

# 复杂目标 RCS 计算的新方法——曲面像素法<sup>1</sup>

昂海松 舒永泽 周建江 张铁兵 彭芸

(南京航空航天大学电子工程系 南京 210016)

**摘要** 该文提出一种计算复杂目标高频 RCS 的“像素法”，论述了“像素法”的特点以及与 GRECO 方法的不同点。该文还提出一种新的“曲面像素法”，并给出各种不同“像素法”计算高频目标 RCS 结果的比较分析，证实“曲面像素法”在提高目标的 RCS 特性分析计算精度方面的突出优点。文中还给出运用曲面像素法计算多种复杂目标体的分析实例。

**关键词** RCS 计算，曲面，像素法

**中图分类号** TN951, TN911.74

## 1 引言

目前，高频雷达目标 RCS 的计算分析方法，主要有面元法 (Panel method)、射线跟踪法 (Shooting and bouncing ray) 和时域有限差分法 (FDTD) 等。在面元法发展的基础上，1993 年西班牙 J.M.Rius 等学者提出了一种“图形电磁计算法” (GRECO: Graphical Electromagnetic Computing)<sup>[1,2]</sup>。该方法是利用专门的软件，生成用颜色色度表示的目标表面几何信息，直接利用工作站图形软件生成的“Z-Buffer”储存信息，从而方便地解决了复杂目标的遮挡消隐问题。GRECO 方法成功地将计算机图像图形学应用于 RCS 计算，但该方法主要有如下缺点：一是目标表面法向矢量重复计算：GRECO 法先利用专门 CAD 软件作目标体三维造型，计算目标表面像素法向矢量，作图显示，并储存像素坐标信息；然后再用另外的程序从计算机屏幕显示的彩色图像重新获取和反算表面法向矢量。二是由屏显的图像获取目标表面“法矢”的直角坐标正负六个分量值，则每个方位必须计算两次，因为一次彩色图像只能显示法向矢量的三个 (或四个) 分量值<sup>[1]</sup>。实际上，该方法对目标法向矢量分布作了四次的重复计算。参考 GRECO 方法，本文提出一种改进的计算复杂目标 RCS 的“曲面像素法”。

## 2 “像素法”的概念和基本理论

“像素” (Pixels) 是计算图形图像学的概念，是在计算机屏幕上组成实体图像的最小单位 (以屏幕分辨率不同而尺寸有异的微小正方形)。利用计算图形学方法，可以将目标实体的三维几何信息，在计算机屏幕上用许多颜色色度变化的像素来显示。这些像素点，可以看作是雷达射线与目标表面相交的点集。图像显示时实体在屏幕上同一像素位置的投影只取实体表面最近的点，因而使复杂目标的消隐问题处理大大简化了 (图 1)。

### 2.1 表面散射场的计算

我们知道，对于理想导体表面的电磁散射场强 (假设该点附近曲率半径比波长大多) 在后向散射情况下，可简化为

$$\bar{H}^s = \frac{-jk_0 e^{-jk_0 R}}{2\pi R} \bar{H}^i \int_{S_i} e^{2jk_0 z} dx dy \quad (1)$$

<sup>1</sup> 1999-03-23 收到，1999-11-09 定稿。  
国家自然科学基金资助项目

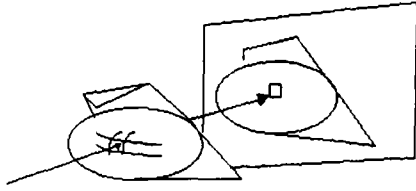


图 1 投影与像素

其中  $k_o$  是入射波波数,  $H_i$  是入射磁场强度. 对于复杂曲面目标, (1) 式积分困难, 若离散为足够小的许多平面 (像素), 又由雷达散射截面的定义, 对于像素法可推导出

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_{\text{图像}} e^{2jk_o z} ds' \right|^2 \quad (2)$$

其中  $ds'$  表示实体在“屏幕”上投影的像素面积  $ds' = \cos\theta ds$ ,  $\theta$  为法向矢量与射线的夹角. 于是

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{\text{像素}} \text{sinc}(K_o \frac{1}{\cos\theta} \sin\theta) e^{2jk_o z} \right|^2 \quad (3)$$

这里,  $\lambda$  为雷达波波长,  $l$  为像素元对应的实际边长.

## 2.2 边缘绕射场的计算

关于边缘绕射场对 RCS 的贡献, 我们采用了 Michael 所发展的等效边缘电流法<sup>[3]</sup>, 由线积分来求边缘棱角绕射场:

$$E^d = -jk\psi \int_c [ZI_e \hat{s}(\hat{st}) + I_m \hat{st}] e^{jk\hat{r}\hat{s}} dl \quad (4)$$

这里,  $t$  为边缘切向单位矢量,  $\psi$  为格林函数,  $c$  为边缘. 曲线边缘积分可用离散化直线段组进行计算. 其边缘等效磁流和等效电流分别为

$$I_e(\beta = \pi - \beta', \phi = \phi'') = E_Z^i \frac{2j}{k \sin^2 \beta'} [D_e - D'_e] - H_Z^i \frac{4j \cos \beta'}{k \sin \beta'} [D_{em} \sin \beta' - D'_{em}] \quad (5)$$

$$I_m(\beta = \pi - \beta', \phi = \phi) = H_Z^i \frac{2j}{k \sin^2 \beta'} [D_m - D'_m] \quad (6)$$

其中  $H_Z^i, E_Z^i$  为入射场强在坐标原点的  $Z$  向分量;  $D_e, D_m, D_{em}$  分别为

$$D_e = \frac{\sin(\pi/n)}{n} \left[ \frac{1}{\cos(\pi/n) - 1} - \frac{1}{\cos(\pi/n) - \cos(2\phi/n)} \right]$$

$$D_m = \frac{\sin(\pi/n)}{n} \left[ \frac{1}{\cos(\pi/n) - 1} + \frac{1}{\cos(\pi/n) - \cos(2\phi/n)} \right]$$

$$D_{em} = \frac{2\cot\beta'}{n} \left\{ \frac{\cot\phi \sin[(\pi - \phi)/n]}{\cos[(\pi - \phi)/n] - \cos(\phi/n)} - \frac{\cos(n\pi - \phi) \sin[(\pi + \phi)/n]}{\cos[(\pi + \phi)/n] - \cos(\phi/n)} \right\}$$

式中  $D'_e, D'_m, D'_{em}$  为物理光学项:

$$D'_{em} = 0$$

$$D'_m = -\frac{1}{2} [U^+ \tan \phi - U^- \tan(n\pi - \phi)]$$

$$D'_e = -\frac{1}{2} [U^+ \tan \phi - U^- \tan(n\pi - \phi)]$$

$$U^+ = \begin{cases} 1, & \text{上劈面被照射,} \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad U^- = \begin{cases} 1, & \text{下劈面被照射} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

像素法的边缘遮挡消隐计算：首先由小边缘直线段的两端点与表面像素的关系，来确定该小段是全部被遮挡还是部分被遮挡；如果是部分被遮挡，则再由几次“黄金分割法”搜索，来确定该小段的可见部分。这一方法，较好地解决了板块法处理边缘段部分被遮挡情况下难于计算交点的问题。

### 3 像素法的特点

#### 3.1 广义像素

通常“像素”(Pixels)是指计算机屏幕图像的严格像素，像素的个数受到屏幕的限制，而目标实际尺寸大小范围很广，因此，每个像素所表示的目标实际尺寸相差很大，可能出现所表示的实际曲面拱高电尺寸过大，导致 RCS 计算误差过大的情况。

为此，我们提出“广义像素”的概念：即根据实际目标电尺寸的大小来确定“像素”合理的比例尺寸。“广义像素”不同于计算机屏显的像素，可以保证每个像素所对应的目标实际曲面拱高电尺寸在规定的范围之内。

#### 3.2 像素法在目标遮挡消隐上的优点

目标高频雷达截面计算可只计算目标照射区的贡献(除表面行波外)，因而可用光学方法对目标阴影区作消隐。常见的“面元法”(又称板块法)，以有限个板块小平面集合来近似复杂目标表面。当目标物体有多个部件组合时，由于面元的大小、形态和位置都不相同，计算分析相互遮挡情况很繁杂，且必须对每一面元与所有其他面元作位置分析判断是否被遮挡，故计算量很大。另一方面，面元法消隐通常以面元形心是否被遮挡来确定取舍，这种取舍方式有时带来相当大的误差，对于由大平面块组成的多面体组合目标问题更为严重。如图 2 所示，一个简单四边形被多个部件遮挡后，可能会形成复杂的多边形，其交点的计算、余下部分如何自动重新划分为四边形或三角形面元都是很困难的问题。

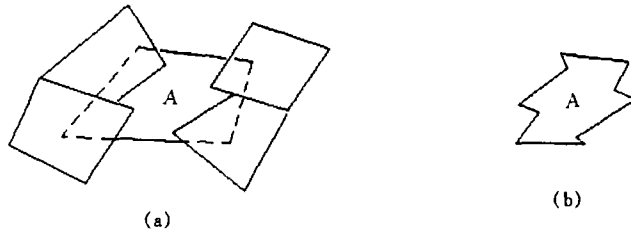


图 2 (a) 一个四边形面元 A 被遮挡情况 (b) 四边形 A 遮挡后形成复杂多边形

如果用“像素法”，消隐问题变得十分简单，目标在投影方向上被划分成同样大小、规则排列的像素集，同一点的不同深度的目标表面“像素”大小一样，只要取靠雷达最近一个像素点，这样，无论多么复杂的外形目标体都可以简便地消除被遮挡部分(图 3)。如果像素信息用硬件(图形加速卡)储备缓冲(如 Z-Buffer)则还可大大提高计算速度。

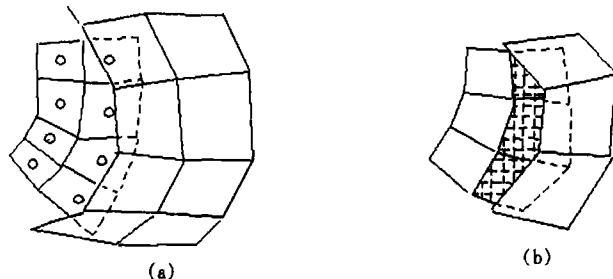


图 3 (a) 以面元形心为判断的遮挡消隐, (b) 像素法的遮挡消隐

#### 4 曲面像素法的基本理论与计算方法

由于计算机 CAD 技术的发展, 可以用多种曲面生成方法 (如 NURBS 法<sup>[4]</sup>) 对复杂外形目标体作较严格的几何逼近建模, 而使目标 RCS 的“面元法”得到迅速发展。至今“面元法”仍是计算复杂目标 RCS 的一种简捷、快速的方法。但是板块“面元法”有两个缺点: (1) 面元法消隐困难。(2) 用目标表面三维网点组成的许多平面块近似表示目标真实曲面体, 尽管模型表面网点是真实曲面上的点, 但实际上, RCS 的计算模型是近似目标的“多面体”。RCS 的计算结果必然与真正曲面体的反射特性存在一定误差。

我们对提出的“像素法”又先后研究并发展三种不同的像素特征表示方法。一种是完全保持原目标板块面元特征的“像素法”, 这种方法的最大特点是可以很方便地实现部件遮挡的严格消隐, 也不存在消隐后重新划分网格面元的问题 (图 3)。我们将此方法称之为“板块像素法”。

第二种方法是对“板块像素法”的改进, 对平面面元内像素点的法向矢量作线性插值 (见图 4), 使每个像素点的法向矢量更接近对应的曲面法矢。我们称之为“法矢插值像素法”。由于每一像素点的法向矢量的小变化对高频 RCS 结果的影响要比每点的曲面拱高变化影响小得多。因此, 计算试验表明, “法矢插值像素法”在计算分析高频 RCS 的结果精度上没有明显改进 (见表 1、表 2)。

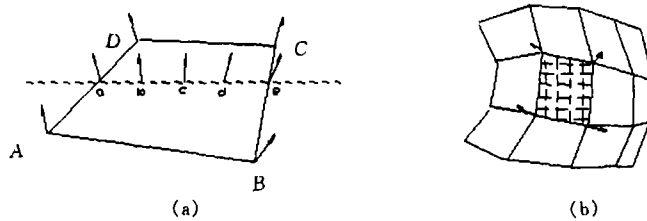


图 4 Phone 方法的像素点法向矢量线性插值

CAD 软件的法向矢量彩色立体图形的形成, 通常都是在三维目标面元网格基础上, 利用 Phone 或 Gouraud 等方法得到物体表面“柔和”的光亮度分布, 即作“法向矢量”线性插值, 或作“光亮度”线性插值, 其面元中间的像素点的深度  $Z$  值仍然是面元平面小板块上的点的  $Z$  值, 即看起来是光滑的“曲面”图像, 其  $Z$  值分布仍旧是原来的“多面体” (图 4)。所以, GRECO 方法从计算 RCS 的精度来看, 本质上与“板块面元法”相同。

由于三维几何曲面造型复杂, 无论采用什么曲面生成方法 (如 NURBS 法), 目标体表面的输出表达形式仍然是离散点分布信息 (有的直接用于目标特性分析的网格面元划分)。这些曲面造型方法生成的离散点网格, 往往难于自动控制每一个小面元的 (RCS 分析所限制的) 曲率误差和拱高误差, 从而影响 RCS 计算结果。如果将曲面生成网格加密, 由于必须对每一面元与其他面元作位置分析判断而确定是否被遮挡, 计算量将会以  $n^2$  倍数极大的增加。若网格加密到像素级大小, 则消隐计算难以实现。也有采用简化的二次曲面元近似代替真实曲面元, 但是, 这种方法难于使每一小近似“曲面元”与原始大曲面吻合, 曲面元之间的边界也无法保证导数连续。于是我们又研究发展一种新的“曲面像素法”。这一方法的研究成功, 基本上克服了复杂曲面体目标用多面体近似造成的误差问题, 同时具有部件遮挡严格消隐、不受网格划分稀密的限制和 RCS 计算简便的特点 (图 5)。

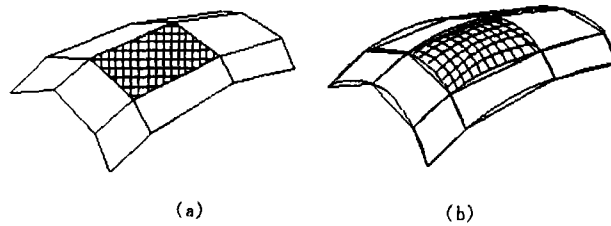


图 5 (a) 板块面元及板块像素, (b) 曲面重构及曲面像素

4.1 离散曲面表示的目标体曲面像素的计算

复杂曲面目标(如飞机、坦克等)表面通常是用离散点集(或三维网格交点集)来表示,其各个部件往往不是用同一种参数曲面方程构型。对于这样表示的目标体,无法用解析方法来获得任意视角下目标表面像素点的三维坐标和法向矢量。

另一方面,用现有方法对复杂目标体的几何造型输出的离散点集往往不能满足 RCS 计算模型的要求。能否找到一种对任意离散点集表示的目标体(多面体),来反求出目标表面每一个像素点的真实曲面的位置呢?为此,我们提出一种离散曲面的像素信息精确再生成的方法。这一方法的关键,是保证所有像素点都维持在原始目标的“曲面”上。

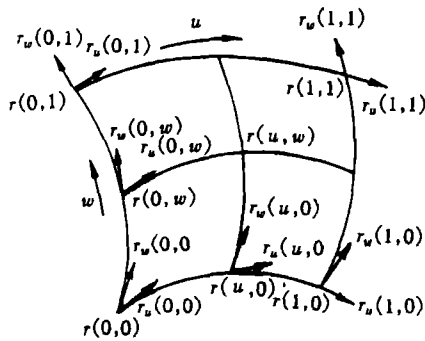


图 6 利用节点信息的曲面重建

我们采用 Coons 曲面造型方法,作为离散点集表示的目标曲面重构的基础。这是由于 Coons 曲面特别适用于曲面片的光顺拼接,用这一曲面构形方法,可以保证曲面片交界处的跨界切矢(一阶导数)和跨界扭矢(二阶导数)连续,从而可以保证由原始离散网格点重构的曲面像素点集与原始目标真实曲表面一致(图 6)。用矢量形式来表示的曲面参数方程:

$$r = r(u, w)$$

那么 Coons 曲面则可以由下列方程来计算。

$$r = r(u, w) = -[-1 \ F_0(u) \ F_1(u) \ G_0(u) \ G_1(u)] \begin{bmatrix} 0 & r(u, 0) & r(u, 1) & r_w(u, 0) & r_w(u, 1) \\ r(0, w) & r(0, 0) & r(0, 1) & r_w(0, 0) & r_w(0, 1) \\ r(1, w) & r(1, 0) & r(1, 1) & r_w(1, 0) & r_w(1, 1) \\ r_u(0, w) & r_u(0, 0) & r_u(0, 1) & r_{uw}(0, 0) & r_{uw}(0, 1) \\ r_u(1, w) & r_u(1, 0) & r_u(1, 1) & r_{uw}(1, 0) & r_{uw}(1, 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ F_0(w) \\ F_1(w) \\ G_0(w) \\ G_1(w) \end{bmatrix}$$

计算中要用到离散点的导数值,而原始离散曲面点只有三维坐标值而没有一阶和二阶导数值,为此,我们运用一种双三次样条函数插值法求出所有网格点上的导数值。应用 Coons 曲面与双三次样条函数插值结合的方法,求出与原目标真实曲表面相吻合的光顺曲面的所有像素点的 Z 值和法向矢量。

4.2 曲面像素法的目标 RCS 计算

我们可以用与“板块像素法”计算 RCS 的相同的物理光学方法,来计算曲面像素集的雷达散射截面积。“曲面像素法”与“板块像素法”最主要的区别是:“曲面像素法”的目标像素点(即雷达射线与目标表面交点)全部为目标真实曲表面上的点;“曲面像素法”对原始描述目标表面的三维离散网格的大小、稀密情况、曲率变化程度、原始曲面由何种曲面方程构成等,均无需特殊要求,而板块法的计算结果与三维网格的划分是否合理有很大关系;由于雷达散射截

面积直接由曲面像素点集“积分”计算, 从而使得任意曲面目标体的高频 RCS 计算变得十分简便, 计算结果的精确度和稳定性也明显提高。

相对于板块“面元法”, “像素法”消隐计算简化了, 但是“曲面像素法”需重构曲面像素, 计算量比板块法有所增大。

## 5 不同像素法 RCS 计算结果的比较分析

### 5.1 不同频率的球体 RCS 的计算

从表 1 可以看出, “曲面像素法”计算结果在较广的频率范围内都与准确值接近; 而“板块像素法”(划分为 600 块)计算结果随着不同频率变化, 其计算结果振荡变化较大; “法矢插值像素法”计算结果比起板块法没有明显改进(半径  $R = 1\text{m}$ )。

表 1 不同方法的球体 RCS 的计算结果比较 (理论值为 4.9715dBsm)

频率 (GHz)	2	2.5	3	4
板块像素法	2.6246	5.1711	4.7439	6.2036
Phone 插值	2.3145	5.0184	4.7155	6.1971
曲面像素法	5.0408	5.0628	5.0544	4.9507

### 5.2 不同方位角的椭球体 RCS 的计算

由计算结果可见, 曲面像素法对不同方位角下的 RCS 计算结果都与几何光学结果很接近, 而其他两种方法(在划分为 600 块情况下)计算的结果误差较大(三主轴半径分别为: 0.3m, 0.4m, 0.5m;  $f = 3\text{GHz}$ )。

当然, 调整椭球体面元划分网格情况可能会改善用板块法的计算结果, 但是, 从表 1、表 2 至少可以断定: 对于曲率变化大的目标体, 板块像素法(包括面元法)和法矢插值像素法(包括 GRECO 方法)计算 RCS 的精度, 将受网格划分的强烈影响。这是由于曲率变化大的目标体, 上述前两种方法所计算的目标表面点的  $Z$  深度值误差导致 RCS 计算结果误差较大。

表 2 不同方法的椭球体 RCS 的计算结果比较 (RCS 值单位为 dBsm)

$\theta(^{\circ})$	0	90	45	90
$\phi(^{\circ})$	0	0	45	90
板块像素法	-13.0164	-0.7963	-2.9261	2.3509
Phone 插值	-14.2467	-0.5041	-3.0541	3.2843
曲面像素法	-7.5924	-3.2038	-2.8021	1.7142
几何光学法	-7.4243	-3.5479	-2.8413	1.4497

## 6 算 例

### 6.1 圆锥体 RCS 计算

圆锥体的尺寸为: 底半径 8.03cm, 长 40.17cm, 锥半角  $11^{\circ}18'$ ; 波长 5.0cm, 频率 6.0GHz; 试验值为国外实测数据<sup>[5]</sup>, 图 7 中的虚线为 GTD 方法计算值<sup>[5]</sup>。从图 7、图 8 可以看出, 曲面像素法计算结果更接近于测量值(图 8 为计算机实时计算作屏显的结果曲线)。

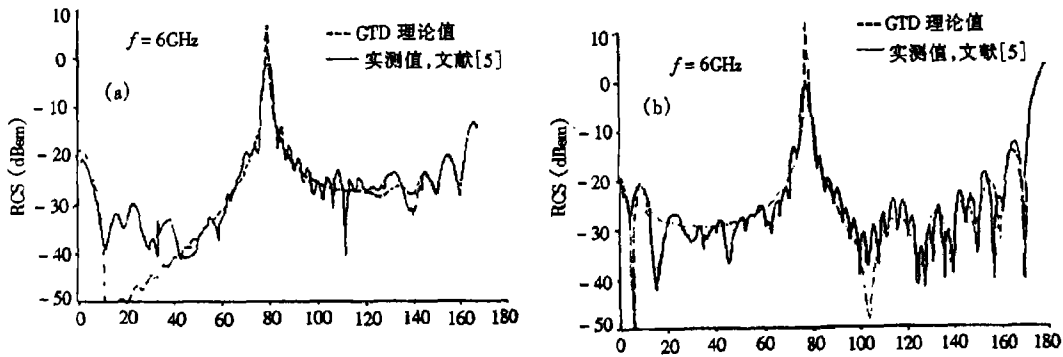


图 7 (a) 圆锥 RCS 实测值与 GTD 计算值 (垂直极化), (b) 圆锥 RCS 实测值与 GTD 计算值 (垂直极化)

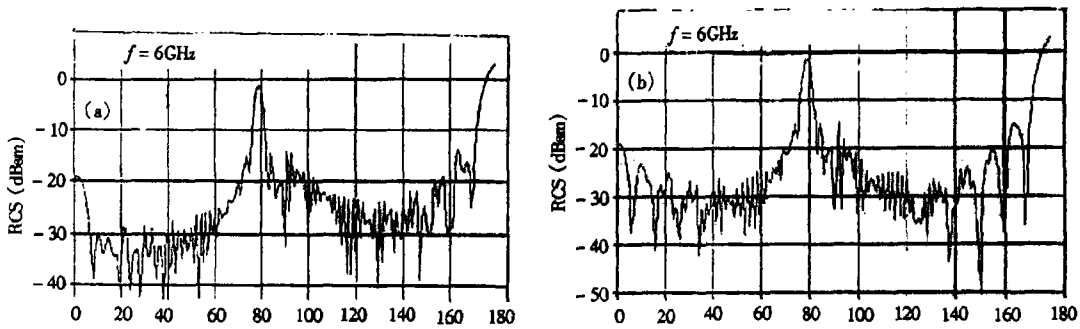


图 8 (a) 圆锥 RCS 本方法计算结果 (垂直极化), (b) 圆锥 RCS 本方法计算结果 (水平极化)

### 6.2 尖锥-圆柱体

尖锥-圆柱体的尺寸为: 圆柱半径 8.03cm, 圆柱段长 26.7cm, 锥半角  $11^{\circ}18'$ ; 波长 5.02cm, 频率 5.975GHz; 试验值为国外实测数据 [5], 图 9 中的虚线为 GTD 方法计算值 [5].

### 6.3 飞机模型 RCS 计算

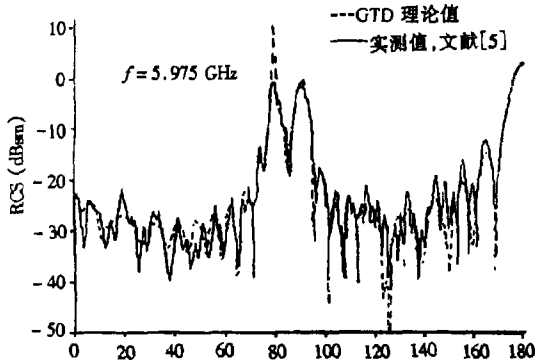


图 9 尖锥-柱 RCS 实测值与 GTD 计算值 (水平极化)

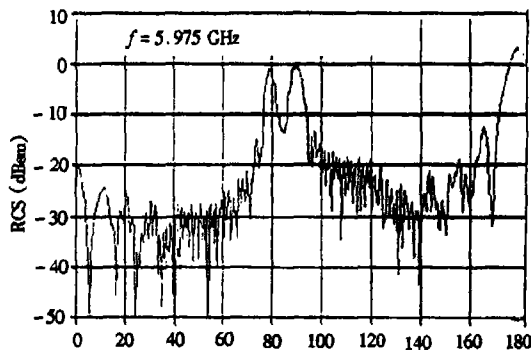


图 10 尖锥-圆柱本方法计算结果

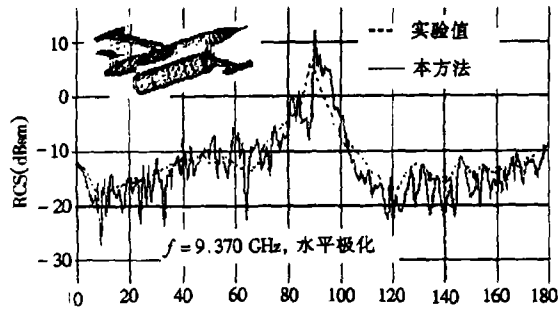


图 11 某飞机模型计算结果与测量结果的比较

## 7 结束语

通过上述分析,我们认为,“像素法”是一种十分有效而实用的 RCS 计算方法,并可用于目标特性的实时仿真。“曲面像素法”与先进的前、后置处理方法结合起来,可以建立可视化程度高、不受目标外形复杂程度和网格限制、RCS 分析精度高的雷达目标特性分析系统。

## 参 考 文 献

- [1] J. M. Rius, M. Ferrando, L. Jofre, GRECO, Graphical electromagnetic computing for RCS prediction in real time, IEEE Trans., on AP, 1993, AP-35(2), 7-17.
- [2] J. M. Rius, M. Vall-llossenrae, A. Cardama, GRECO, Graphical processing method for high-frequency RCS prediction, Ann. Telecommun, 1995, 50(5-6), 551-116.
- [3] A. Michaeli, Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observations, IEEE Trans., on AP, 1984, AP-32(3), 252-258.
- [4] J. Perez, M. F. Catrda, RCS of electrically large targets modeled with NURBS surfaces, Electron. Lett., 1992, 28(12), 1119-1121.
- [5] 李柱贞, 吕婴, 向家武, 雷达散射截面常用算法, 目标特性研究编辑部, 1981, 第六章.

## A NEW METHOD FOR RCS PREDICTION OF COMPLEX OBJECTS — CURVED SURFACE PIXEL METHOD

Ang Haisong    Shu Yongze    Zhou Jianjiang    Zhang Tiebing    Peng Yun

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract** A new method for computing high-frequency RCS of objects with complex configuration, called. Curved Surface Pixel (CSP) method, is presented in this paper. The distinction between CSP method and GRECO method is described. Several different approaches of the pixel methods are analyzed. Many computation examples for spheroid, ellipsoid, cone, missile mode and aircraft mode show that the CSP method has advanced computation accuracy.

**Key words** Calculation of RCS, Curved surface, Pixel method

- 昂海松: 男, 1947 年生, 教授, 博士生导师, 从事飞行器目标特性分析, 计算机辅助设计。  
舒永泽: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 从事天线和电磁散射理论研究。  
周建江: 男, 1962 年生, 副教授, 从事电磁散射、数字信号处理研究。  
张铁兵: 男, 1972 年生, 工程师, 从事飞行器目标特性分析与 CAD 技术。  
彭 芸: 女, 1975 年生, 研究生, 从事雷达散射特性计算。