GRECO 与行波求解低散射目标后向 RCS[1)]

宁焕生 蒋 欣 王宝发
(北京航空航天大学 电子工程系)

摘 要 GRECO(Graphical Electromagnetic Computing)技术是目前分析高频区复杂目标雷达散射截面(RCS)最有效方法之一.对低散射截面目标而言,行波效应往往贡献显著,在行波效应较强的某些区域,行波值甚至超过面元与棱边贡献,本文通过GRECO与行波混合法求解低散射目标后向RCS.利用低散射支架为实例,给出与实验结果符合良好的RCS曲线,具有工程实用价值.

关键词 电波散射; 雷达; 行波; 散射截面; 图形电磁计算(GRECO)
分类号 V 243.2

GRECO(Graphical Electromagnetic Computing)[1]方法被证明是一种用高频近似分析电大尺寸复杂目标RCS的最有效方法之一,它不仅能准确模拟目标,而且具有存储量小,运算速度快,实时性好的优点.同时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.

对大多数目标而言,其RCS的主要贡献者来自面元和棱边,GRECO法非常有效.但对于低散射目标而言,其面元与棱边效应已通过减缩技术处理而大大降低了其RCS贡献,此时仅用GRECO法对其求解面元与棱边的RCS贡献是不够的.必须针对具体情况,应用行波理论结合GRECO求解低散射目标的后向RCS是行之有效的.

本文利用微机上安装图形加速卡,在Windows NT环境下,利用三维图形软件标准接口OpenGL,在微机上实现GRECO方法.同时结合行波理论,拓广了GRECO方法在求解低散射目标RCS中的应用.

1 C-R样条与GRECO

本文采用Catmull-Rom[2,3]样条族中(G^2, k=2) Catmull-Rom几何连续样条函数对目标进行几何建模,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,特别适用于具有复杂外形的飞行器进行几何描述.由此生成GRECO光照模型的坐标点,经过后期建模为GRECO法生成面元索引与法矢文件.

利用硬件——图形加速卡完成遮挡与消隐计算,由CPU完成电磁部分软件计算,可大大提高运算速度.GRECO代码计算框如图1所示.

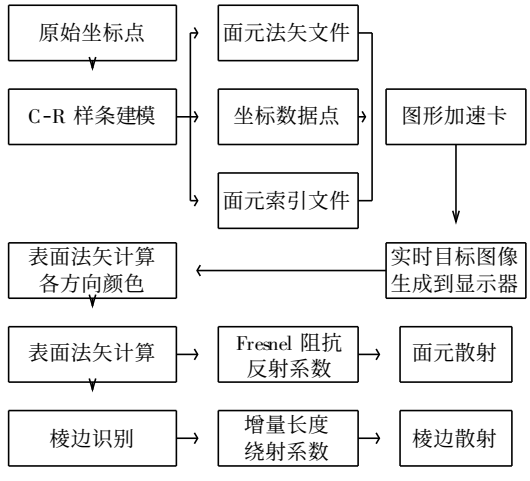


图1 GRECO工作框图

GRECO法应用以下方法求解高频电磁散射效应:

- 理想导体表面反射用物理光学进行计算;
- 涂覆雷达吸波材料表面反射用物理光学和阻抗边界条件结合进行求解;
- 棱边绕射用等效电流法和物理绕射理论加增量长度绕射系数进行求解.

2 GRECO法对低散射目标的面元与棱边散射场求解

1) 面元散射场求解

收稿日期: 1998-04-29 第一作者 男 24岁 博士生 100083 北京
1) 国家部委基金资助项目

由Strattorr Chu积分公式,当散射体内无电磁源时,散射场

$$\boldsymbol{E}^{s}(p)=\frac{1}{4\pi}\int_{s_{11}}[\mathrm{j}\omega\mu(\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{H}^{T})\phi_0+(\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{E}^{T})\times\nabla'\phi_0+(\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{E}^{T})]\nabla'\phi_0\mathrm{d}s+\frac{1}{4\pi\mathrm{j}\omega\varepsilon_0}\oint_{\Gamma}\nabla'\phi_0\boldsymbol{H}^{T}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}\tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{E}^{s}$ 为散射电场;$\boldsymbol{E}^{T}$,$\boldsymbol{H}^{T}$ 分别为总电磁场.

设入射方向为$-\boldsymbol{Z}$方向,则在单站条件下利用远场条件可得

$$\boldsymbol{E}^{s}(p)=-\frac{\mathrm{j}k\exp(\mathrm{j}kR)\boldsymbol{E}^{i}}{2\pi R}\cdot\int_{s_1}(\boldsymbol{z}\cdot\boldsymbol{n})\exp(2\mathrm{j}kz)\mathrm{d}z\tag{2}$$

由RCS定义,则

$$\sigma=\lim_{R\to\infty}4\pi R^2\left|\frac{\boldsymbol{E}^{s}}{\boldsymbol{E}^{i}}\right|^2=\frac{4\pi}{\lambda^2}\left|\int_{s_1}\cos\theta\exp(2\mathrm{j}kz)\mathrm{d}s\right|^2\tag{3}$$

将上式离散化并令每一像素为单一光源的方形面积,则其远场效应可用sinc函数来近似,因而离散化物理光学表面积分可表示为

$$\sigma=\frac{4\pi}{\lambda^2}\left|\sum_{p}\mathrm{sinc}(kl\tan\theta)\cdot\exp(2\mathrm{j}kz)\Delta s\right|^2\tag{4}$$

其中 θ 为每一方形像素 Δs 法矢方向与观察方向之间夹角;l 表示 Δs 所在屏幕上的线度;$l/\cos\theta$则表示该像素点所代表的原目标表面 Δs 的线度;p 为目标图像的像素集合.

根据高频电磁理论,弯曲表面单站RCS的贡献主要在于镜面反射点,在此点法矢靠近入射方向,当靠近照明区和阴影区交界处,由于相位的快速变化会导致数值方法计算物理光学表面积分出现一些误差,因而需用驻相法将其消除,可使用渐小函数 $\cos^{n}\theta$ 来消除奇变效应,同时不改变镜面反射系数,(4)式变为

$$\sigma=\frac{4\pi}{\lambda^2}\left|\sum_{p}\cos^{n}\theta\,\mathrm{sinc}\left(\frac{kl}{\cos\theta}\sin\theta\right)\cdot\exp(2\mathrm{j}kz)\Delta s\right|^2\tag{5}$$

其中 n 为控制该点驻相近似效应的参数.当 $n=0$,物体表面积分严格按离散化表面进行计算;$n>0$ 则可消除上述奇变效应.

至此,可用式(4)和式(5)进行计算求取面元散射场.

2) 棱边散射场求解

由高频电磁理论棱边远区散射场可用等效线电流法求解.其单站散射场可表示为

$$\boldsymbol{E}^{s}=E_0\frac{\exp(-\mathrm{j}kr)}{2\pi r}\cdot\int_{w}[-D_{/\!/}\sin\gamma\boldsymbol{e}^{i}_{/\!/}-D_x\cos\gamma\boldsymbol{e}^{i}_{/\!/}-D_{\perp}\cos\gamma\boldsymbol{e}^{i}_{\perp}]\exp(2\mathrm{j}kz)\mathrm{d}l\tag{6}$$

其中 线积分沿入射波所照明棱边 w 上进行,$\boldsymbol{e}^{i}_{/\!/}$ 和 $\boldsymbol{e}^{i}_{\perp}$ 是平行和垂直于入射面的单位矢量,该入射面由入射线 $\boldsymbol{z}$ 和棱边 $\boldsymbol{t}$ 的方向确定;γ 为入射电场和 $\boldsymbol{e}^{i}_{\perp}$ 的夹角;$D_{/\!/}$,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[1].

3) 综合表达式

将面元与棱边的散射效应综合起来,求得其面元与棱边对RCS的贡献.

• 同向水平极化

$$\sigma_{HH}=\frac{4\pi}{\lambda^2}\left|\Delta s\sum_{p}\cos^{n}\theta\,\mathrm{sinc}\left(\frac{kl}{\cos\theta}\sin\theta\right)\cdot\exp(2\mathrm{j}kz)+\frac{\lambda\Delta l}{4\pi^2}\sum_{w}\left[-D_{/\!/}\frac{t_x^2}{t_x^2+t_y^2}-D_{\perp}\frac{t_y^2}{t_x^2+t_y^2}\right]\cdot\exp(2\mathrm{j}kz)\right|^2\tag{7}$$

• 同向垂直极化

$$\sigma_{VV}=\frac{4\pi}{\lambda^2}\left|\Delta s\sum_{p}\cos^{n}\theta\,\mathrm{sinc}\left(\frac{kl}{\cos\theta}\sin\theta\right)\cdot\exp(2\mathrm{j}kz)+\frac{\lambda\Delta l}{4\pi^2}\sum_{w}\left[-D_{/\!/}\frac{t_y^2}{t_x^2+t_y^2}-D_{\perp}\frac{t_x^2}{t_x^2+t_y^2}\right]\exp(2\mathrm{j}kz)\right|^2\tag{8}$$

而对交叉极化,理想导体无贡献,因而其RCS表达式为:

• 水平发射-垂直接收的交叉极化

$$\sigma_{HV}=\left|\frac{\Delta l}{\lambda\pi}\sum_{w}\left[D_{/\!/}\frac{t_xt_y}{t_x^2+t_y^2}-D_{\perp}\frac{t_xt_y}{t_x^2+t_y^2}\right]\exp(2\mathrm{j}kz)\right|^2\tag{9}$$

• 垂直发射-水平接收的交叉极化

$$\sigma_{VH}=\left|\frac{\Delta l}{\lambda\pi}\sum_{w}\left[D_{/\!/}\frac{t_xt_y}{t_x^2+t_y^2}+D_{\perp}\frac{t_xt_y}{t_x^2+t_y^2}\right]\exp(2\mathrm{j}kz)\right|^2\tag{10}$$

式中 Δl 为像素点大小(线度);$D_{/\!/}$,$D_{\perp}$ 为绕射系数.

3　行波理论求解低散射目标后向 RCS

当电磁波以低入射角照射到细长光滑结构或电场的一个方向与目标表面相切并在入射平面内时, 会激起行波. 此行波效应使目标表面单元不能单独散射, 因为这些单元间通过沿表面传输的场而强烈耦合, 行波以接近光速在目标表面行进, 若目标表面出现不连续性(如缝隙、凸出物、楔状物等) 时, 此行波将返回, 并以一定分布规律朝来波方向散射, 形成行波后向散射(如图 2 所示) . 对飞行器目标的散射而言, 机翼机身表面连接处由于裂缝及间隙效应引起表面不连续, 故大表面的子区域会产生行波效应.

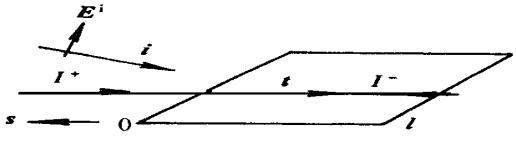


图 2　面状结构金属片行波效应示意图

图2 所示为一面状结构金属片行波效应示意图, 设目标电尺寸远大于电磁波波长时, 在平面波 $\boldsymbol{E}^{i}$ 的激励下, 沿目标表面激起沿 $\boldsymbol{t}$ 传播方向行进的电流I, 并在终端 l 处反射, 对后向散射而言, 反射的行波电流 I^{-} 将是该目标RCS 的主要贡献者, 此电流产生的辐射场为

$$\boldsymbol{E} = -\mathrm{i}k\psi_0\int Z_0 I^{-}\ \boldsymbol{s}\times(\boldsymbol{s}\times\boldsymbol{t})\mathrm{e}^{\mathrm{i}k\boldsymbol{r}\cdot\boldsymbol{s}}\mathrm{d}t \quad (11)$$

其中　ψ_0 为远场格林函数; $\boldsymbol{t}$ 沿行波电流行进方向的单位矢; k 为波数; Z_0 为波阻抗. 由图 2 所示之情况, 目标端点处是边缘, 因此可用 GTD 理论导出其等效电流形式为[4]

$$I^{-} = \frac{2\mathrm{i}(\boldsymbol{t}\cdot\boldsymbol{E}^{i})D}{kZ_0\sin^2\beta_i} + \frac{2\mathrm{i}(\boldsymbol{t}\cdot\boldsymbol{H}^{i})D_{\mathrm{m}}}{k\sin\beta_i} \quad (12)$$

$$D = \frac{\frac{1}{n}\sin\frac{\phi_i}{n}}{\cos\frac{\pi-\alpha_1}{n}-\cos\frac{\phi_i}{n}} + \frac{\frac{1}{n}\sin\frac{\phi_i}{n}}{\cos\frac{\pi-\alpha_2}{n}+\cos\frac{\phi_i}{n}} \quad (13)$$

$$D_{\mathrm{m}} = \frac{Q}{\sin\beta_i}\left[\frac{\cos\phi_s}{\sin\alpha_1}\cdot\frac{\frac{1}{n}\sin\frac{\pi-\alpha_1}{n}}{\cos\frac{\pi-\alpha_1}{n}-\cos\frac{\phi_i}{n}} - \frac{\cos(n\pi-\phi_s)}{\sin\alpha_2}\cdot\frac{\frac{1}{n}\sin\frac{\pi-\alpha_2}{n}}{\cos\frac{\pi-\alpha_2}{n}+\cos\frac{\phi_i}{n}}\right] \quad (14)$$

$$Q = 2\frac{1+\cos\beta_i\cos\beta_s}{\sin\beta_i\sin\beta_s}\cdot\sin\frac{\beta_s+\beta_i}{2}\sin(\beta_s-\beta_i) \quad (15)$$

$$\sin\alpha_1 = \frac{(\sin^2\beta_i-\sin^2\beta_s\cos^2\phi_s)^{\frac{1}{2}}}{\sin\beta_i} \quad (16)$$

$$\sin\alpha_2 = \frac{[\sin^2\beta_i-\sin^2\beta_s\cos^2(n\pi-\phi_s)]^{\frac{1}{2}}}{\sin\beta_i} \quad (17)$$

将(12) 式所表示的行波电流代入(11) 式(只对HH 极化, 且终端为劈状情况时) , 可得远区场近似表达式为

$$E_s = -\mathrm{i}kl\psi_0 I_0\sin\theta_0\cdot\frac{\sin\left[\frac{1}{2p}kl'(1-p\cos\theta)\right]}{\frac{1}{2p}kl'(1-p\cos\theta)} \quad (18)$$

其中　I_0 为 I^{-} 的幅度, 假定其沿行波方向为常数; θ 为观察点方向与表面上 $\boldsymbol{t}$ 向之夹角; l' 为行波行进短程线.

4　计算实例

图3 为某终端为凸棱边的低散射支架, 利用本文方法给出频率f = 37. 5 GHz 时, HH 波入射条件下的 RCS 计算结果, 从二者比较可看出, 在一定的空域内, 行波贡献大大超过了面元与棱边的RCS 贡献.

图4a为考虑了行波在内的计算总RCS值, 与

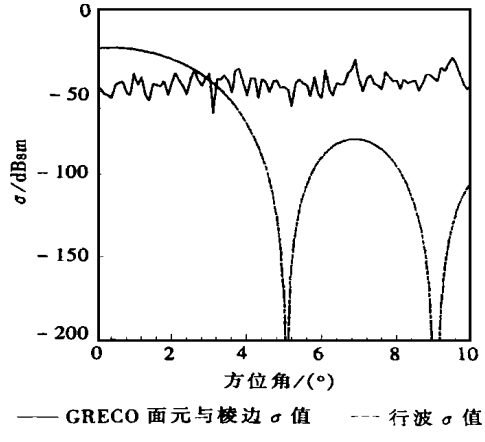
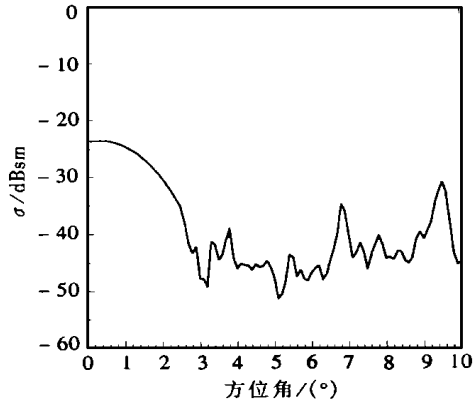
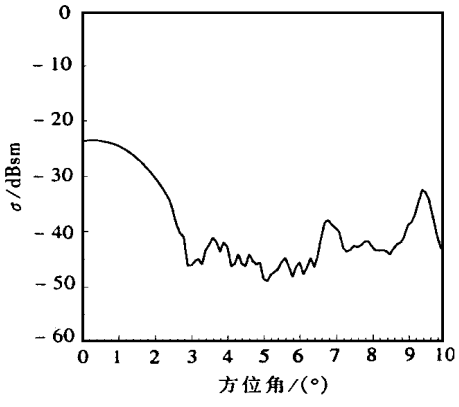


图 3　计算结果



a 计算总σ值



b 测量总σ值

图4 计算与测量结果比较

图4b实验数据进行对比,结果证明了该方法的准确性、有效性和适用性.

5 结束语

本文提出将行波理论用于对低散射目标的RCS计算,结合GRECO方法,拓宽了其在计算低散射目标领域中的应用.尤其对低RCS复杂目标而言,其几何形状已通过RCS减缩,此时须考虑行波等高阶散射,但目前对复杂目标的行波计算还有很多困难,例如对入射点与入射方向的判断、入射点处的曲率半径以及行波短程线的求解等都需进一步探索.

参考文献

1 Rius J M, Luis J. Highr frequency RCS of complex radar targets in real time. IEEE Trans Antennas Propagation, 1993, 41(9): 1308~1319

2 Tony D D, Brian A B. Geometric continuity, shape parameters, and geometric constructions for Catmull-Rom splines. ACM Transactions on Graphics, 1988, 7(1): 1~41

3 廖朵朵,张华军. OpenGL三维图形程序设计. 北京: 星球地图出版社, 1996

4 汪茂光. 几何绕射理论. 第2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994

RCS Computation of Low-Scattering Targets by Hybrid Method of GRECO and Traveling Wave Theory

Ning Huansheng Jiang Xin Wang Baofa

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Electronic Engineering)

Abstract GERCO(Graphical Electromagnetic Computing) is recognized as one of the most valuable methods of RCS computation for the highr-frequency region. To the low RCS target, the effect of traveling wave is remarkable and larger than that of facets and wedges in some cases. This paper shows satisfying results by using the hybrid method of GRECO and traveling wave theory. It gives the RCS curves of a low scattering prop, which are satisfying measured results. The results can have practical engineering worth.

Key words radio wave scattering; radar; traveling waves; cross section; graphical electromagnetic computing