

# 复杂目标 RCS 计算的新方法 — 曲面像素法

雷达散射截面

TN 957

昂海松 舒永泽 周建江 张铁兵 彭芸

南京航空航天大学

**摘要:** 本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。本文还提出一种新的“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 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。

## 一、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。面元法(包括边缘绕射)的几何建模是基于目标外形的各种曲面造型方法(如 NURBS 法)，其特点是可以分析计算形状比较复杂的目标 RCS；其缺点是难于精确处理多部件复杂外形相互遮挡情况(见图 3)，面元的尺寸划分必须根据雷达波长而调整。射线跟踪法用于计算复杂组合体目标，计算量太大。FDTD 法可以分析计算目标外部的空间电磁场，其目标特性的计算依赖于大型计算机，对于复杂目标，难于自动实现三维贴体坐标的转换，故目前还不能用于实时跟踪计算。

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)[1]。该方法是利用专门的计算机辅助几何实体造型软件，生成用颜色色度表示的目标表面六维几何信息，由这些显示的目标像素位置及颜色表示的法向矢量，来计算复杂目标的高频雷达截面。此方法避开了复杂目标的几何建模，面元划分及消隐等问题，直接利用工作站图形生成的 Z-Buffer 消隐在硬件中的储存信息，从而方便地解决了复杂目标的遮挡消隐问题，提高了计算速度。GRECO 方法成功地将计算机图象图形学应用于 RCS 计算，但

该方法主要有如下缺点：GRECO 法利用专门 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上显示的彩色图象重新获取和反算表面法向矢量。由于一个彩色图象只能显示三个(或四个)主法向矢量分量大小的综合，而目标表面方向信息需要正负六个主法向矢量分量大小的综合，因此要重复做两轮动态彩色图象[1]；然后再从两组彩色图象反求像素法向矢量，作 RCS 计算。因此，若将 GRECO 法的 CAD 专门软件几何造型、图象生成与后续取图、RCS 计算加在一起，该方法对目标法向矢量分布作了四次的重复计算。

## 二、“像素法”的概念和基本理论

“像素”(Pixels)是计算图形图象学的概念，是在计算机屏幕上组成实体图象的最小单位(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。图象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)。

本课题研究得到国家自然科学基金和国防预研项目的资助

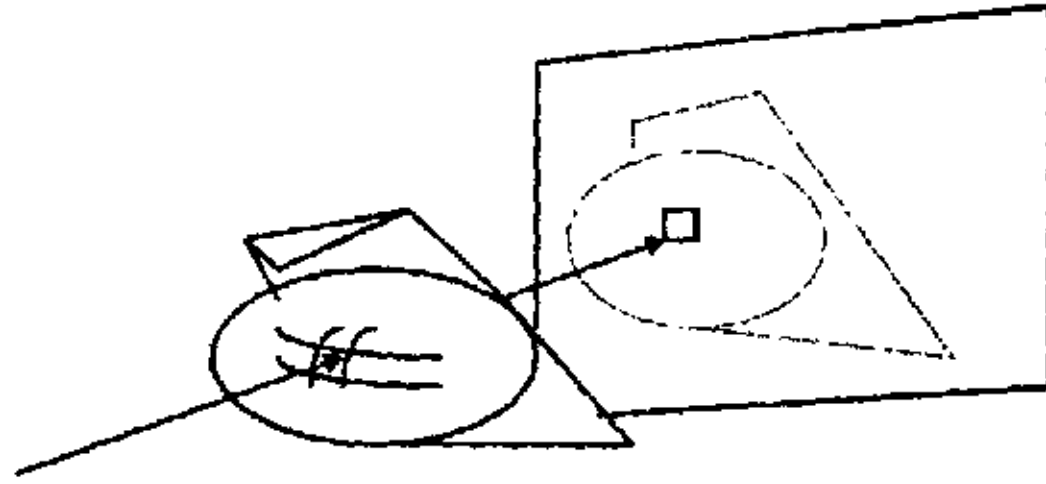


图 1. 投影与像素

### 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得多) 在后向散射情况下, 可简化为

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

其中  $k$  是入射波波数,  $H$  是入射磁场强度. 对于复杂曲面目标, 上式积分困难, 若离散为足够小的许多平面 (像素), 则该方程式变为:

$$\bar{H}^s = \frac{-jk_0 e^{-jk_0 R}}{2\pi R} \bar{H}^i \sum_{i=1}^N I_i \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

其中

$$I_i = \int_{S_i} e^{jk_z z} dx dy$$

又由雷达散射截面的定义

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{\bar{H}^s}{\bar{H}^i} \right|^2$$

对于像素法可推导得

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_{\text{像素}} e^{2jk_z z} ds \right|^2$$

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

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{\text{像素}} \text{sinc}(K_0 \frac{l}{\cos \theta} \sin \theta) e^{2jk_z z} \right|^2$$

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

### 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 [6], 由线积分来求边缘棱角绕射场:

$$E^d = -jk\psi \int_c \left[ Z_0 I_s \hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{t}) + I_m \hat{s} \times \hat{t} \right] e^{jk \hat{r} \cdot \hat{c}} d\hat{c}$$

这里,  $\hat{t}$  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:

$$I_m(\beta = \pi - \beta', \phi = \phi) = H'_{z_0} \frac{2j}{k \sin^2 \beta'} [D_m - D'_m]$$

$$I_s(\beta = \pi - \beta', \phi = \phi') = E'_{z_0} \frac{2j}{z_0 k \sin^2 \beta'} [D_s - D'_s]$$

$$- H'_{z_0} \frac{4j \cos \beta'}{k \sin \beta'} [D_m \sin \beta' - D'_m]$$

其中  $H_{z_0}$ 、 $E'_{z_0}$  为入射场强在原点处的  $Z$  向分量,  $D_m$ 、 $D_s$ 、 $D'_m$  分别为:

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

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

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

式中  $D'e$ 、 $D'm$ 、 $D'em$  为物理光学项:

$$D'em = 0$$

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

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

$$U^+ = \begin{cases} 1, & \dots \dots \text{上表面被照射} \\ 0, & \dots \dots \text{其他} \end{cases}$$

$$U^- = \begin{cases} 1, & \dots \dots \text{下表面被照射} \\ 0, & \dots \dots \text{其他} \end{cases}$$

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(即用小边缘直线段上的近“观测点”的表面像素来判断)。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、计算交点问题(图2)。

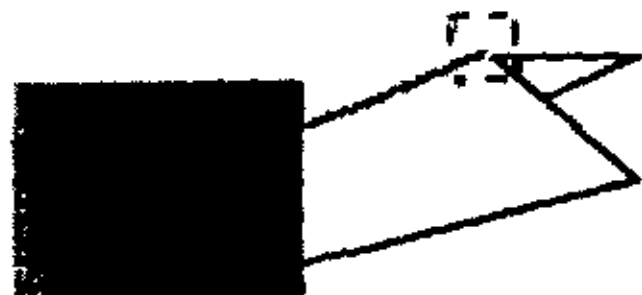


图2 像素法的边缘遮挡消隐方法

### 三、像素法的特点

#### 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, 将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。

为此, 我们提出“广义像素”的概念: 即合理的比例尺寸。“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。

#### 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(表面波散射外), 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3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、余下部分自动重新划分为四边形或三角形面元都是很困难的问题。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4)。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) 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

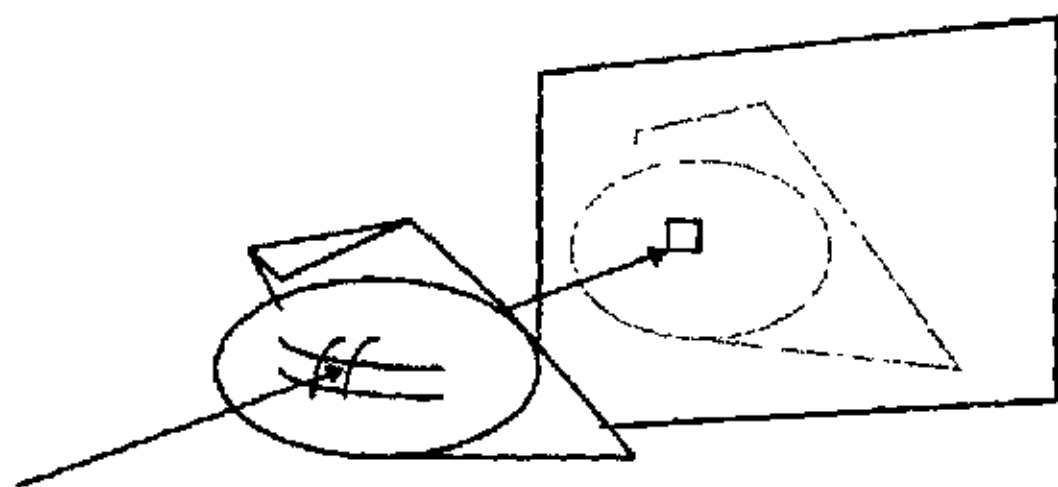


图 1. 投影与象素

### 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得多) 在后向散射情况下, 可简化为

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

其中  $k$  是入射波波数,  $H$  是入射磁场强度. 对于复杂曲面目标, 上式积分困难, 若离散为足够小的许多平面 (象素), 则该方程式变为:

$$\bar{H}^s = \frac{-jk_0 e^{-jk_0 R}}{2\pi R} \bar{H}^i \sum_{i=1}^N I_i$$

( $i=1, 2, \dots, N$ )

其中

$$I_i = \int_{S_i} e^{2jk_0 z} dx dy$$

又由雷达散射截面的定义

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{\bar{H}^s}{\bar{H}^i} \right|^2$$

对于象素法可推导得

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_{\text{象素}} e^{2jk_0 z} ds \right|^2$$

其中  $ds$  表示实体在“屏幕”上投影的象素面积  $ds = \cos \theta ds$ ,  $\theta$  为法向矢量与射线

的夹角. 于是

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{\text{象素}} \text{sinc}(K_0 \frac{l}{\cos \theta}) e^{2jk_0 z} \right|^2$$

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

### 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 [6], 由线积分来求边缘棱角绕射场:

$$E^d = -jk\psi \int_c \left[ Z_0 I_s \hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{t}) + I_m \hat{s} \times \hat{t} \right] e^{jk_0 r} d\hat{t}$$

这里,  $\hat{t}$  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:

$$I_m(\beta = \pi - \beta', \phi = \phi) = H'_{z_0} \frac{2j}{k \sin^2 \beta'} [D_m - D'_m]$$

$$I_s(\beta = \pi - \beta', \phi = \phi') = E'_{z_0} \frac{2j}{k \sin^2 \beta'} [D_s - D'_s] - H'_{z_0} \frac{4j \cos \beta'}{k \sin \beta'} [D_{sm} \sin \beta' - D'_{sm}]$$

其中  $H_{z_0}$ 、 $E'_{z_0}$  为入射场强在原点处的  $Z$  向分量,  $D_m$ 、 $D_s$ 、 $D_{sm}$  分别为:

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

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

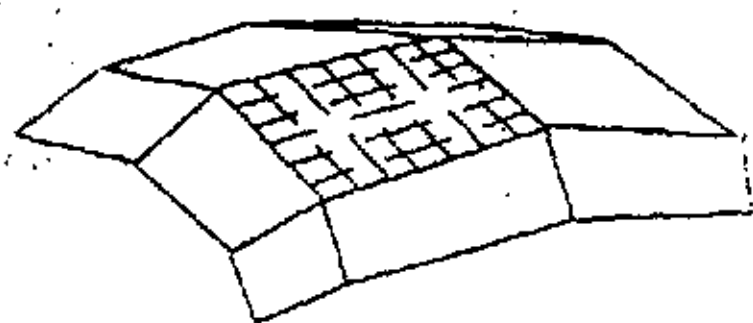
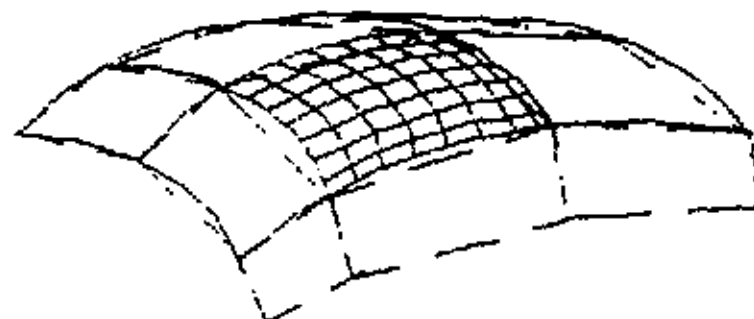


图7 面元法和板元像素法



曲面重建和曲面像素法

### 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。能否找到一种可以适应任意离散点集表示目标体的数据构成的通用方法,来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曲表面上。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,用这一曲面构型方法,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曲面网格点数据构成所计算的像素点集与原始目标真实曲表面一致(图8)。用矢量形式来表示的曲面参数方程:

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

Coons 曲面可由下列方程来计算:

$$r(u, w) = \begin{bmatrix} 0 & r(u, 0) & r(u, 1) & r_u(u, 0) & r_u(u, 1) & -1 \\ r(0, w) & r(0, 0) & r(0, 1) & r_u(0, 0) & r_u(0, 1) & F_u(w) \\ r(1, w) & r(1, 0) & r(1, 1) & r_u(1, 0) & r_u(1, 1) & F_u(w) \\ r_u(0, w) & r_u(0, 0) & r_u(0, 1) & r_{uu}(0, 0) & r_{uu}(0, 1) & G_u(w) \\ r_u(1, w) & r_u(1, 0) & r_u(1, 1) & r_{uu}(1, 0) & r_{uu}(1, 1) & G_u(w) \end{bmatrix}$$

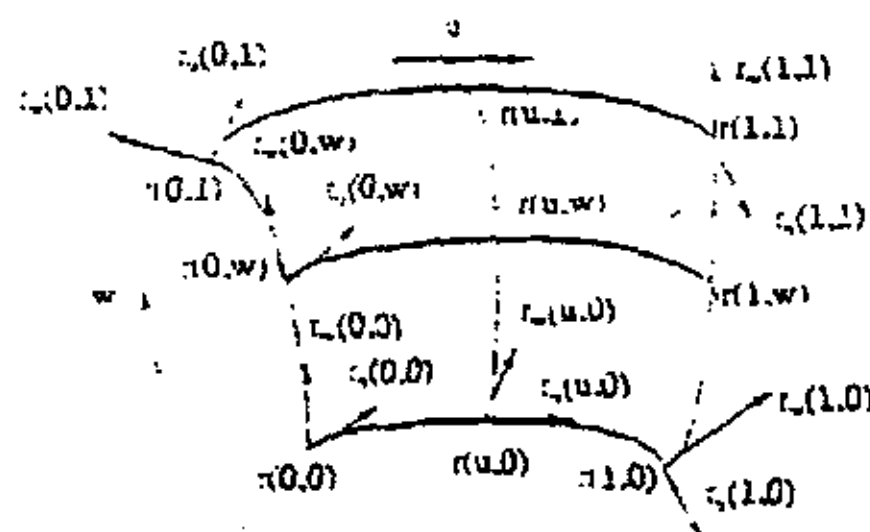


图8 利用节点信息的曲面重构

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。

### 2. 曲面像素法的目标 RCS 计算

我们可以用与“板元像素法”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“板元像素法”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、稀疏情况、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,而板元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。

## 五、不同像素法 RCS 计算结果的比较分析

### 1. 不同频率的球体 RCS 的计算

从表一和图 9 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”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( $R=1$  米,表一中计算结果为 dBsm)。

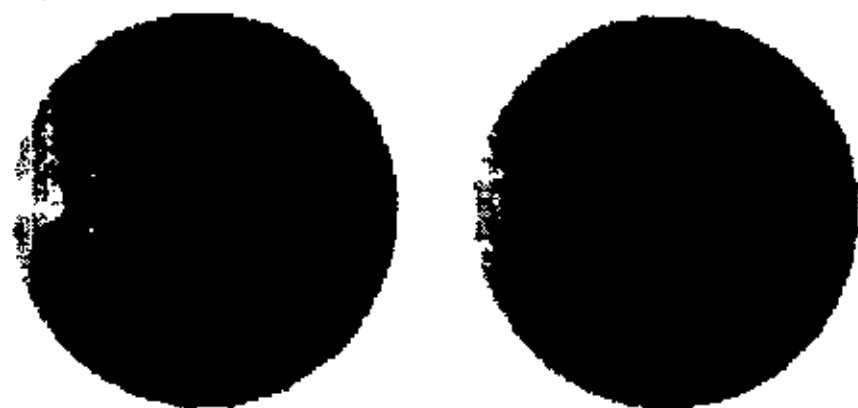


图 9(a) “板块像素法”球体彩色图象  
(b) “曲面像素法”球体彩色图象

表一(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

### 2. 不同方位角的椭球体 RCS 的计算

比起圆球,椭球体某些方位角下的局部曲率变化更大一些。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;  
 $f=3\text{GHz}$ )。



图 10(a) “板块像素法”椭球体彩色图象  
(b) “曲面像素法”椭球体彩色图象

表二 (RCS 值单位为 dBsm)

$\theta$ (度)	0	90	45	90
$\phi$ (度)	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

当然,调整椭球体面元划分网格情况可能会改善用板块像素法或法矢值像素法的计算结果,但是,从上述表二至少可以断定: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。

## 六、算例

### 1. 圆锥体 RCS 计算

## 2. 锥柱体 RCS 计算

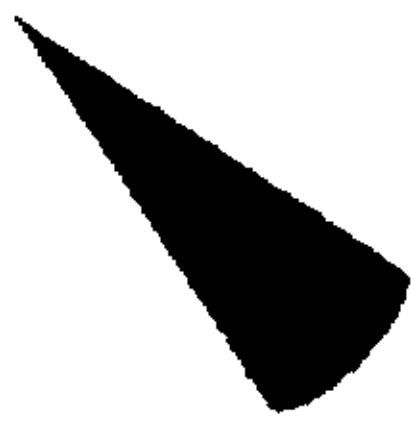
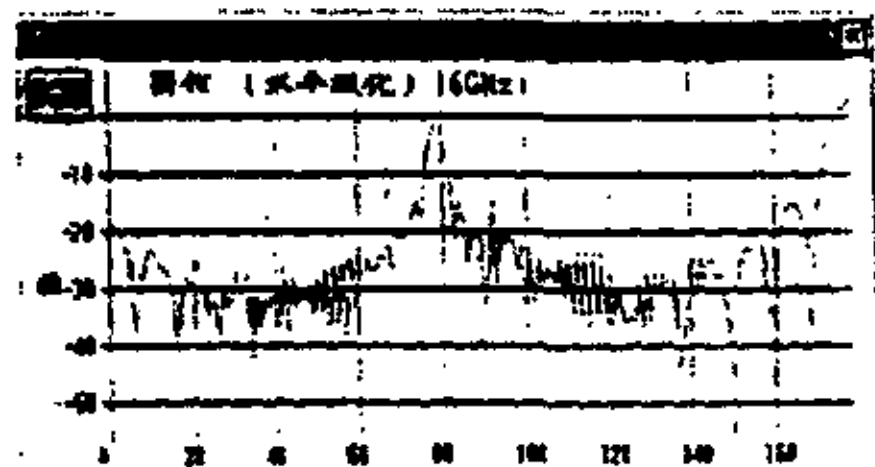


图 11 圆锥体曲面象素法彩色图象

从图 12 可以看出, 曲面象素法计算结果接近于测量值。



(a) 本方法计算结果

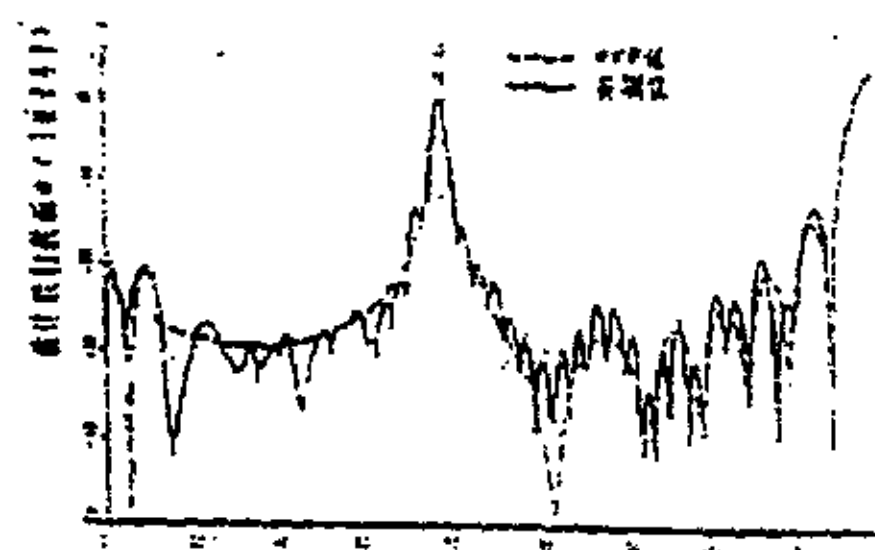
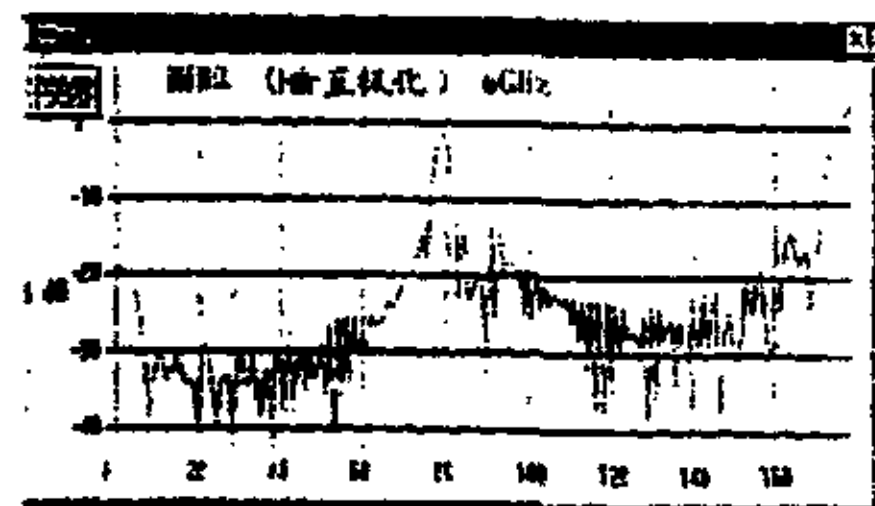


图 12 (b) 测量结果与 GTD 计算值



(a) 本方法计算结果

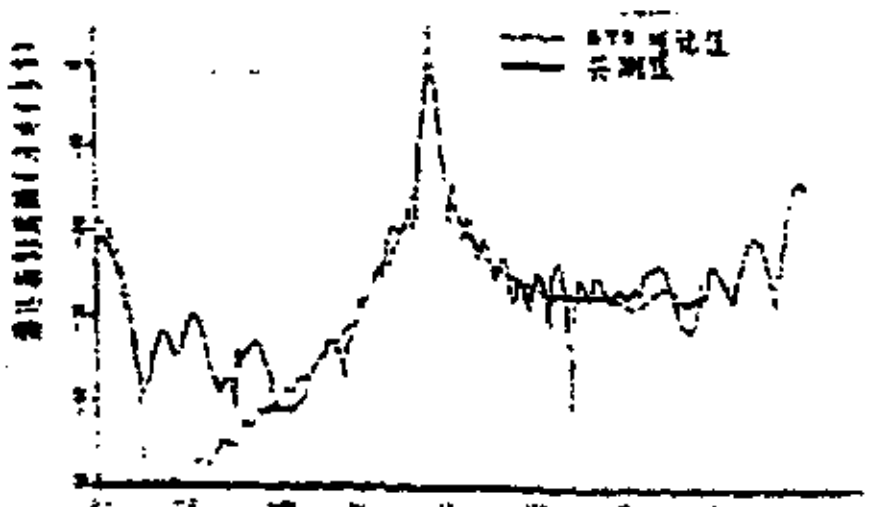
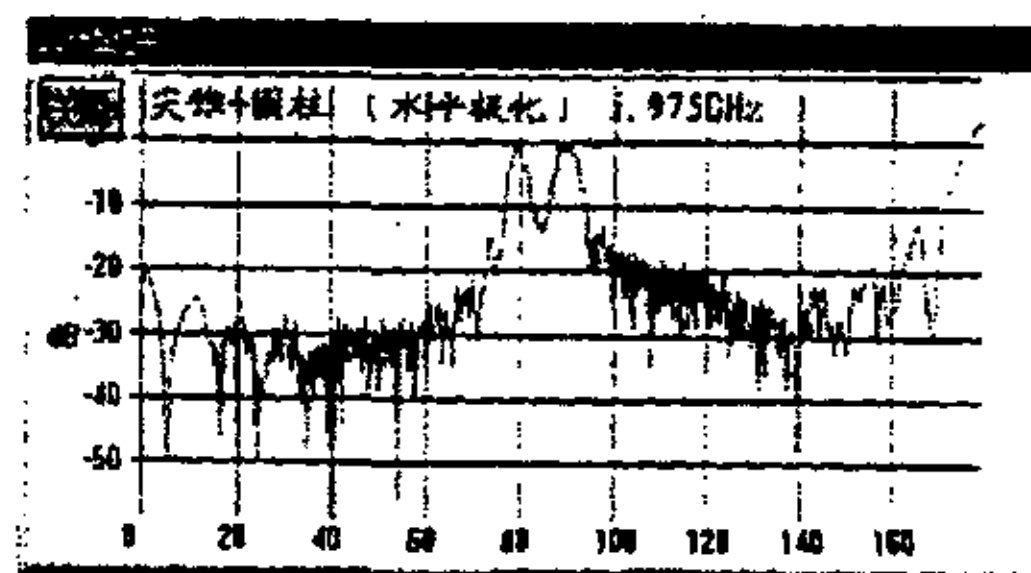


图 13 (b) 测量结果与 GTD 计算值



(a) 本方法计算结果

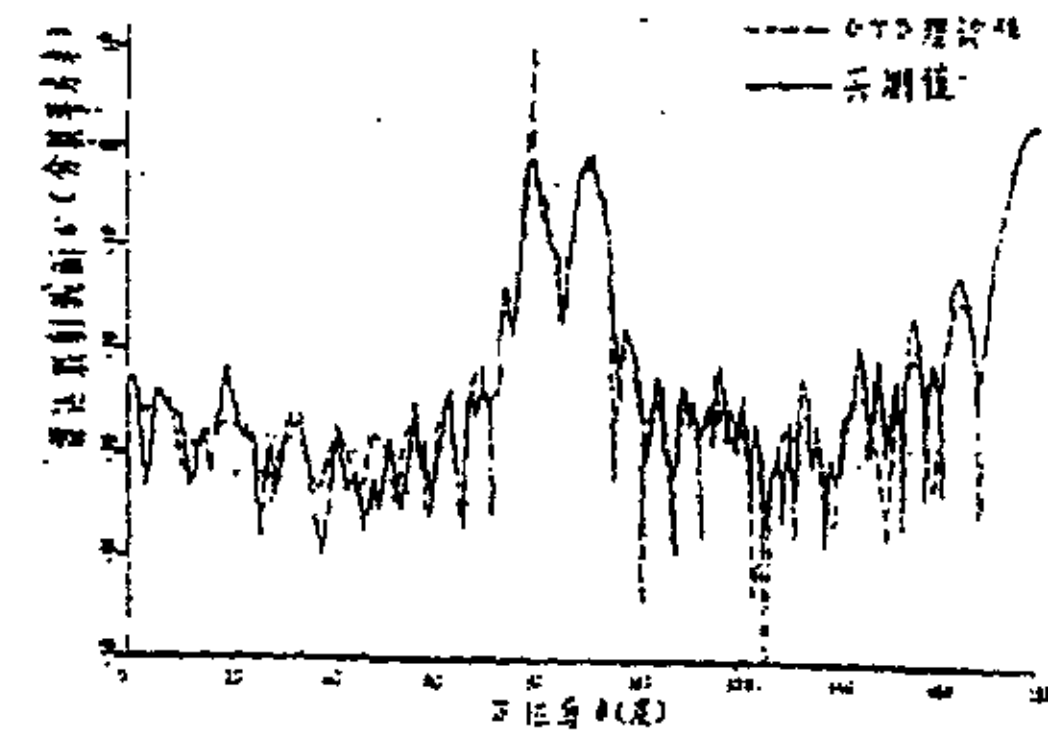


图 14 (b) 测量结果与 GTD 计算值

## 3. 飞机模型 RCS 计算

RCS (水平极化)  $f = 9.370 \text{ GHz}$  ——— 计算值    • 测量值

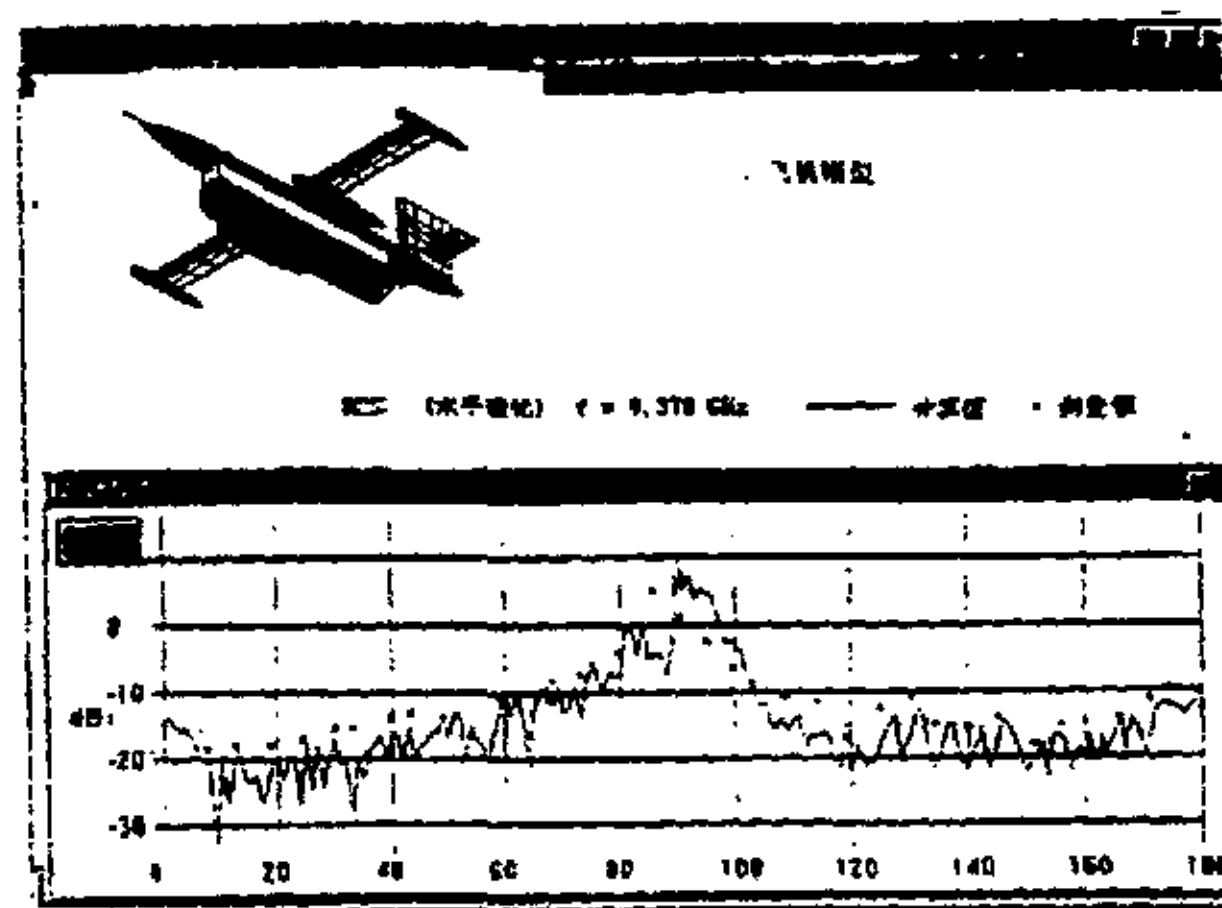


图 15 某飞机模型计算结果  
与测量结果的比较

## 参考资料

- 1, J. M. Rius, M. Ferrando, and L. Jofre, GRECO: Graphical Electromagnetic Computing for RCS Prediction in Real Time, IEEE AP Magazine, Vol.35, No.2, April, 1993, P7-17
- 2, J. M. Rius, M. Ferrando, and Vall-llossenrae and A. Cardama, GRECO: Graphical Processing Meshod for High-Frequency Rcs Prediction, Ann. Telecommun, Vol.50, No.5-6, 1995, 551-116.
- 3, A.P.C.Fourie, "A Complex-Body Structure Interpolation and Gridding Program for NEC", IEEE APM, No.3, 1994.
- 4, M.I.Sancer, "Electromagnetic Computation Using Parametric Gemetry", Electromagnetics No.10, 1990.
- 5, J.Perez, "RCS Of Electrically Large Tagets Modelled With NURBS Surfaces", ELECTRONICS LETTERS, No.12, 1992.
- 6, A. Michaeli, "Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observations, IEEE, Trans. AP-32(3), 1984, 252-258.

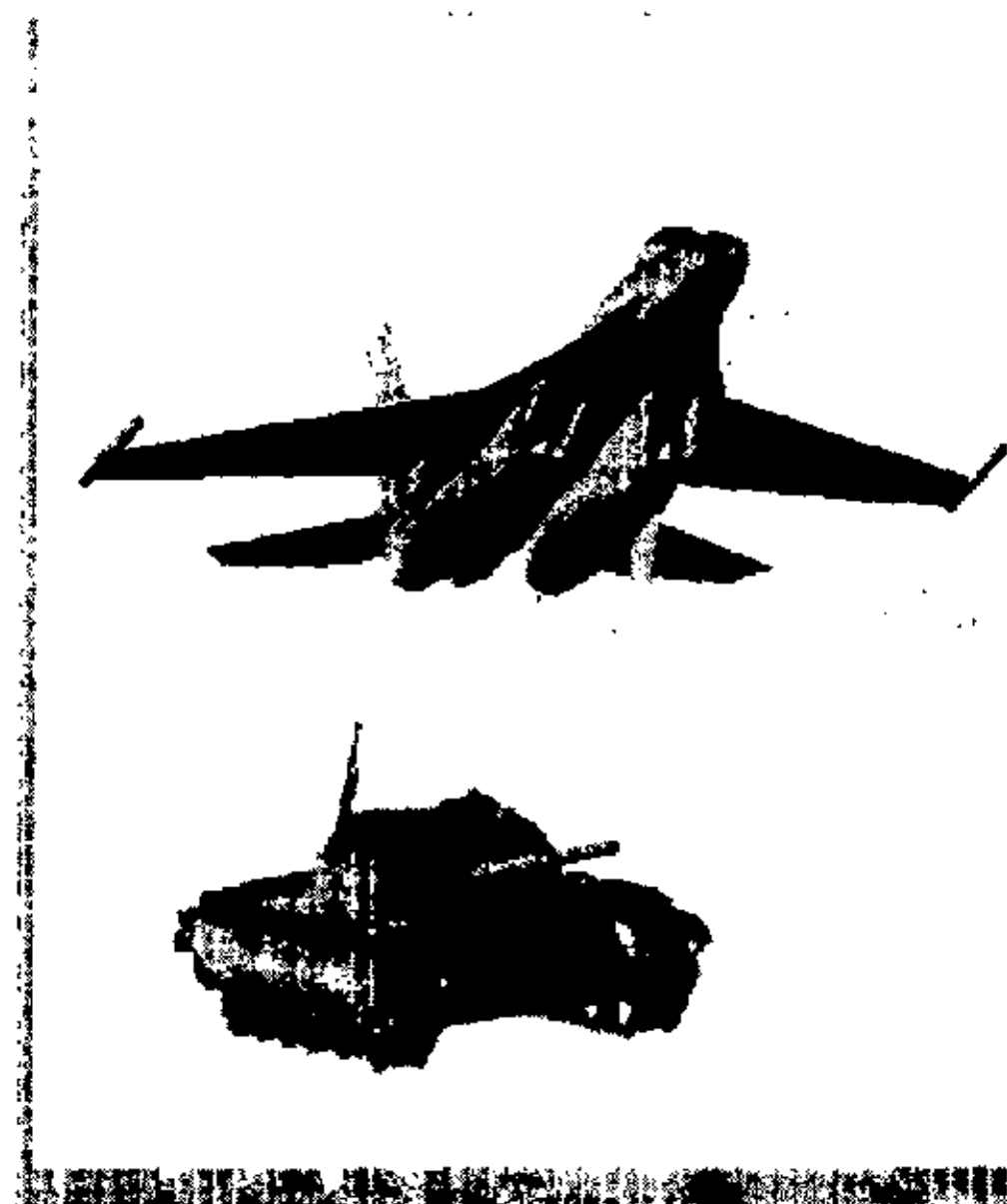
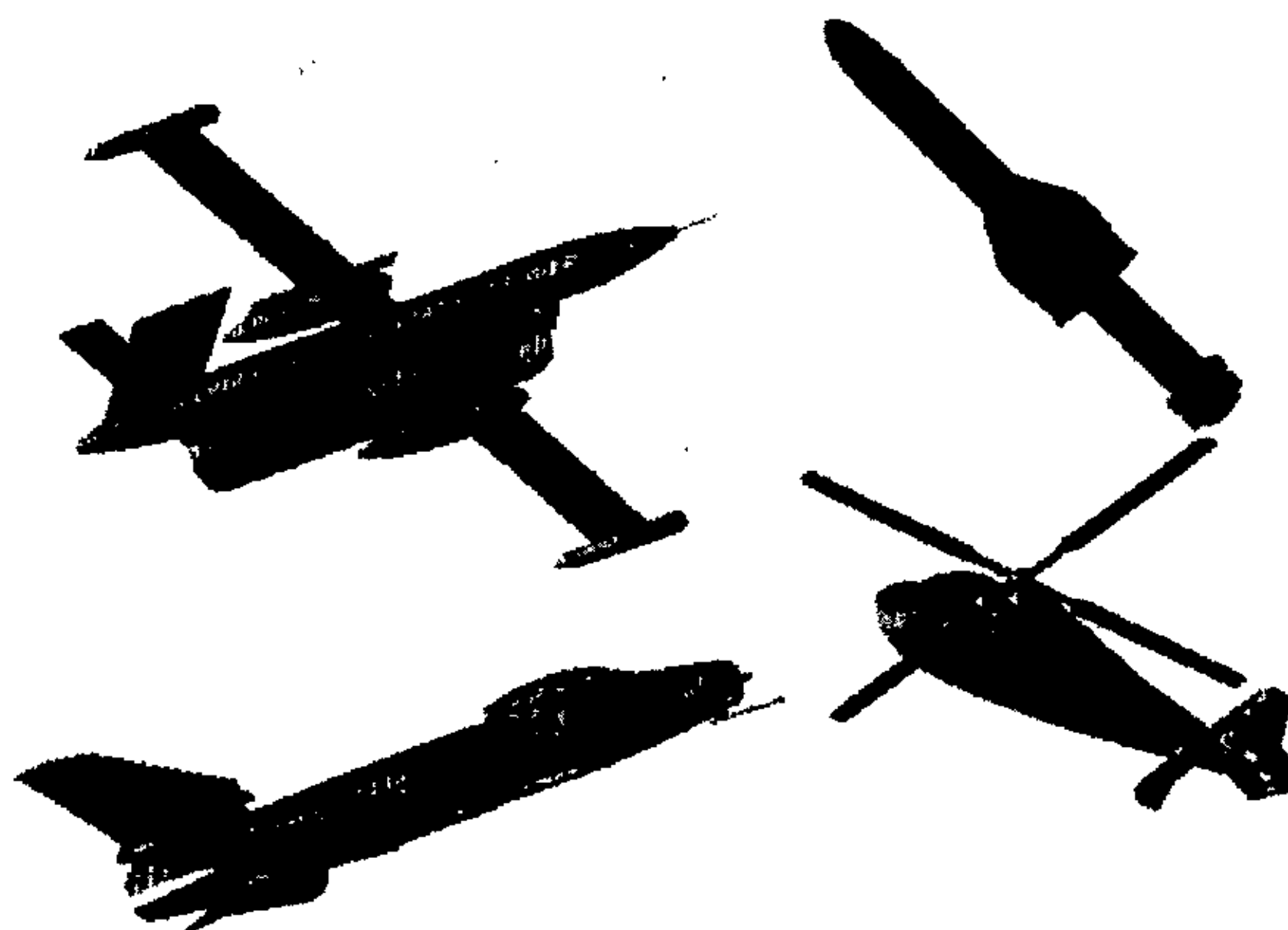


图 10 复杂目标体曲面像素法彩色图象

通过上述分析,我们认为,目标“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。

“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限制、RCS 分析精度高的雷达目标特性分析系统。





## 雷达散射截面 ( RCS ) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://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/>