

了复杂电大目标的分区显示与复杂部件的逐个显示的计算方法,方向等人<sup>[4]</sup>研究了像素对 GRECO 法精度的影响,给出了图形电磁计算中的图像分辨率的确定准则,并提出一种在位图渲染机制下提高图像分辨率的方法,在一定程度上提高了算法的计算精度.刘立国等人<sup>[5]</sup>成功的将离屏渲染技术引入到 GRECO 中,扩展了 GRECO 仿真电大尺寸目标的能力.

本文对精确提取像素几何信息方法进行部分改进,将其与基于帧缓存(FBO)的离屏渲染技术相结合,提出了一种 GRECO 的改进算法,克服了传统 GRECO 算法无法精确提取目标法矢信息和计算精度依赖于屏幕分辨率的缺点.在多次反射计算方面,将传统 GRECO 算法中基于像素面元的 AP/PO 算法进行了改进,同时,将传统的 AP/PO 算法中多次散射面元对判别方法进行了改进,提高了计算效率.

## 2 GRECO 算法改进

### 2.1 精确提取可见面元的几何信息

受显卡颜色深度位数限制,传统的 GRECO 算法在获取目标的几何参数方面存在着精度较低的问题.

为了能够精确提取像素的几何信息,文献[2]提出了一种精确提取像素几何数据的方法.该方法建立了一个面元序号——颜色 RGBA(A 表示 ALPHA 通道的值)映射,将每一个面元序号与一个颜色值一一对应,如式(1)所示:

$$C(i) = \text{RGBA}(i) = F(i), i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

式中, $i$  为面元序号, $C(i)$  为面元  $i$  的颜色值,RGBA( $i$ ) 为各个颜色分量的组合, $F(i)$  为面元序号  $i$  到面元颜色值  $C(i)$  的映射, $N$  为目标的面元总数.

通过该映射,在对目标面元绘制着色的过程中,不再使用 Phong 光照模型,而是使用由公式(1)中映射得到的颜色值.这样绘制完成后,目标的三维图形显示在屏幕上,像素的颜色值就代表其所属的面元序号.

在提取像素的颜色值时,假设某一像素的颜色值为  $C$ ,那么该像素所属面元的序号为:

$$i = F^{-1}(C) \quad (2)$$

式中, $F^{-1}$  为  $F$  的逆映射.

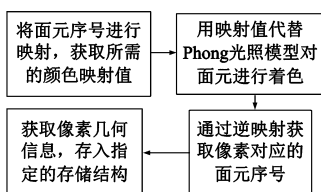


图1 精确提取像素几何信息流程图

样就可以准确地获得每个像素的几何信息.获取像素几何信息的流程图如图 1 所示.

基于精确提取像素几何信息方法,对其进行简要改进,就可得到目标的可见面元信息.精确提取可见面元几何信息的流程如图 2 所示:

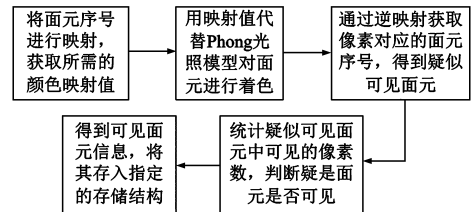


图2 精确提取可见面元几何信息流程图

### 2.2 离屏渲染技术

传统 GRECO 算法的计算精度依赖于屏幕分辨率的大小,而屏幕的分辨率是有限的,这就限制了 GRECO 算法在某些领域内的应用.为解决这个问题,分屏计算方法<sup>[3]</sup>和基于帧缓存技术的离屏计算方法<sup>[5]</sup>被提了出来.分屏计算方法在一定程度上扩展了传统 GRECO 的计算范围,然而这种方法存在着无法识别各个分区结合部分面元的问题.而离屏渲染技术则不仅可以有效地扩大传统 GRECO 算法的仿真能力,又没有分屏计算方法的问题,是一种有效解决传统 GRECO 计算精度问题的方法.

如图 3 所示,在目标被显示在屏幕上之前计算机会将显示所需的全部信息存储在帧缓存中,而后按照屏幕的分辨率将这些信息显示在屏幕上.如果在计算的过程中直接将存储在帧缓存中的信息用来计算,而不是将其显示到屏幕上,就可以克服计算精度和电大目标尺寸依赖屏幕分辨率的缺点.

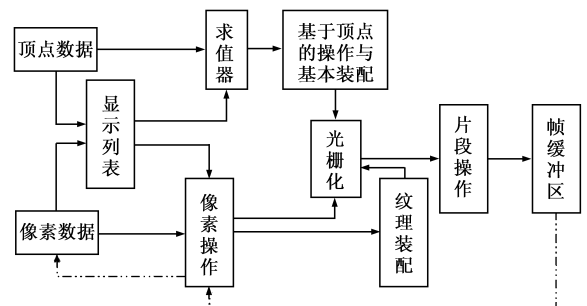


图3 计算机渲染图像流程

OpenGL 3.0 中引入的帧缓存对象<sup>[6]</sup>,可以根据计算需求和硬件的限制条件来创建所需要的帧缓存区,然后将目标直接渲染到所创建的帧缓存区中,从中提取目标的相关信息即可用于雷达散射计算.离屏渲染的步骤如下:

#### (1) 创建帧缓存对象 FBO.

此时,可以得到该像素所属面元的序号,而每个面元的初始姿态法向量和目标的实时姿态是已知的,这

- (2) 绑定帧缓存对象 FBO.
- (3) 创建渲染缓存区对象 (Renderbuffer Object).
- (4) 绑定渲染缓存区对象.
- (5) 设置渲染缓存的数据格式和尺寸.
- (6) 将渲染缓存区对象关联到 FBO.
- (7) 检查 FBO 是否完整.

在一台普通台式计算机中,可以创建最大分辨率为  $30000 \times 30000$  的帧缓存区,而主流显示器的最大分辨率不超过  $2500 \times 1600$ . 由此可见,使用离屏渲染技术可极大地扩展 GRECO 算法的仿真能力,克服屏幕分辨率对其精度的影响.

### 2.3 改进的 GRECO 算法

基于精确提取可见面元几何信息方法和离屏渲染技术,得到改进的 GRECO 算法,计算步骤为:

- (1) 将目标用三角面元进行拟合.
- (2) 将目标导入程序中,并根据每个面元的编号,建立编号——颜色映射表.
- (3) 利用离屏渲染技术和精确提取可见面元几何信息技术,得到可见面元信息.
- (4) 利用得到的可见面元信息,使用物理光学法 (PO) 等算法,对目标进行 RCS 计算.

这种算法仅利用图形硬件进行消隐,摒弃了传统 GRECO 算法中基于像素面元的 RCS 计算方法,利用提取的可见面元进行 RCS 计算,规避了在大角度下由于像素面元无法准确还原目标外形特征而带来的计算误差. 如图 4 所示,为传统 GRECO 算法中目标微元与屏幕像素的关系,式(3)为传统 GRECO 中 RCS 计算公式<sup>[1]</sup>.

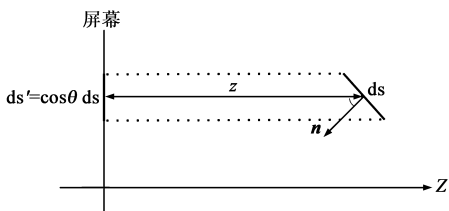


图4 目标微元面及其在屏幕上的投影

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_{\text{Screen}} e^{2jkz} ds' \right| \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  为入射波波长,  $z$  为观测点到面元的距离,  $ds'$  为面元  $ds$  在屏幕上投影 (如图 4 所示,  $ds' = \cos\theta ds$ ,  $\theta$  为入射波与像素所对应面元法向矢量的夹角),  $k$  为波数, 积分是在屏幕显示可见面元上进行的.

从图 4 和式(3)可以看出,传统的 GRECO 算法实质上是通过像素来还原目标的几何特征分布而进行 RCS 计算的. 因此,当目标表面与入射电磁波的夹角  $\theta$  增大到一定程度时,就会出现使用像素无法准确地还原目标的几何特征分布的问题,使 RCS 计算出现较大误差.

而改进的 GRECO 算法则不存在上述问题,其基于物理光学法 (PO) 的 RCS 计算公式为<sup>[7]</sup>,

$$\sqrt{\sigma} = -j \frac{k}{\sqrt{\pi}} \oint_s \mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_r \times \mathbf{h}_i e^{2jkr \cdot \mathbf{i}} ds \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{n}$  和  $\mathbf{r}$  分别为面元的法向量和位置矢量,  $\mathbf{e}_r$  和  $\mathbf{h}_i$  分别为接受装置的电矢量方向和入射波的磁极化方向.

以  $1\text{m} \times 1\text{m}$  正方形平板为例来验证改进 GRECO 算法的准确性. 计算其在频率为 10GHz 的垂直极化平面波下的 RCS 值,使用分辨率为  $4000 \times 4000$  的帧缓存区来计算平板的后向散射 (忽略棱边绕射),结果如图 5 所示.

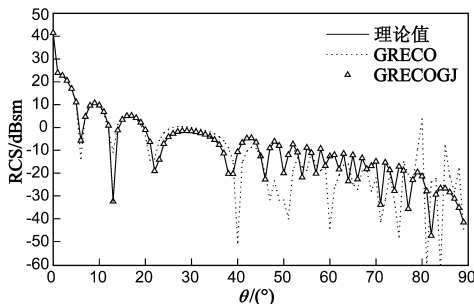


图5  $1\text{m} \times 1\text{m}$  正方形平板 RCS (VV)

从图 5 中可以看出:传统 GRECO 的结果随着入射角  $\theta$  的增大,与理论值的偏差亦逐渐增大,特别是当  $\theta \rightarrow 90^\circ$  时, RCS 值剧烈变化,而改进的 GRECO 算法的结果与理论值较为接近,从而验证了改进 GRECO 算法的正确性.

### 3 多次反射计算

传统的 GRECO 算法存在着多次计算困难的问题,而对于目标的多次反射计算实际上已有了多种成熟的计算方法,如区域投影/物理光学法 (AP/PO)<sup>[8]</sup>,迭代物理光学法 (IPO)<sup>[9]</sup>,射线追踪法 (SBR)<sup>[10]</sup> 等多种算法. 如何将这此算法引入 GRECO 中是一个亟待解决的问题. 文献[11]在 GRECO 中使用射线追踪法 (SBR) 来进行目标的多次反射计算,由于传统 GRECO 算法无法精确提取面元几何信息,对目标的多次反射计算结果的精确性造成不利影响.

AP/PO 算法是在物理光学法基础上,结合几何光学法和射线追踪法,导出的一种可有效计算复杂目标多次散射的高频算法. AP/PO 法利用 PO 计算目标的一次散射,而后通过几何光学法 (GO) 计算面元的反射磁场和反射方向,根据反射磁场的反射方向找到照射面元的二次反射面元,将照射面元在二次反射面元上投影,确定投影区域与二次反射面元相交的公共区域,使用 PO 计算其二次反射,最后将所有的一次散射和二次

散射迭加,得到总的反射场。

与传统的 GRECO 算法不同,基于文中改进的 GRECO 算法,可以很方便地使用 AP/PO 算法.其多次反射计算步骤为:

**步骤 1** 将目标用三角面元进行拟合.

**步骤 2** 使用图形显卡得到所有可见面元信息.

**步骤 3** 计算可见面元  $f_1$  的单次散射场.

**步骤 4** 利用几何光学法确定可见面元  $f_1$  经入射波照射后的反射场和反射方向,作为该面元经反射后可能照射到其他面元  $f_2$  的二次入射场和入射方向.

根据几何光学法,反射方向可以表示为

$$\hat{S}_r = \hat{i} - 2(\hat{i} \cdot \hat{n}_1)\hat{n}_1 \quad (5)$$

式中,  $\hat{S}_r$  和  $\hat{i}$  分别为反射方向和入射方向,  $\hat{n}_1$  为可见面元  $f_1$  的法向量.

令  $\hat{e}'_{\perp} = \hat{i} \times \hat{n}_1 / |\hat{i} \times \hat{n}_1|$ ,  $\hat{e}'_{\parallel} = \hat{e}'_{\perp} \times \hat{i}$ ,  $\hat{e}'_{\perp} = \hat{e}'_{\perp}$ ,  $\hat{e}'_{\parallel} = \hat{e}'_{\perp} \times \hat{S}_r$ , 设入射电场和反射电场分别是  $E_i, E_r$ , 则有

$$E_r = (E_i \cdot \hat{e}'_{\parallel})\hat{e}'_{\parallel} - (E_i \cdot \hat{e}'_{\perp})\hat{e}'_{\perp} \quad (6)$$

**步骤 5** 通过几何光学寻迹法寻找可见面元  $f_1$  的照射面元  $f_2$ , 并通过区域投影法<sup>[8]</sup>(如图 6 所示)得到可见面元  $f_1$  在照射面元  $f_2$  上投影区域与面元  $f_2$  的公共区域  $a$ .

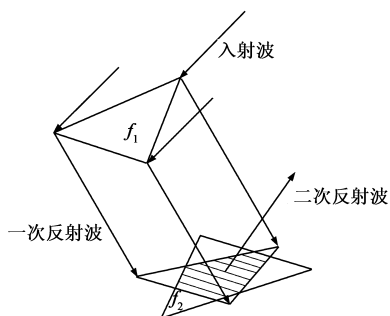


图6 区域投影法示意图

**步骤 6** 在公共区域上作物理光学积分,便得到二次反射场.

**步骤 7** 转到步骤 4 进行下一次反射计算.

在搜索可能的多次散射面元对时,常用的判断准则为<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} C_{12} \cdot n_1 > 0 \text{ 且 } C_{12} \cdot n_2 < 0 \\ i - [i \cdot (n_1 \times n_2)](n_1 \times n_2) \neq 0 \\ \alpha = \arccos(s \cdot C_{12} / |C_{12}|) \leq \alpha_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $C_{12}$  为面元 1 的几何形心指向面元 2 几何形心的矢量,  $n_1$  和  $n_2$  分别为面元 1 和面元 2 的表面外法向矢量,  $i$  为入射波单位矢量,  $s$  为反射方向单位矢量,  $\alpha$  为  $C_{12}$  与反射方向  $s$  的夹角,  $\alpha_0$  为设置的上限角度.

这种判定方法虽然能够找到所有可能的多次散射

面元对,在实际计算中,在某些情况下  $\alpha_0$  必须取较大的数值才能搜索到所有可能的二次照射面元,而  $\alpha_0$  的增加将导致计算量提高,降低运算效率.为解决这个问题,对原判定准则进行改进:

$$\begin{cases} C_{12} \cdot n_1 > 0 \text{ 且 } C_{12} \cdot n_2 < 0 \\ i - [i \cdot (n_1 \times n_2)](n_1 \times n_2) \neq 0 \\ d = |C_{12}\sqrt{1 - (s \cdot C_{12} / |C_{12}|)^2}| \leq d_0 \end{cases} \quad (8)$$

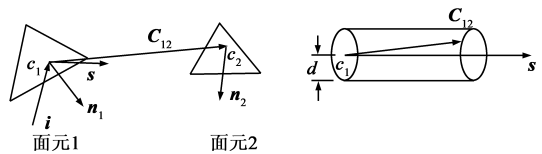


图7 多次散射面元对搜索示意图

如图 7 所示,  $d$  为面元 2 的几何中心点  $C_2$  到反射方向  $s$  所在直线的距离.通过合理地设置  $d_0$  的数值可以在计算的过程中快速地找到所有可能的二次照射面元.

角反射器是典型的多次散射结构,该模型对于多次散射的计算方法也有着很好的验证效果.对于二面角反射器来说,由式(9)可知(式中,  $\alpha$  为二面角夹角,  $m$  为反射次数),电磁波不会在两板间无限次反射.从公式中可以看出,在  $90^\circ$  二面角中电磁波会产生二次反射,而在  $60^\circ$  二面角中电磁波会产生三次反射.

$$\alpha \geq \frac{180^\circ}{m} \quad (9)$$

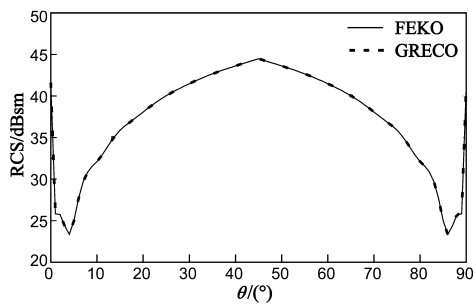
在此,分别以边长 1m 的  $90^\circ$  二面角和  $60^\circ$  二面角为例,验证改进多次反射程序的正确性.计算其在频率为 10GHz 的水平极化平面波下的 RCS 值.分别采用改进的 GRECO 方法和 FEKO 软件进行计算,结果对比如图 8 所示.结果吻合较好.

表 1 中给出了不同算法的二面角二次反射计算时间,分别为为未经过多次搜索改进的 GRECO 方法、经过多次搜索改进的 GRECO 方法的多次散射计算时间,表中,提高效果 = (搜索未改进计算时间 - 搜索改进计算时间) / 搜索未改进计算时间.从表中可以看出,经过改进后计算时间大幅减小,计算效率提高了 95% 左右,计算效率大为提高.

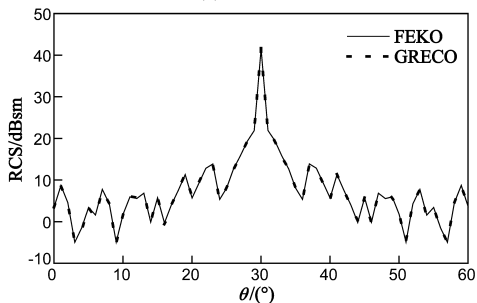
表 1 不同算法的二面角二次散射计算时间

	90°二面角		60°二面角	
	时间(s)	提高效果	时间(s)	提高效果
搜索未改进	4952	—	16981	—
搜索改进	227	95.4%	832	95.1%

如图 9 为某导弹模型,长 1m,翼展 0.6m,入射波频率为 10GHz,垂直极化,水平扫描.图 10 为考虑了多次散射的单站 RCS 计算结果.



(a) 90°二面角



(b) 60°二面角

图8 二面角二次散射结果(HH)

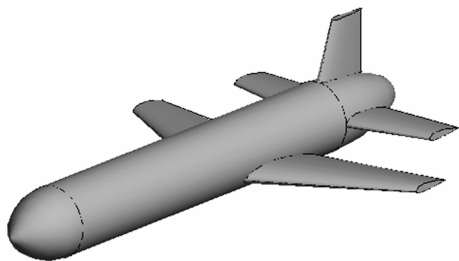


图9 导弹模型

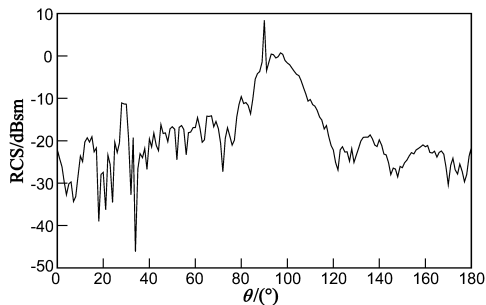


图10 导弹RCS

## 4 结论

针对传统 GRECO 算法中存在的不足之处,提出了一种基于精确提取目标可见面元信息和离屏渲染技术的改进算法,对传统 GRECO 算法中基于像素面元的多次散射计算方法和二次反射面元判别方法进行了改进,并在数值分析中验证了改进方法的正确性。

(1)精确提取目标可见面元信息保证了传统 GRE-

CO 算法在计算 RCS 时能够得到准确的目标信息,而离屏渲染技术的引入使得传统 GRECO 算法在计算 RCS 时突破了屏幕分辨率对其精度的限制。

(2)将传统 GRECO 算法中基于像素面元的多次计算方法改为基于三角面元的多次散射计算方法,并对常用的多次散射面元对判别方法进行改进,这种改进方法极大地提高了 GRECO 算法的多次反射计算速度,改进后的计算时间仅为未改进前计算时间的 5% 左右。

## 参考文献

- [1] Rius J M, Ferrando M, Jofre L. GRECO: Graphical electromagnetic computing for RCS prediction in real time[J]. Antennas and Propagation Magazine, IEEE, 1993, 35(2): 7-17.
- [2] 刘佳. 复杂目标多次散射问题研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010. 34-36.  
LIU Jia. Research on Multiple Scattering of the Complex Targets[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. 34-36. (in Chinese)
- [3] 严靖峰, 徐鹏根. RCS 预估中图形电磁学方法的改进[J]. 电波科学学报, 1998, 13(3): 313-317.  
YAN Jingfeng, XU Penggen. Improved methods for graphical electromagnetic computing in RCS prediction[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1998, 13(3): 313-317. (in Chinese)
- [4] 方向, 苏东林, 刘焱. 像素对图形电磁计算精度的影响和解决方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(4): 373-376.  
FANG Xiang, SU Donglin, LIU Yan. Influence of pixels to graphical electromagnetic computing accuracy and its solution methods[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(4): 373-376. (in Chinese)
- [5] 刘立国, 张国军, 莫锦军, 等. 基于图形电磁学的雷达散射截面计算方法改进[J]. 电波科学学报, 2012, 27(6): 1146-1151.  
LIU Ligu, ZHANG Guojun, MO Jinjun, et al. Improvement of graphical electromagnetic computing method for radar cross section[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(6): 1146-1151. (in Chinese)
- [6] Shreiner D W M N J. Open GL Programming Guide[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009. 526-540.
- [7] Knott E F, Shaeffer J F, Tuley M T. Radar Cross Section[M]. Artech House: SciTech Pub, 2004. 189-191.
- [8] 赵维江, 龚书喜, 刘其中, 等. 复杂目标多次散射计算的高频混合方法研究[J]. 微波学报, 1999, 15(4): 386-390.  
ZHAO Weijiang, GONG Shuxi, LIU Qizhong, et al. A hybrid high-frequency technique for computing multiple scattering from complex targets[J]. Journal of Microwares, 1999, 15(4): 386-390. (in Chinese)
- [9] 聂小春, 葛德彪, 阎玉波. IPO-MoM 混合法分析开槽电大

目标的电磁散射[J]. 电子学报, 1999, 27(9): 108 - 110.

Nie Xiaochun, Ge Debiao, Yan Yubo. Hybrid analysis of the electromagnetic scattering of a large body with cracks[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(9): 108 - 110. (in Chinese)

- [10] Hao L, Chou R C, Shung-Wu L. Shooting and bouncing rays: Calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity[J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 1989, 37(2): 194 - 205.

[11] 杨正龙, 金林, 李蔚清. 基于 GPU 的图形电磁计算加速算法[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1056 - 1060.

Yang Zhenglong, Jin Lin, Li Weiqing. Accelerated GRE CO Based on GPU[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6): 1056 - 1060. (in Chinese)

#### 作者简介



崔俊伟 男, 1989 年 4 月出生, 湖北襄阳人. 现大连理工大学船舶工程学院在读硕士研究生, 从事计算电磁学及船体结构有关研究.

E-mail: cuijunwei1010@mail.dlut.edu.cn



杨 颢(通信作者) 女, 1975 年 10 月出生, 辽宁沈阳人. 现为大连理工大学副教授、硕士生导师, 主要从事舰船隐身性研究和海工钢结构动力分析.

E-mail: yyang@dlut.edu.cn