

# 目标双站 RCS 计算的综合分析法和电磁仿真

赵 蕾<sup>1</sup> 吴振森<sup>1</sup> 张在尚<sup>2</sup> 杨晓维<sup>1</sup> 代少玉<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学, 陕西 西安 710071; 2. 中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107)

**摘要** 将计算平面目标物理光学(PO)场的等效边缘电磁流(POEEC)进行推广, 给出了能够计算散射总场的综合分析法, 并修正了原来文献中出现的小错误, 并用得出的 GTDEEC 公式计算了尖锥圆柱的双站 RCS, 还用仿真软件 CST 计算了上述尖锥圆柱的双站 RCS, 将二者的结果进行比较, 验证了此方法的正确性, 并证明了此方法具有更具有广泛适应性。

**关键词** 等效边缘电磁流法, CST, 双站雷达散射截面

## 1 引言

等效边缘电磁流法(MEC)是计算电大尺寸复杂目标 RCS 的有效方法之一。它避免了集合绕射理论(GTD)轴向焦散, 推广了 GTD 和物理绕射理论(PTD)的规定, 可用之分析双站散射。该方法的关键问题是寻找合适的等效边缘电磁流  $I$  和  $M$ 。目前存在的 EEC 可分为三类: 计算物理光学场(PO)的 PO-EEC, 计算总场的 GTD-EEC 和边缘绕射场的 PTD-EEC。Michaeli<sup>[7,8,10]</sup>首次严格导出了能计算任意入射和散射方向散射方向总场的等效电磁流公式, 并为了克服奇异点, 他又将物理光学场从中减去, 导出了具有良好属性的 PTDEEC 公式。由于在 PTDEEC 中没有考虑 PO 场, 因而必须用其它合理方法计算出 PO 场, 才能求得总场。崔索民、吴振森等<sup>[1,3]</sup>根据 Ando 和 Johanson 等人的思想, 导出了含有真实奇异点的 POEEC 公式, 给出了准一致性的 PO-EEC 公式, 最后给出了一组具有良好属性的 GTDEEC 公式, 即综合分析法, 本文修改了上述方法中的一点小错误, 并用之分析了尖锥圆柱的双站 RCS, 并与 CST 的仿真结果进行了比较。

CST 是一种利用时域有限积分的法进行计算的电磁仿真软件, 需要将整个计算区域离散化, 然后进行计算, 因此其应用范围和计算速度要受到电尺寸的限制。

## 2 综合分析法基本公式

等效边缘电磁流的基本方法是假设在边缘回

路上各点存在线电流  $I$  和线磁流  $M$ , 如图 1, 辐射场用如下积分计算:

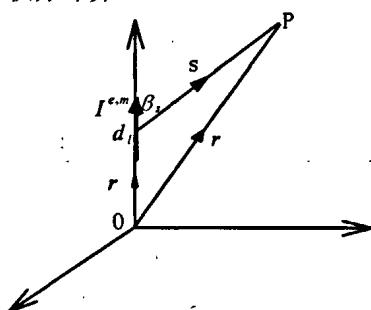


图 1 等效电磁流辐射场

$$\vec{E}_s = jk_0 \int_c [\eta_0 I(\vec{r}) \hat{k}_s \times (\hat{k}_s \times \hat{t}) + M(\vec{r}') (\hat{k}_s \times \hat{t})] \frac{\exp(-jk_0 S)}{4\pi s} dl \quad (1)$$

其中,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  是自由空间入射波的波数,  $\eta_0 = \mu_0 \epsilon_0$  是自由空间的特征波阻抗,  $\hat{k}_s$  为散射波波矢量,  $\hat{t}$  为劈边缘的切线,  $\vec{r}'$  是劈边缘上一点的位置矢量,  $S = |\vec{r}' - \vec{r}|$ ,  $\vec{r}$  是观察点的位置矢量(如图 1)。

如图 2, POEEC 的一般表达式为<sup>[1]</sup>

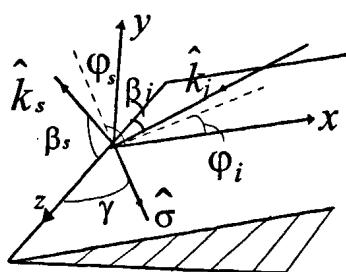


图 2 劈散射几何示意图

$$I^{PO} = \frac{2j\bar{E}_0^i \cdot \hat{i}}{k_0 \eta_0 \sin^2 \beta_i} D_e^{PO} + \frac{2j\bar{H}_0^i \cdot \hat{i}}{k_0 \sin \beta_i} D_{em}^{PO} \quad (2-a)$$

$$M^{PO} = \frac{2j\eta_0 \bar{H}_0^i \cdot \hat{i}}{k_0 \sin \beta_i \sin \beta_s} D_m^{PO} \quad (2-b)$$

其中：

$$D_e^{PO} = \frac{\sin \varphi_i}{\cos \varphi_i + u_1} U_1 + \frac{\sin(n\pi - \varphi_i)}{\cos(n\pi - \varphi_i) + u_2} U_2 \quad (3-a)$$

$$D_m^{PO} = - \left\{ \frac{\sin \varphi_s}{\cos \varphi_i + u_1} U_1 + \frac{\sin(n\pi - \varphi_s)}{\cos(n\pi - \varphi_s) + u_2} U_2 \right\} \quad (3-b)$$

$$D_{em}^{PO} = - \frac{\cot \beta_i \cos \varphi_i + \cot \beta_s \cos \varphi_s}{\cos \varphi_i + u_1} U_1 + \frac{\cot \beta_i \cos(n\pi - \varphi_i) + \cot \beta_s \cos(n\pi - \varphi_s)}{\cos(n\pi - \varphi_i) + u_2} U_2 \quad (3-c)$$

$$u_1 = \frac{\sin \beta_s \cos \varphi_s + \cot \gamma_1 (\cos \beta_s - \cos \beta_i)}{\sin \beta_i} \quad (4-a)$$

$$u_2 = \frac{\sin \beta_s \cos(n\pi - \varphi_s)}{\sin \beta_i} - \frac{\cot \gamma_2 (\cos \beta_s - \cos \beta_i)}{\sin \beta_i} \quad (4-b)$$

$$U_1 = U(\pi - \varphi_i), U_2 = U[(1-n)\pi + \varphi_i] \quad (4-c)$$

$$U(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

$\gamma_1, \gamma_2$  为导出 POEEC 公式时选用的位于劈上表面和下表面的积分方向与劈切线方向  $\hat{i}$  的夹角，其它参量见图 2。选用合理的  $\gamma_1, \gamma_2$  可得到尽可能少奇异点的 POEEC 公式。Ando 等已经证明他们给出的积分方向消除了 POEEC 的虚假奇异点，可以计算平面目标 PO 场。采用上表面的积分方向为

$$\cot \gamma_1 = \frac{\cos \beta_s - \cos \beta_i}{\sin \beta_i \cos \varphi_i + \sin \beta_s \cos \varphi_s} \quad (5)$$

采用替换  $\beta_s \rightarrow \pi - \beta_s, \beta_i \rightarrow \pi - \beta_i, \varphi_i \rightarrow n\pi - \varphi_i, \varphi_s \rightarrow n\pi - \varphi_s$  可以得到下表面的积分方向：

$$\cot \gamma_2 = \frac{\cos \beta_s - \cos \beta_i}{\sin \beta_i \cos(n\pi - \varphi_i) + \sin \beta_s \cos(n\pi - \varphi_s)} \quad (6)$$

将(5), (6)代入(4)式，再代入(3)式，可以得到

$$D_e^{PO} = \frac{\sin \varphi_i \sin \beta_i X_1}{X_1^2 + Y_1^2} U_1 + \frac{\sin(n\pi - \varphi_i) \sin \beta_i X_2}{X_2^2 + Y_2^2} U_2 \quad (7-a)$$

$$D_m^{PO} = - \left\{ \frac{\sin \varphi_s \sin \beta_i X_1}{X_1^2 + Y_1^2} U_1 + \frac{\sin(n\pi - \varphi_s) \sin \beta_i X_2}{X_2^2 + Y_2^2} U_2 \right\} \quad (7-b)$$

$$D_{em}^{PO} = \frac{AX_1}{X_1^2 + Y_1^2} U_1 + \frac{BX_2}{X_2^2 + Y_2^2} U_2 \quad (7-c)$$

$$A = \cos \beta_s \cos \varphi_s \sin \beta_i + \cos \beta_i \cos \varphi_i \sin \beta_s$$

$$B = \cos \beta_s \cos(n\pi - \varphi_s) \sin \beta_i + \cos \beta_i \cos(n\pi - \varphi_i) \sin \beta_s$$

$$X_1 = \sin \beta_s \cos \varphi_s + \sin \beta_i \cos \varphi_i$$

$$Y_1 = Y_2 = \cos \beta_s - \cos \beta_i$$

$$X_2 = \cos(n\pi - \varphi_s) \sin \beta_s + \cos(n\pi - \varphi_i) \sin \beta_i$$

经推导发现原文献中不知道是排版错误还是作者疏忽在(7-c)式的分子中少了  $X_1, X_2$ ，在此进行了修正，这里给出的 POEEC 中存在下列奇异点：(1)  $\sin \beta_i = 0$ ，此时入射波沿劈方向入射，趋于无限大；(2)  $\beta_i = \beta_s, \varphi_s \pm \varphi_i = \pi$  和  $\beta_i = \beta_s, (n\pi - \varphi_s) \pm (n\pi - \varphi_i) = \pi$ ，这对应阴影和反射边界。

第一类奇异点对应于一个特殊方向，因此它对散射总场的贡献不大，可忽略。但第二类必须予以修正，参照文献<sup>[4]</sup>(20-25)式，可得到在 Keller 锥上的修正第二类奇异点的一致性 POEEC 公式：

$$D_e^{PO} = \frac{1}{2} [G(\phi_1^+) - G(\phi_1^-)] + \frac{1}{2} [G(\phi_2^+) - G(\phi_2^-)] \quad (8-a)$$

$$D_m^{PO} = - \left\{ \frac{1}{2} [G(\phi_1^+) + G(\phi_1^-)] + \frac{1}{2} [G(\phi_2^+) + G(\phi_2^-)] \right\} \quad (8-b)$$

$$D_{em}^{PO} = (U_1 - U_2) \cot \beta_i \quad (8-c)$$

其中

$$G(x) = \cot\left(\frac{\pi - x}{2}\right) F\left[2k_0 r \sin^2 \beta_i \cos^2\left(\frac{x}{2}\right)\right]$$

$$\phi_1^\pm = \varphi_s \pm \varphi_i, \phi_2^\pm = (n\pi - \varphi_s) \pm (n\pi - \varphi_i)$$

$$F(x) = 2j\sqrt{x}d \exp(jx) \int_x^\infty \exp(-jt^2)dt$$

在计算边缘绕射场时采用 Michaeli 的 PTDEEC, 其理论存在乌费姆采夫奇异点:  $\beta_i = \beta_s$ ,  $\varphi_i = \pi$ ,  $\varphi_s = 0$  和  $\varphi_i = (n-1)\pi$ ,  $\varphi_s = n\pi$ ,  $\beta_i = \beta_s$ , 因而在计算总场时存在  $\sin \beta_i = 0$  和乌费姆采夫奇奇点。

### 3 数值验证

本文计算了尖锥圆柱的双站 RCS 并与 CST 的仿真结果进行比较。目标如图 3 所示, 圆柱和圆锥部分高均为 15cm, 半径为 5cm, 入射波频率为 10GHz, 观察方向均在 xoy 平面上, 即  $\theta_s = 90^\circ$ 。图 4 的入射角  $\theta_i = 90^\circ$ ,  $\varphi_i = 0^\circ$  的交叉极化; 图 5—图 8 入射角  $\theta_i = 0^\circ$ ,  $\varphi_i = 0^\circ$ 。由图可以看出, 同是计算目标双站 RCS 的方法, 综合分析法在尖顶和边缘处的值会更大一些。这是因为综合分析法考虑了尖顶及边缘的影响, 而 CST 所依托的时域有限积分法并没有考虑这些影响。当目标的电尺寸大到一定程度比如大于 100 个波长时, 由于受计算机内存及 CPU 速度的影响, CST 将很难进行计算, 此时综合分析法的优越性便显示出来了。

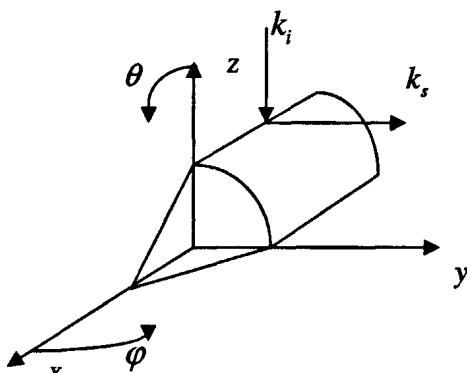


图 3 尖锥圆柱几何示意图

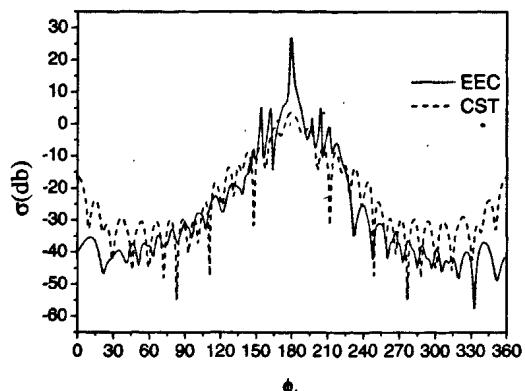


图 4、 $\times\oplus$  极化

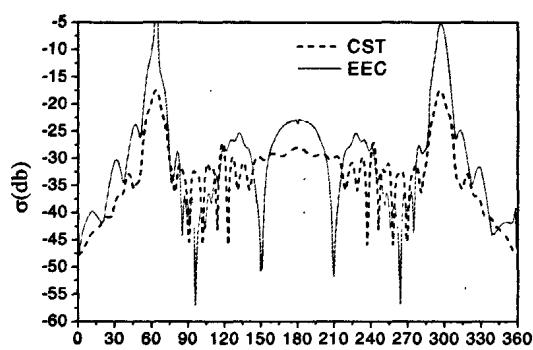


图 5、 $\times\oplus$  极化

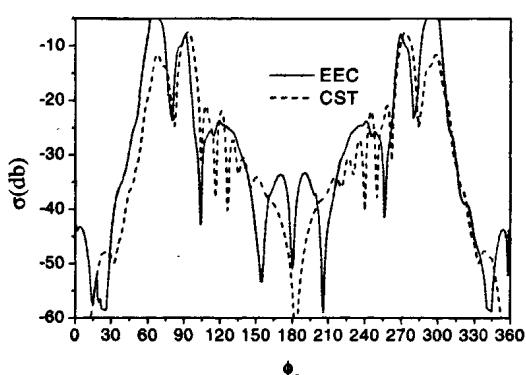


图 6、 $\times\oplus$  极化

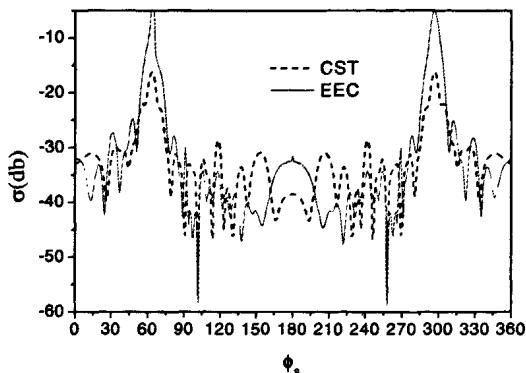
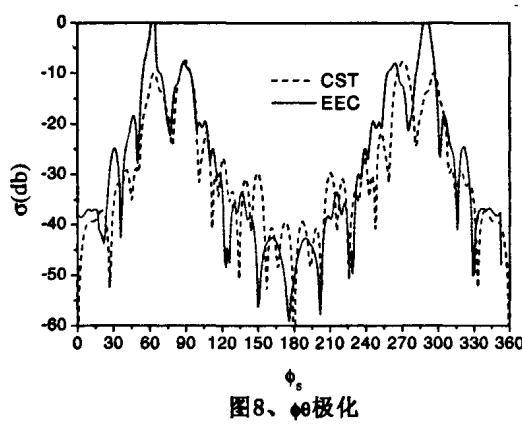


图 7、 $\times\oplus$  极化

图8、 $\phi_0$ 极化

## 4 结论

本文介绍了目标双站 RCS 计算的综合分析法并改正了其中的一个错误，用得出的公式及 CST 软件分别计算了尖锥圆柱的双站 RCS。由结果可以看出综合分析法可以很好的体现目标尖顶和边缘绕射的影响，并且在计算过程中综合分析法更加节省时间。

## 参考文献

- [1] 崔索民.混合法和等效边缘电磁流方法及其在电磁散射中的应用.西安:西安电子科技大学, 1995.
- [2] 张 民.目标双站散射的等效边缘电磁流方法研究.西安:西安电子科技大学, 1998.
- [3] 崔索民, 吴振森.一种计算多面体目标 RCS 的等效边缘

- 电磁流公式.微波学报, 1997, 13, NO.1:20-25.
- [4] R.Tiberio,S.Maci. An incremental theory of diffraction: Scalar formulation. IEEE Trans AP-(42)5: 600-611.
- [5] Sikta,F.A. et al. First-order equivalent current and corner diffraction scattering from flat plate structures. IEEE Trans, 1983, AP-31(4):584-589.
- [6] Yonehiko Sunuhara et al. Separated equivalent edge current method for calculating scattering cross section of polyhedron structures. IEICE Trans. Commun, 1993, E-76B(11): 1439-1444.
- [7] Michaeli,A .Elimination of infinities in equivalent edge currents Pt.1: fringe currents components. IEEE Trans, 1986, AP-3(4):912-918.
- [8] Michaeli, A. Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation. IEEE Trans, 1984, AP-(32):252-258.
- [9] P.Y.Ufimtsev. Elementary edge wave and the physical theory of diffraction. Electromagnetics. 1991, 11(2): 125-159.
- [10] Michaeli,A. Incremental diffraction coefficients for the extended physical theory of diffraction. IEEE Trans, 1995, AP-43(7):732-734
- [11] R .A. Shore, A. D. Yaghjian. Incremental diffraction coefficients for planar surface. IEEE Trans. 1988,AP-36 (1):55-70.

**赵 蕙** (1983-), 女, 山东人, 西安电子科技大学无线电物理专业硕士生, 主要研究方向为等效边缘电磁流法及海面与目标的耦合散射。

**吴振森** (1946-), 男, 湖北人, 现为西安电子科技大学理学院教授, 博士生导师, 主要从事随机戒指、非均匀介质中电磁(光)波的传播与散射、目标激光散射特性和电磁散射等方面的研究。

## 雷达散射截面（RCS）分析培训课程

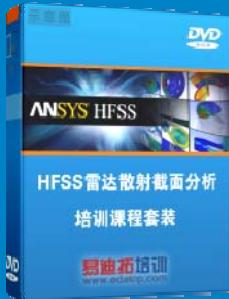
易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

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/>