

基于三角面元求解复杂目标 RCS 方法

陈俊吉¹, 李铜川², 庞春生³

(1. 95948 部队, 甘肃 酒泉 732750; 2. 航天科工集团 35 所军事代表室, 北京 100013;
3. 93942 部队, 陕西 咸阳 712000)

摘要:为了解复杂目标的雷达散射截面, 通过把复杂电大尺寸目标剖分成若干电小尺寸的三角形面元, 使每个面元满足远场条件。采用物理光学法对可见区域小三角面元进行积分求和, 利用等效电磁流法对三角面元特征量及其劈边缘进行积分之和, 并应用 Gordon 解析式求解整个复杂目标 RCS。通过仿真计算对其结果进行对比分析, 该方法计算出来的复杂目标 RCS 是有效的、准确的, 可以作为实际工程应用的一种方法。

关键词:三角面元; 物理光学法; 等效电磁流法; 雷达散射截面

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2013)11-0011-03

Calculating Complex Targets Radar Cross Section Based on Triangle Facets

CHEN Jun-ji¹, LI Tong-chuan², PANG Chun-sheng³

(1. The Chinese People's Liberation Army 95948 Unit, Jiuquan 732750, China;

2. Military Representative Office in 35 Institution of Space Science Industrial Group, Beijing 100013, China;

3. The Chinese People's Liberation Army 93942 Unit, Xianyang 712000, China)

Abstract: In order to solve the complex target of radar cross-section (RCS), this paper divides the large complex target into a number of small triangular polygon segments, making each segment to meet the far-field conditions. This paper solves the entire complex goal of RCS by the physical optics method (PO) to integral the characteristics of the small triangle polygon segment in lighting district, and by the equivalent current method (ECM) to integral the edge of the small triangle polygon segment, and also with the Gordon analysis of their results, the complex target RCS which computed by the method is not only valid but also accurate, and more importantly this method can be used as a way of practical engineering applications.

Key words: triangle facets; physical optics; equivalent current method; radar cross section

由多个不同散射点的散射场构成的电大复杂目标散射场, 其散射点的幅度与相位随雷达照射角度、接收方位、频率和极化方式等发生变化而变化, 形成一个十分复杂的函数关系, 为了对电大复杂目标散射场进行计算, 可采用低频方法、高频方法^[1-3]。用低频方法计算复杂目标散射场时, 由于计算机存储量和速度的限制, 对于求解电大尺寸复杂目标的电磁散射问题方面有一定的困难; 采用高频方法计算电大复杂目标的总散射场时, 由于高频散射是一种局部现象, 可以由

多个独立的散射中心的散射场叠加而得到总散射场, 但忽略了各散射中心相互间的多次散射和遮挡效应。一般情况下, 目标尺寸远远大于工作波长, 采用高频近似理论计算对工程实践具有实用性和准确性, 满足一般实际工程需要。本文从面元法的计算原理出发, 在计算目标 RCS 时, 将物理光学中的面积分转化为各面元特征量面积分的代数和, 而三角形面元特征量的积分转化为围线积分, 并表示为 Gordon 解析式^[4,5,9]。即对已经建立好的电大复杂目标数学模型, 对其

收稿日期: 2013-07-10

作者简介: 陈俊吉(1972—), 男, 博士, 工程师, 主要从事目标建模与电磁散射计算研究。

剖分成若干电小尺寸的面元,经消隐处理后,利用三角形面元的 PO 法和采用优化后推导的 ECM 法求解^[6-12]。该方法与前面几种计算方法相比:计算方便、效率高,具有较强的实际工程应用价值。

1 计算复杂目标 RCS 的处理方法

对复杂电大尺寸目标剖分成若干电小尺寸的三角形面元,经过遮挡处理后由 Stratton-Chu 积分方程可以得到远区场的散射电场为:

$$\vec{E}_s = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \frac{\exp(-jkR)}{R} \int_{s'} \hat{s} \times (M(\vec{r}') + Z_0 \hat{s} \times J(\vec{r}')) \exp(jk\hat{s} \cdot \vec{r}') ds' \quad (1)$$

式(1)中: μ_0 表示自由空间的磁导率; k 和 Z_0 分别表示自由空间的波数和本征阻抗; \hat{i} 和 \hat{s} 分别表示入射波和散射波的单位矢量; \vec{r}' 表示目标表面点的位置矢量; \vec{r} 表示观察点的位置矢量; R 表示观察点到原点的距离; $\hat{n}(\vec{r}')$ 表示目标表面点的外向单位法矢量; $M(\vec{r}') = \hat{n} \times \vec{E}(\vec{r}')$; $J(\vec{r}') = \hat{n} \times \vec{H}(\vec{r}')$ 分别表示可见区域面元等效电流和等效磁流。

根据式(1), PO 离散成可见三角面元 PO 的积分求和^[8]:

$$\vec{E}_s^{PO}(\vec{r}', \omega) = \frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{k=1}^N \hat{s} \times (\vec{M}_s^k + Z_0 \hat{s} \times \vec{J}_s^k) \cdot I^k \quad (2)$$

式(2)中: N 表示可见区域三角面元数; I^k 表示第 k 个三角面元的特征量积分,即

$$I = \int_s \exp[jk \vec{r}' \cdot (\hat{s} - \hat{i})] ds' \quad (3)$$

采用 Gardon 方法^[4]表示为:

$$I^k = \frac{1}{jk |\hat{n} \times \hat{w}| \Delta A_m} \sum_{m=1}^3 (\hat{n} \times \hat{w}) \cdot \vec{a}_m \exp(jk \vec{r}_m \cdot \hat{w}) \operatorname{sinc}\left(\frac{1}{2} k \vec{a}_m \cdot \hat{w}\right) \quad (4)$$

式(4)中: $\hat{w} = \hat{s} - \hat{i}$; \vec{a}_m 表示面元 s_i 第 m 条边矢量,取向与面元法向矢量 \hat{n} 成右手螺旋关系; \vec{r}'_m 表示第 m 条边中点位置矢量; $\operatorname{sinc}(x) = \sin x/x$; \hat{i} 和 \hat{s} 分别表示入射和散射方向单位矢量。当 $|\hat{n} \times \hat{w}| = 0$ 时,式(1)简化为:

$$I^k = \Delta A^k \exp(jk \vec{r}'_0 \cdot \hat{w}) \quad (5)$$

式(5)中: \vec{r}'_0 表示三角形面元上任意点的位置矢量; ΔA^k 表示第 k 个三角面元的面积。

在复杂目标 RCS 计算中,边缘绕射场的计算也是一个重要的部分。在计算绕射场的现有算法中,等效边缘流方法是较为有效的方法之一,对有限长度的劈边给出了较为准确的散射场估计。在计算复杂目标 RCS 过程中,采用优化后推导公式,把边缘绕射积分区域分成直线线段,边缘绕射积分离散成可见区域三角面元特征量劈边缘的积分之和^[6-9]。

$$\vec{E}_s^{ECM}(\vec{r}, \omega) = \frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{k=1}^{N_m} [Z_0 \hat{s} \times (\hat{s} \times \vec{i}) I^k + \hat{s} \times \vec{i} M^k] \cdot I^k \quad (6)$$

式(6)中: N_m 为可见区域三角面元数; I^k 为第 k 个劈边缘的特征量积分,即

$$I^k = \int_s \exp[jk \vec{r}' \cdot (\hat{s} - \hat{i})] ds' = l_k \operatorname{sinc}\left(\frac{1}{2} kl_k \hat{w} \cdot \hat{i}\right) \exp(jk \hat{w} \cdot \vec{r}'_0) \quad (7)$$

$$I^f = \frac{-2j}{Z \sin^2 \beta} \left\{ \frac{\sin \phi U(\pi - \phi)}{\cos \phi + \mu_1} + \frac{(1/N) \sin(\phi/N)}{\cos[(\pi - \alpha_1)/N] - \cos(\phi/N)} + \frac{\sin(N\pi - \phi) U(\pi + \phi - N\pi)}{\cos(N\pi - \phi) + \mu_2} + \frac{(1/N) \sin[(N\pi - \phi)/N]}{\cos[(\pi - \alpha_2)/N] - \cos[(N\pi - \phi)/N]} \right\} \cdot \vec{E}'_0 + \left\{ \frac{2j \sin[(\pi - \alpha_1)/N]}{Nk \sin \beta \sin \alpha_1} \cdot \frac{\mu_1 \cot \beta' - \cot \beta \cos \phi}{\cos(\phi/N) - \cos[(\pi - \alpha_1)/N]} - \frac{2j \sin[(\pi - \alpha_2)/N]}{Nk \sin \beta \sin \alpha_2} \cdot \frac{\mu_2 \cot \beta' - \cot \beta \cos(N\pi - \phi)}{\cos[(N\pi - \phi)/N] - \cos[(\pi - \alpha_2)/N]} \right\} \cdot \vec{H}'_0$$

$$M^f = \frac{2jZ \sin \phi}{k \sin^2 \beta} \left\{ \frac{U(\pi - \phi)}{\cos \phi + \mu_1} - \frac{(1/N) \sin[(\pi - \alpha_1)/N] \operatorname{csc} \alpha_1}{\cos(\phi/N) - \cos[(\pi - \alpha_1)/N]} \right\} \cdot \vec{H}'_0 + \frac{2jZ \sin(N\pi - \phi)}{k \sin^2 \beta} \left\{ \frac{U(\pi + \phi - N\pi)}{\cos(N\pi - \phi) + \mu_2} - \frac{(1/N) \sin[(\pi - \alpha_2)/N] \operatorname{csc} \alpha_2}{\cos[(N\pi - \phi)/N] - \cos[(\pi - \alpha_2)/N]} \right\} \cdot \vec{H}'_0 \quad (8)$$

式(8)中: l_k 为第 k 个劈边缘长度; \vec{r}'_0 为劈边缘的中心位置矢量; $\cos \alpha_1 = \mu_1 = \cos \phi - 2 \cot^2 \beta$, $\cos \alpha_2 = \mu_2 = \cos(N\pi - \phi) - 2 \cot^2 \beta$, β' 和 $\beta = \pi - \beta'$ 分别为 O 点处的局部边缘切向 \hat{z} 分别与入射方向 \hat{s}' 和散射方向 \hat{s} 所构成的张角; $U(x)$ 为单位阶跃函数; $\hat{i} = d\vec{r}'/dl$ 为沿着 C 的单位矢量; $\hat{s} = \vec{s}/s = (\vec{r} - \vec{r}')/|\vec{r} - \vec{r}'|$ 为边缘上的 C 点到观察点的单位矢量; \vec{E}'_0 和 \vec{H}'_0 分别为边缘上 O 点的入射电场和入射磁场。

2 仿真实例

在远场情况下,入射频率为 X 波段,某靶机在 C、X 波段不同极化形式、不同姿态下的仿真结果见图 1、图 2;某巡航靶标在 X 波段垂直极化下不同姿态 RCS 见图 3。从图 3 中可以看出,随着姿态角发生变化,复杂目标 RCS 发生巨大变化,甚至可以达到 10 dBsm 以上;复杂目标 RCS 随俯仰角的变化比随着滚动角的变化敏感;结构越复杂的目标,其 RCS 随着姿态角发生变化更大。结果反映了入射波与目标不同部分相互作用时散射场的变化趋势。

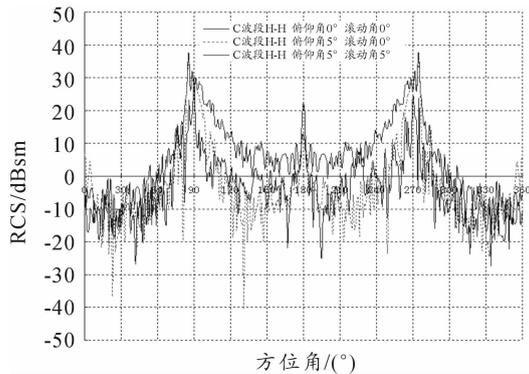


图1 某靶机在 C 波段水平极化不同姿态 RCS

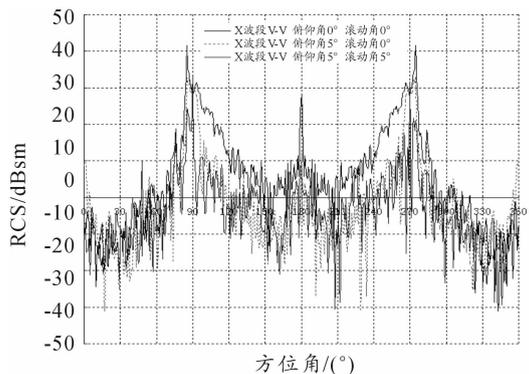


图2 某靶机在 X 波段垂直极化不同姿态 RCS

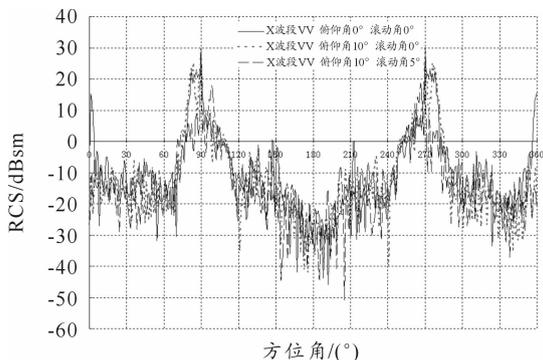


图3 某巡航靶标在 X 波段垂直极化下不同姿态 RCS

3 结束语

本文通过把复杂电大尺寸目标离散成若干电小尺寸的三角形面元,并采用物理光学法对可见区域三角面元特征量进行积分求和与边缘绕射系数法对三角面元特征量劈边缘进行积分之和求解整个复杂电大目标 RCS。仿真结果表明,该方法计算出来的复杂目标 RCS 是准确的、可信的,能满足实际工程应用要求,可以作为实际工程应用的一种方法。

参考文献:

- [1] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [2] 陈宝辉. 雷达目标反射特性[M]. 北京:国防工业出版社,1993.
- [3] Nazih, N Youssef. Radar cross section of complex targets [J]. IEEE Proc. ,1989,77(5):722-734.
- [4] William B. Gordon. Far-Field Approximations to the Kirchhoff-Helmholtz Representations of Scattered Fields [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat. ,1975;590-592.
- [5] Juan M. Rius, Miguel Ferrando, Luis Jofre. High frequency RCS of complex radar target in real time [J]. IEEE Trans Antenna Propag,1993,41(9):1308-1319.
- [6] Michaeli A. Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1984, 23(3):252-258.
- [7] Michaeli A. Elimination of infinities in equivalent edge currents, Part 1: Fringe current components [J]. IEEE Trans Antennas Propagat,1986,34(7):912-918.
- [8] 王超. 高频电磁散射建模方法及工程应用[D]. 北京:中国传媒大学,2009.
- [9] 聂在平,方大纲. 目标与环境电磁散射特性建——理论、方法与实现(基础篇/应用篇)[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [10] 关莹,龚书喜,张帅,等. NURB, 曲面建模的电大目标的宽带 RCS 快速计算[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010,32(11):2730-2734.
- [11] Zha F T, Gong S X, Xu Y X, et al. Fast shadowing technique for electrically large targets using z-buffer [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2009, 23(2/3):341-349.
- [12] 刘春阳,焦永昌,张朋,等. 一种飞翼布局无人机的 RCS 研究 [J]. CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE, 2009,24(1):95-98.
- [13] Juan M. Rius, Miguel Ferrando, Luis Jofre. High frequency RCS of complex radar target in real time [J]. IEEE Trans. Antenna Propag. ,1993,41(9):1308-1319.
- [14] 赵维江. 复杂目标雷达截面计算方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,1999.

(责任编辑 杨继森)