷达吸波材料两种情况。对面象素的计算已有比较成熟的方法,下面主要介绍对棱边象素的判断和求解方法。

如果目标可见表面上的两个象素点的法向矢量不同,并且两象素点的深度值连续,此时判定两象素点的交界为一棱边象素。根据高频近似理论,棱边远区散射场可看成其上一等效线电流的辐射。此电流大小由入射方向和观察点相对棱边方位来决定,因而沿着棱边该值大小不为常数。等效电流通常表示为增量长度绕射系数的函数。等效电流计算棱边远区单站散射场,可表示为<sup>[1]</sup>

$$E^s = E_0 \frac{\exp(-jkr)}{2Pr} \int_{EDGE} [-D_{\parallel} \sin C e^{\mathbf{d}_{\parallel}} - D_x \cos C e^{\mathbf{d}_{\parallel}} - D_{\perp} \cos v e^{\mathbf{d}_{\perp}}] \exp(2jkz) dl \quad (3)$$

其中:线积分沿入射波所照明棱边进行; $\mathbf{d}_{\parallel}$ 和 $\mathbf{d}_{\perp}$ 是平行和垂直于入射面的单位矢量,该入射面由入射线 $\mathbf{d}$ 和棱边 $\mathbf{d}$ 的方向确定; $C$ 为入射电场和 $\mathbf{d}_{\perp}$ 的夹角; $D_{\parallel}, D_x, D_{\perp}$ 为单站增量长度绕射系数,运用雷达散射截面的定义即可得各种线极化的棱边 RCS 表示式<sup>[8]</sup>。

### 4 计算实例

图1为利用本文方法给出的某导弹 RCS 计算结果,可与参考文献[1]中的结果进行对比,计算结果证明了该方法的准确性、有效性和适用性。

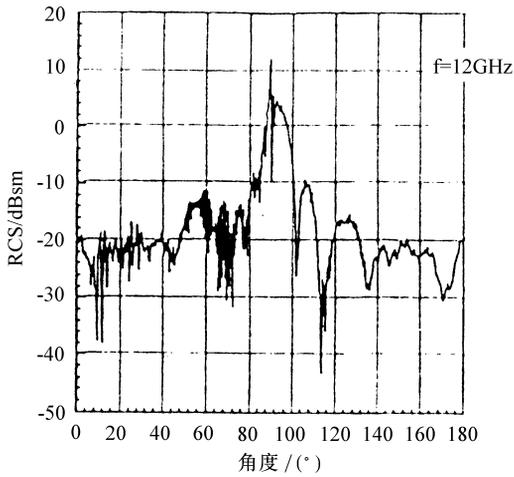


图1 某导弹 RCS 曲线  
(垂直极化, 限转角为  $0^\circ$ , 比例 1:1)

### 参 考 文 献

- 1 Rius J M, Jofre C. High-frequency RCS of complex radar targets in real time. IEEE Trans Antennas Propagant, 1993, 41(9): 1308~1319
- 2 Rius J M, et al. Recent techniques for RCS prediction of complex objects. Journées Inter de Nice Sur lec Antennas, Nice, 1994. 205~214
- 3 Gralia R I. Recent development of numerical techniques for the evaluation of RCS of conducting bodies. Joumoes In-ter. de Nice sur lec Antennas, Nice, 1994. 215~214.
- 4 Derose T D, Barsky B A. Geometric continnty, shape p arameters, and geometric constructions for catmull-rom splines. ACM Transactions on Graphics, 1988, 7(1): 1~41
- 5 徐建波. Visual C++ v4.0 中三维图形与动画功能库 Open GL 的使用. 电脑杂志, 1996, 12: 46~47
- 6 廖朵朵, 张华军编著. Open GI 三维图形程序设计. 星球地图出版社, 1996. 3~13
- 7 [美] 罗杰斯 D F 著, 计算机图形学的算法基础. 梁友栋, 石教英, 彭群生译. 北京: 科学出版社, 1990. 366~372
- 8 刘铁军等. 军用复杂目标几何外形及图形 RCS 计算基础. “目标环境特性”学术交流论文集, 北京, 1996. 133~146