

# AWE 计算导体宽角度与宽频域 RCS 的效果分析

孙宇乾<sup>1</sup>, 李安平<sup>1</sup>, 童创明<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051; 2 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:**将有理函数逼近方法运用到电磁散射领域中,基于矩量法并结合渐近波形估计技术对雷达散射截面进行加速计算。计算结果表明:渐近波形估计技术不但能准确地逼近矩量法的精确数值解,还可以较快的提高计算速度,但在加速计算导体宽角度与宽频域雷达散射截面时具有不同的效果。

**关键词:**矩量法;渐近波形估计技术;雷达散射截面

**中图分类号:** TN011      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009 - 3516(2006)01 - 0053 - 03

在计算电磁学中,矩量法(MOM)是一种行之有效的经典数值计算方法,它能精确预测任意形状导体的雷达散射截面(RCS)<sup>[1]</sup>。在矩量法求解宽角度与宽频域 RCS 时,必须在不同角度或频域点逐点重复求解矩阵方程才能得到整个范围内的响应,为了获得精确的角度或频率响应,要求扫描间隔必须很小,这必将导致计算工作量十分巨大,因此引入新的方法十分必要。

国际上,AWE 技术在电磁领域中的应用是 90 年代初从静态电磁场分析开始的,如求解 VLSI 电路互连结构<sup>[2]</sup>和微波器件宽带频域响应的快速计算等;90 年代后期被逐渐应用到电磁场的全波分析中,如内无源线性电磁系统的电磁场分析和 RCS 方向图的快速计算等<sup>[3]</sup>。本文从理论上对 AWE 技术应用于宽角度与宽频域 RCS 的原理进行分析,指出 AWE 技术应用于加速计算导体宽频域 RCS 的效果要好于宽角度 RCS,并通过算例对理论分析进行了证明。

## 1 基本理论

在大多数情况下,用 Taylor 级数表示系统函数能得到相当好的结果,不过由于 Taylor 级数的收敛半径小使得其精度有限。在这种情况下,一般是采用有理函数逼近的方法来改进精度,即通过 Taylor 级数的系数与 Pade 逼近匹配将其转化为有理函数的形式。这就是 AWE 技术。求解导体的雷达散射截面(RCS),根本上也就是求解导体表面的散射电流  $I$ ,无论是宽角度或宽频域通过 MOM 都能离散出统一的矩阵方程

$$ZI = V \quad (1)$$

其中: $Z$  是散射体上离散单元之间场的耦合矩阵; $V$  是电磁波激励向量。

### 1) AWE 应用于计算宽角度 RCS

对  $I(\theta)$  进行 Taylor 展开

$$I_n(\theta) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{I_n^{(i)}(\theta_0)}{i!} (\theta - \theta_0)^i \quad (2a)$$

$$I_n^{(i)}(\theta_0) = Z_{mm}^{-1} V_m^{(i)}(\theta_0) \quad (2b)$$

式中,  $V_m^{(i)}(\theta_0)$  是  $V_m(\theta)$  在  $\theta_0$  处的第  $i$  阶导数。在平面波入射下,为了能用 Taylor 级数正确地表示表面电流分布,必须在展开点计算足够多高次矩量  $I_n^{(i)}(\theta_0)$  ( $i = 0, 1, \dots$ ), 即  $i$  应足够大。为了扩大 Taylor 级数的收敛

收稿日期:2005 - 01 - 19

基金项目:空军工程大学学术(联合)基金资助项目(KGD - XL - 02 - 2004 - 02)

作者简介:孙宇乾(1981 -),男,江苏常州人,硕士生,主要从事数值计算与应用软件研究;

李安平(1961 -),男,陕西周至人,教授,主要从事军事运筹和计算数学研究。

半径,最好是将式(2)转化成 Pade 有理函数,即

$$\sum_{i=0}^{\infty} \frac{I_n^{(i)}(\theta_0)}{i!} (\theta - \theta_0)^i = P_n(L/M) + Q(\theta^{L+M+1}); \quad I_n(\theta) \approx P_n(L/M) = \frac{\sum_{l=0}^L a_n^l (\theta - \theta_0)^l}{\sum_{m=0}^M b_n^m (\theta - \theta_0)^m}$$

式中,整数  $L$  和  $M$  分别为 Pade 有理逼近函数  $P(L/M)$  的零、极点阶数。系数  $a_n^l$  和  $b_n^m$  由矩量  $I_n^{(i)}(\theta_0)$  相应确定如下:

$$a_n^j - \sum_{i=0}^{j-1} \frac{I_n^{(i)}(\theta_0)}{i!} b_n^{j-i} = \frac{I_n^{(j)}(\theta_0)}{j!} \quad (3)$$

## 2) AWE 应用于计算宽频域 RCS

对式(1)进行求导可得

$$I(f) = I(f_0) + \sum_{i=1}^{\infty} I^{(i)}(f_0) (f - f_0)^i$$

其中

$$I(f_0) = Z(f_0)^{-1} V(f_0) \quad (4a)$$

$$I^{(i)}(f_0) = Z(f_0)^{-1} \left\{ \frac{V^{(i)}(f_0)}{i!} - \sum_{p=1}^i \frac{Z^{(p)}(f_0)}{p!} I^{(i-p)}(f_0) \right\} \quad (4b)$$

式中,向量  $V^{(i)}(f_0)$  是向量  $V(f)$  在  $f_0$  处对频率  $f$  的第  $i$  阶导数向量,矩阵  $Z^{(p)}(f_0)$  是矩阵  $Z(f)$  在  $f_0$  处对频率  $f$  的第  $p$  阶导数矩阵。将上式转化成 Pade 有理函数,即

$$\sum_{i=0}^{\infty} I_n^{(i)}(f_0) (f - f_0)^i = P_n(L/M) + Q(\theta^{L+M+1}); \quad I_n(f) \approx P_n(L/M) = \frac{\sum_{l=0}^L a_n^l (f - f_0)^l}{\sum_{m=0}^M b_n^m (f - f_0)^m}$$

其中,整数  $L, M$  分别为 Pade 有理逼近函数  $P(L/M)$  的零、极点阶数。系数  $a_n^l$  和  $b_n^m$  由  $I_n^{(i)}(f_0)$  确定为

$$a_n^j - \sum_{i=0}^{j-1} I_n^{(i)}(f_0) b_n^{j-i} = I_n^{(j)}(f_0) \quad (5)$$

式(3)与式(5)中

$$\begin{cases} a_n^j = 0 & (j > L) \\ b_n^j = 0 & (j > M) \\ b_n^0 \equiv 1 \end{cases} \quad (j = 0, 1, \dots, L + M)$$

根据最佳一致性逼近理论,  $L$  和  $M$  应满足如下关系

$$\begin{cases} |M - L| = 1 & (L + M = \text{奇数}) \\ M = L & (L + M = \text{偶数}) \end{cases}$$

通过以上的基本原理可以看到与矩量法相比, AWE 还要求解电压矩阵的各阶导数,逼近公式还需要求解方程组。由于式中  $V^{(i)}$  表示  $V$  对角度或频率的  $i$  阶导数,只有当  $i=0$  时,式(2)、(4)与式(1)的运算时间相同;当  $i$  为其它值时,式(2)、(4)都比式(1)费时。由  $V$  的表达式可以知道,如果对  $V$  求导,运算的复杂度随导数次数的增加成幂次增加!  $V$  的零阶导数运算 4 次乘法、而  $V$  的 6 阶导数运算 138 次乘法,而且渐近波形估计技术还要解方程求解逼近函数表达式的系数以及每段上的电流密度。

在整个计算过程中,矩阵的求逆是最耗时的。在 AWE 技术应用于计算宽角度 RCS 时,阻抗矩阵  $Z$  与入射角度无关,因此它的逆阵并不随每次选取角度的变化而变化。但在宽频域中,阻抗矩阵  $Z$  与频率点有关,因此它的逆阵随每次选取频率点的变化而变化,而且导体的宽频域 RCS 随观察频率点的变化曲线一般比较复杂,所以在观察范围内频率点必须很密才能估计出 RCS 的图形,因此,应用 AWE 技术节省的时间就相当可观。

## 2 算例

下面给出一个具体计算实例来验证前一节理论分析的正确性,为具有对比性,我们选取一导体圆柱分别来计算它的宽角度和宽频域 RCS。

椭圆柱短轴半径  $a = 0.25\lambda$ , 长轴半径  $b = 1\lambda$ , 表面离散 60 段。如图 1 所示, 计算宽角度 RCS 时方向图范围  $90^\circ$ , 展开角  $\theta_0 = 45^\circ$ , MOM 耗时 0.109 4 s, AWE 耗时 0.158 1 s, MOM 计算速度是 AWE 的 1.445 倍。如图 2 所示, 计算宽频域 RCS 时按 0.01 GHz 步进计算, 入射波照射方向为  $0^\circ$ , AWE 按照  $f_0 = 30$  GHz 频率点展开, MOM 耗时 200.9 s, AWE 耗时 2 106.5 s, AWE 的计算速度是 MOM 的 10.45 倍。

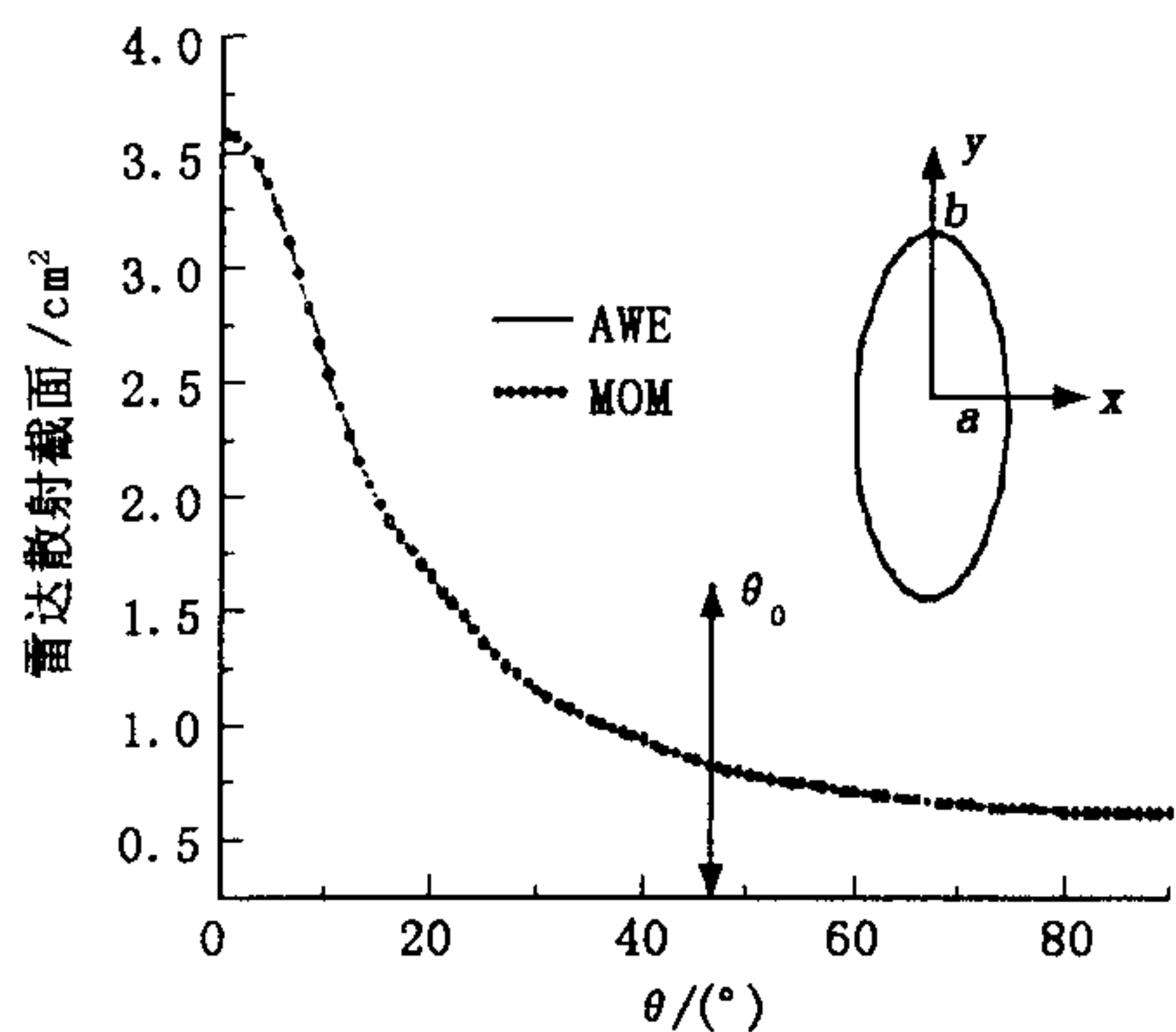


图1 椭圆柱的宽角度 RCS

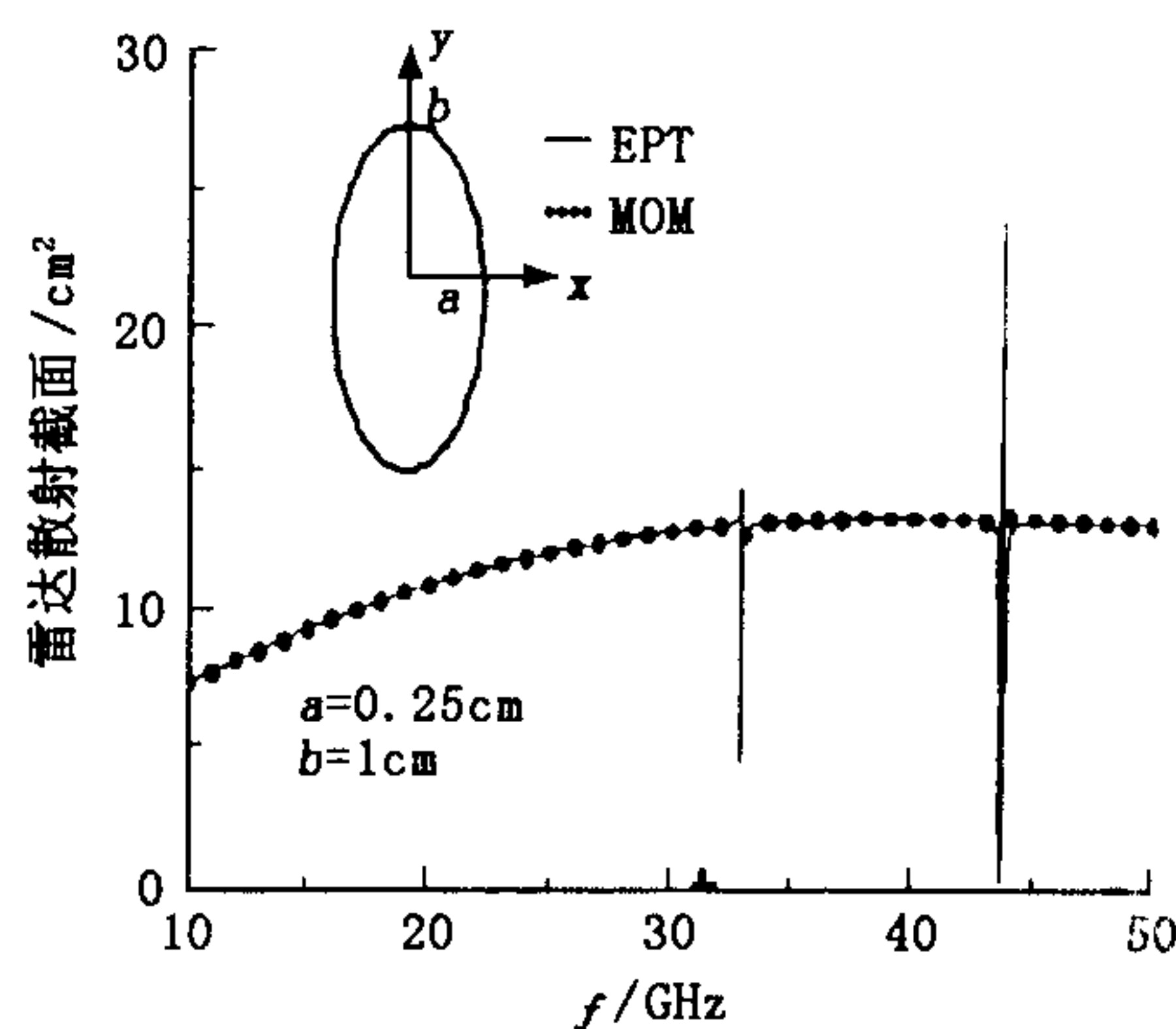


图2 椭圆柱的宽频域 RCS

### 3 结论

由于阻抗矩阵  $Z$  与取样点的相关成度及 RCS 图像的复杂性不同, AWE 应用于计算导体宽角度及宽频域 RCS 有完全不同的效果, 后者的效果要远好于前者, 前者的效果有时甚至还不如 MOM。但是如果能对求解过程进行改进, 如进行迭代求解, 能进一步提高 AWE 的效率。

#### 参考文献:

- [1] Harrington R F. 计算电磁场的矩量法[M]. 王尔杰. 北京:国防工业出版社, 1981.
- [2] Reddy C J, Deshpande M D. Fast RCS Computation Over a Frequency Band Using Method of Moments In Conjunction With Asymptotic Waveform Evaluation Technique[J]. IEEE Tran. AP, 1998, 46(8): 1229 - 1233.
- [3] Erdemli Y E, Gong J, Reddy C J, et al. Fast RCS Pattern Fill Using AWE Technique[J]. IEEE Tran. AP, 1998, 46(11): 1752 - 1753.
- [4] 童创明. 电磁响应快速获取方法的研究[D]. 南京:东南大学, 2002.
- [5] 李成, 曹毅, 童创明, 等. AWE 技术加速计算圆环天线的宽带响应[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(2): 31 - 33.

(编辑:田新华)

## Analysis of the Method of AWE Used in Calculating Conductor Wide Angle and Broad Band Mono - static RCS

SUN Yu - qian<sup>1</sup>, LI An - ping<sup>1</sup>, TONG Chuang - ming<sup>2</sup>

(1. The Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China; 2. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

**Abstract:** The method of moments combined with the asymptotic waveform evaluation technique is adopted in quick prediction of the mono - static radar cross section. The computation results indicate that the AWE technique not only can well approximate the exact numerical solution, but also improve the velocity of calculation and save the calculation time of CPU.

**Key Words:** MOM; AWE technique; RCS