

文章编号 :1001 - 2486(2004)06 - 0069 - 06

一种基于三角面元的目标 RCS 实用计算方法*

黄纪军, 粟毅, 郁文贤

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 提出一种计算复杂目标高频区 RCS 的实用方法。首先采用 3D Studio Max 对装甲车进行三角面元模拟, 然后运用路德维格积分^[1]和物理绕射理论(PTD)计算目标的雷达散射截面积, 通过对方柱 RCS 的计算, 验证了所提方法的有效性, 最后给出了 C 波段和 X 波段不同极化的装甲车和坦克 RCS 的方位分布图。

关键词 雷达散射截面积; 三角面元; 电磁计算

中图分类号: TN95 文献标识码: B

Calculation of the Radar Cross Section of Targets Based on Triangular Object Model

HUANG Ji-jun, SU Yi, YU Wen-xian

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract A useful method for calculating RCS of complex objects is given. First, it models the armored car with triangular element by using 3D Studio Max. Radar scattering character is calculated with Ludwig's integration and the physics theory of diffraction. The method is effective validated by calculating RCS of the cuboids. The radar cross section of armored cars and tanks is presented, which is important in studying scattering characters of the targets.

Key words radar cross section(RCS); triangular object model; electromagnetic calculation

雷达散射截面积(RCS)是表征雷达目标电磁散射能力的参数。随着雷达和电子对抗技术的发展, 它已成为武器系统性能评价的重要技术指标。它的精确预估对精确制导、目标检测与识别、隐身和反隐身都有着重要的应用价值。IEEE 和 IEE 等著名组织分别多次发表雷达目标散射特性分析专刊^[2-4], 此外还有大量的 RCS 与目标电磁散射特性计算文献及专题会议, 这些都说明了 RCS 与目标电磁散射特性的计算在军事应用中的重要性。国外 RCS(特别是高频区的 RCS)的精确预估相对比较成熟并已形成软件, 著名的有 Illinois 大学的 XPATCH、西班牙的 GRECO 等。国内北京航空航天大学等在 RCS 精确预估方面作了许多卓有成效的工作, 但还未见有软件商品化的报道, 主要原因在于复杂形体的模型建立、仿真计算、二者的结合以及方法的通用性等问题都比较困难。

1 目标的高频电磁散射机理

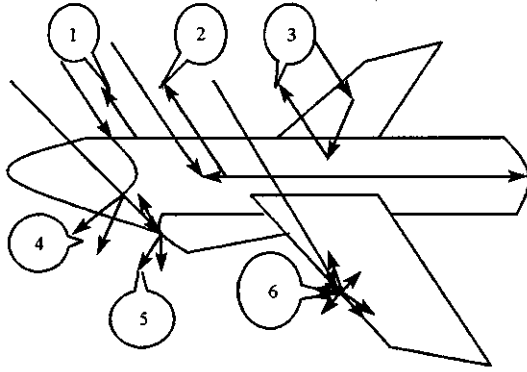
对于军用卡车、坦克、装甲车、火箭发射车、导弹发射车、飞机等雷达目标而言, 具有以下的特点: (1) 电尺寸大。在厘米波段(如 C 波段、X 波段), 它们的电尺寸都远大于 10, 属高频散射区, 可用高频近似方法分析其电磁散射特性。(2) 形体结构复杂。对于上述雷达目标, 它们的外形复杂, 其电磁散射分析都不能轻率地等效为简单形体来分析, 必须对它们进行建模研究。(3) 散射机理复杂。各种雷达目标的结构、外形都不一致, 因此多种散射机理并存。高频区雷达目标主要的散射机理为: 平面与凸曲面的镜面散射、二面角散射、三面角散射与腔体散射等强散射, 这些是其 RCS 的主要贡献者; 面与面之间的多重散射、边缘绕射为次强散射; 曲面爬行波绕射、面与边缘及边缘与边缘之间的多重

* 收稿日期 2004 - 04 - 25

基金项目: 国家 863 高技术学院发展计划基金资助项目(2001AA132020)

作者简介: 黄纪军(1971—)男, 博士生。

散射、表面导数不连续性散射、拐角及尖顶绕射为弱散射。在雷达截面手册中给出了七种散射机理, 这些机理的组合形成一个复杂目标的 RCS 特征。这些机理性散射包括: ①镜面反射; ②表面不连续性散射, 如边缘、拐角和尖端; ③表面导数不连续性的散射; ④爬行波或阴影边界的绕射; ⑤行波散射; ⑥凹形区域散射, 如腔体、二面角和三面角; ⑦多次散射。例如, 飞机的散射机理见图 1。



1 镜面散射 2 表面波 3 二次散射 4 爬行波 5 腔体散射 6 边缘绕射

图 1 飞机的散射机理

Fig. 1 The scattering mechanism of the fighter

2 目标的三角面元模型^[5 6]

任何复杂目标的电磁散射分析都需要建立其几何模型。在建模这一问题上, 经历了从简单粗糙到细致精确的过程, 大致包括以下三类模型: 简单几何体组合模型、平面面元模型、参数曲面模型。目前, 最常用的建模方法是平面元法。随着计算机辅助设计与制造技术的发展, 非均匀有理 B 样条 (NURBS) 曲面被广泛应用于各种复杂物体 (如: 飞机、坦克、舰艇等) 的设计与制造中, 直接基于 NURBS 曲面的目标电磁散射物理光学 (PO) 分析有着很多的优越性, 但是基于 NURBS 曲面的目标电磁散射物理光学分析——NURBS 曲面上的物理光学积分的计算是二重积分, 但这个物理光学积分的实时、精确的数值计算困难, 目前它还是阻碍 NURBS 曲面建模广泛应用的一个较大障碍。而平面面元模型是用一系列的平面和棱边来描述复杂目标, 这样就将复杂曲面面积分转化为各平面面元面积的代数和。平面面元积分可以用路德维格积分、物理光学积分计算, 边缘绕射可以由物理绕射理论 (PTD)、增量长度绕射系数法 (IDL) 等方法求得。面元法的优点在于可灵活改变目标形状, 相位计算容易 (因为相位计算是在平面的层次, 而不是在组件层次); 可以计算多次散射; 方便处理介质涂覆问题; 不连续点可以在目标的任意位置。它的缺点在于对于复杂目标分块数目较大, 需要大量内存来记录每一个面元及其与相邻面元的关系; 人为加入了“人工”棱边, 这样计算时就会产生“噪声”, 影响 RCS 计算精度。但对于卡车、坦克、装甲车等非旋转目标, 它能在一定程度上克服这些缺点。本文就运用平面面元中的三角面元来建立雷达目标的模型。由于路德维格积分较物理光学积分在计算装甲车、坦克等目标时简洁, 而且能够满足计算精度, 因此选用路德维格积分。

像军用卡车、坦克、装甲车、火箭发射车、导弹发射车、飞机等雷达目标这样的大型复杂目标采用手工面元建模是不可能的, 只有采用 CAD 软件包进行计算机辅助建模, 才能使复杂目标的 RCS 面元计算具有实际应用价值。AutoCAD 和 3D Studio Max 等优秀的图形软件包都支持目标的三角面元逼近模拟。首先在网上下载拟研究的雷达目标模型 (省去自己建模的不精确和困难, 且现在几乎可在网上得到任何你感兴趣的模型。模型可为 CAD 模型, 也可为 3DS 模型), 然后采用了 AutoCAD 或 3D Studio Max 对目标进行三角面元剖分 (复杂目标可划分为几个主要的部件, 对每一个部件进行三角面元的逼近, 部件拼装时, 需用 3D Studio Max 进行布尔运算), 用 3 个数组来存储在计算其 RCS 过程中所需要的目标结构信息:

- ✦ 顶点数组: 以顶点的编号为序存放各顶点的坐标值;
- ✦ 面元数组: 以表面编号为序存放多面体各面的顶点序号, 并按逆时针方向排列 (该方向与表面

的外法向量成右手关系);

✦ 劈数组:以劈号为序存放各劈的参数,包括劈的起始和终止端点的顶点号、劈的左、右表面号。

以上三个数组就构成了目标面—劈模型的数据结构。然后,把模型的数据经转换存入文件中,通过程序从中读取每一个面元的各顶点坐标,再用上面所述的面元 RCS 算法进行计算。

3 基于三角面元的 RCS 计算

3.1 面元散射计算

对于电磁散射场计算,其积分的计算公式一般有下列形式:

$$E_s = \iint_S F(u, \nu) e^{jk(u, \nu)} du dv \quad (1)$$

式中, $F(u, \nu)$ 、 $\nu(u, \nu)$ 都可假定为实函数, $k = 2\pi/\lambda$ 为传播常数, S 为散射目标的表面。在一般情况下,被积函数在 S 上的变化非常迅速,这时不能应用常规的数值积分技术进行计算,而要运用路德维格运算法则,它首先将积分区域分成许多积分面元,然后在积分面元上运用两个线性多项式来近似 $F(u, \nu)$ 、 $\nu(u, \nu)$, 则:

$$E_s = \sum_{c=1}^{N_c} E_c \quad (2)$$

式中, N_c 为三角面元总数。根据文献 [7], E_c 可写成下列形式:

$$E_c = \int_0^1 \int_0^{1-p} C_c(p, q) e^{jD_c(p, q)} dp dq \quad (3)$$

其中:

$$C_c(p, q) = C_p p + C_q q + C_0 \quad (4)$$

$$D_c(p, q) = D_p p + D_q q + D_0 \quad (5)$$

$$\begin{cases} C_p + F_{c,1} - F_{c,3} \\ C_q = F_{c,2} - F_{c,3} \\ C_0 = F_{c,3} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} D_p = k(r_{c,1} - r_{c,3}) \\ D_q = k(r_{c,2} - r_{c,3}) \\ D_0 = kr_{c,3} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $F_{c,i}$ 、 $kr_{c,i}$ ($i=1, 2, 3$) 是第 c 个三角面元的第 i 个节点的幅度和相位,且 $kr_{c,i} \in (-\pi, \pi)$ (通过加上 $2n\pi$ ($n = \pm 1, 2, 3, \dots$) 实现), 由激励场决定。

此时 E_c 积分可由下式计算:

$$E_c = 2S_c e^{jD_0} \left\{ e^{jD_p} \left[\frac{C_p + C_0}{D_p(D_q - D_p)} + G_1 - G_2 \right] - e^{jD_q} \left[\frac{C_q + C_0}{D_q(D_q - D_p)} - G_2 \right] - \frac{C_0}{D_p D_q} - G_1 \right\} \quad (8)$$

$$G_1 = \frac{j}{D_p D_q} \left(\frac{C_p}{D_p} + \frac{C_q}{D_q} \right) \quad (9)$$

$$G_2 = \frac{j}{D_q(D_q - D_p)} \left(\frac{C_p - C_q}{D_q - D_p} - \frac{C_q}{C_p} \right) \quad (10)$$

当 $|D_p|$ 、 $|D_q|$ 、 $|D_p - D_q|$ 较小时,上述积分可能奇异,可将 e^{jD_i} 按泰勒级数展开计算。将(6)、(7)、(9)、(10)式代入(8)式,可得每一三角面元散射场,将(8)式代入 RCS 的平方根定义可得每一三角面元 RCS 的平方根:

$$\sqrt{\sigma_c} = \lim_{R \rightarrow \infty} 2 \sqrt{\pi R} \frac{E_c \cdot e_r}{E_0} e^{-jkR} \quad (11)$$

3.2 棱边散射计算

前面讲到,运用三角面元模拟复杂目标时,除去面元外还会有棱边(尖劈,含“人工”的),尖劈的内角大小取决于两相邻小平面的夹角,即取决于目标表面的曲率半径和分块的多少。由物理绕射理论知,散射场为^[8]:

$$E_{sw} \cdot e_r = \frac{L e^{jkR}}{2\pi R} E_0 \frac{(e_i \cdot t)(e_s \cdot t)f + (h_i \cdot t)(h_s \cdot t)g \sin(kL \cos\beta)}{\sin^2\beta} e^{jki \cdot r_c} \quad (12)$$

式中 e, h 为单位电场和磁场矢量,下标 i, s 代表入射场和散射场, r_c 是坐标原点到尖劈边缘中心位置的矢量, t 是沿尖劈边缘的单位矢量, L 是尖劈边缘的长度, $\beta = \arccos(i \cdot t)$, f 和 g 是尤费赛夫(Ufimtsev)物理绕射系数,当计算后向散射场时 f 和 g 分别为:

$$\begin{cases} f = X - Y + U_1 Y_1 + U_2 Y_2 \\ g = X + Y - U_1 Y_1 - U_2 Y_2 \end{cases} \quad (13)$$

其中,

$$\begin{cases} X = \frac{\sin(\pi/\bar{\alpha})}{\bar{\alpha}[\cos(\pi/\bar{\alpha}) - 1]} \\ Y = \frac{\sin(\pi/\bar{\alpha})}{\bar{\alpha}[\cos(\pi/\bar{\alpha}) - \cos(2\Psi_i/\bar{\alpha})]} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} Y_1 = -\frac{1}{2}\tan\Psi_i \\ Y_2 = -\frac{1}{2}\tan(\alpha - \Psi_i) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} U_1 = \begin{cases} 1, & \text{上表面被照射} \\ 0, & \text{上表面被遮挡} \end{cases} \\ U_2 = \begin{cases} 1, & \text{下表面被照射} \\ 0, & \text{下表面被遮挡} \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

$\bar{\alpha}$ 为尖劈外角 α 对 π 归一化的外劈角,即 $\bar{\alpha} = \frac{\alpha}{\pi}$, Ψ_i 为入射波单位矢量 i 的横向分量与上表面之间的夹角,则尖劈的 RCS 平方根的公式:

$$\sqrt{\sigma_s} = \frac{L(e_i \cdot t)(e_s \cdot t)f + (h_i \cdot t)(h_s \cdot t)g}{\sqrt{\pi} \sin^2\beta} \cdot \frac{\sin(kL \cos\beta)}{kL \cos\beta} e^{jki \cdot r_c} \quad (17)$$

假定复杂目标共分为 m 块面元和 n 个尖劈,则复杂目标总的 RCS 可以由下式来确定:

$$\sigma = \left| \sum_{i=1}^m (\sqrt{\sigma_c})_i + \sum_{j=1}^n (\sqrt{\sigma_s})_j \right|^2 \quad (18)$$

4 装甲车与坦克的 RCS 计算结果

为了验证基于三角面元的路德维格积分计算雷达目标电磁散射特性的正确性,首先计算了一个与此类目标尺寸同数量级的金属方柱(8m×4m×2m,方柱长的方向为 X 轴方向,宽的方向为 Y 轴方向,正 X 轴是方位角 0°)的 RCS,雷达工作频率为 X 波段,下视角为 30° ,计算结果如图 2 所示,它与 PO 解十分接近,由此可以看出,这种简便方法具有足够的精度。图 3 至图 6 分别是装甲车在 C 波段和 X 波段、HH 极化、VH 极化和 VV 极化 15° 下视角的 RCS 方位分布图,图 7 是坦克在 HH 极化和 15° 下视角的 RCS 方位分布图。它们的坐标定义如下:面对装甲车的正左侧是正 X 轴,装甲车的正前方是正 Y 轴,正左侧是方位角 0° ,从这些图中可以看出:

(1) 对比图 3 和图 4 装甲车在 VV、HH 两个极化条件下的 RCS 趋于一致。事实上,在不考虑其他因素的情况下,对于装甲车这类非细长、大曲率的雷达目标而言,当电磁波照射到物体上时,其感应电流与电磁波照射到平板上激励的感应电流类似,再由感应电流激励的散射场就不易发生极化偏转。但是,在某些观测角度,其交叉极化具有足够能量,如图 5 所示(在方位角 140° 左右),因此其变极化特性可以作为我们区别目标的重要特征。

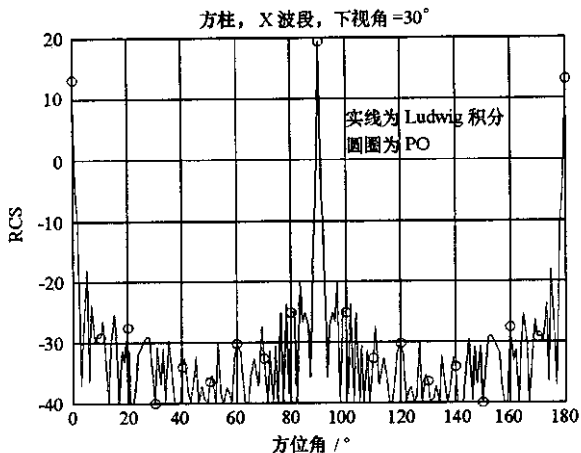


图2 8m × 4m × 2m 金属方柱 RCS 的方位分布

Fig. 2 RCS from the cuboids

(2) 对比图 3 和图 6,装甲车在 X 波段和 C 波段 RCS 随方位分布趋于一致。对于工作在 C 波段、X 波段的雷达而言,装甲车等雷达目标处于光学区,RCS 对频率不再敏感,因此其 RCS 分布也相似。

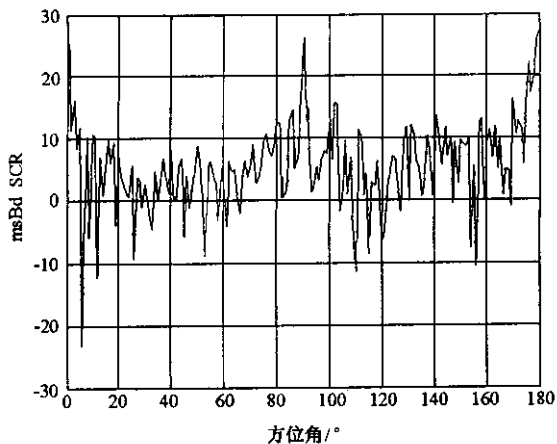


图3 装甲车 C 波段,HH 极化,下视角 15°

Fig. 3 RCS from the armored cars, HH polarization, C waveband, depression angle = 15°

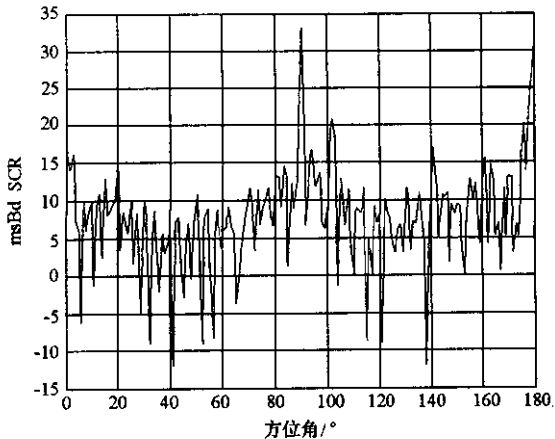


图4 装甲车 C 波段,VV 极化,下视角 15°

Fig. 4 RCS from the armored cars, VV polarization, C waveband, depression angle = 15°

(3) 对比图 3 和图 7,装甲车与坦克的 RCS 的方位分布并不一致,说明 RCS 是雷达目标的固有特性,不同目标的 RCS 一般不同,这为目标检测、分类提供可能。

(4) 分析图 3、4、6、7,目标的 RCS 的最大值集中在 0°、90°、180° 等方位上,这是因为目标 RCS 的来源主要在于镜面反射,而这些角度上雷达刚好能接收到此类强散射。

5 结束语

通过上面的计算表明,采用三角面元对雷达目标进行建模,在此基础上运用路德维格积分和物理绕射理论计算其电磁散射特性,其方法简单有效。上述计算结果是模拟星载和机载平台的雷达探测目标的计算结果。对于此类工作在光学区的非细长目标,其 RCS 对雷达工作的频段和极化并不敏感。由于不同目标的 RCS 在不同方位上有着较明显的差别,为进一步对它们进行检测、分类提供了可能。此外,文中在讨论目标的 RCS 时,并未考虑地面背景的影响;星载或机载平台探测地面目标时,得到的数据一般都是 SAR 图像,这也需在以后的文章中进一步讨论。

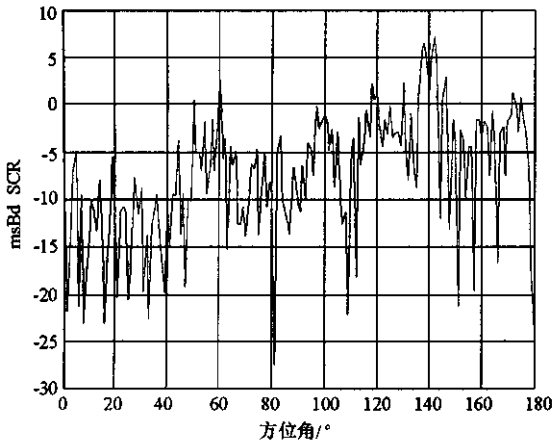


图5 装甲车 C波段 ,VH极化 ,下视角 15°
Fig.5 RCS from the armored cars ,VH polarization ,
C waveband ,depression angle = 15°

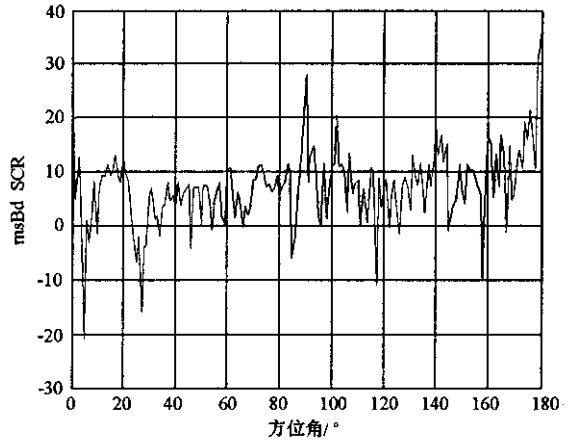


图6 装甲车 X波段 ,HH极化 ,下视角 15°
Fig.6 RCS from the armored cars ,HH polarization ,
X waveband ,depression angle = 15°

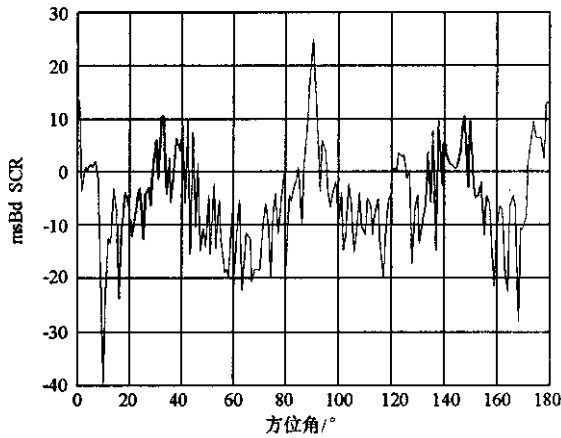


图7 坦克 C波段 ,HH极化 ,下视角 15°
Fig.7 RCS from the tank ,HH polarization ,C waveband ,depression angle = 15°

参考文献 :

- [1] LUDWIG A C. Computation of Radiation Patterns Involving Numerical Double Integration[J]. IEEE Trans. AP ,1968 (6).
- [2] Proceedings IEEE Special Issue on Radar[C]. 1965 (8) ;1985 (2).
- [3] Proceedings IEEE Special Issue on Radar Cross Section[C]. 1989 (5).
- [4] IEEE Proceedings Ding-F Radar & Signal Proceedings Special Issue on Radar Cross Section[C]. 1989 (5).
- [5] 孙家广 ,杨元贵. 计算机图形学[M]. 北京 :清华大学出版社 ,1995.
- [6] 朱贤阳 ,杨儒贵 ,陈益邻. 复杂目标雷达散射截面计算方法的新进展[J]. 电波科学学报 ,1998 (9).
- [7] Moreira ,Prata. A Self-checking Predictor-corrector Algorithm for Efficient Evaluation of Reflector Antenna Radiation Integral[J]. IEEE Trans. Antennas & Prop. ,1994 ,42(2) 246 - 254.
- [8] 韩明华. 光学区复杂目标 RCS 特征信号计算及实验研究[D]. 国防科技大学硕士论文 ,1999.

