

文章编号 1005-0388(2004)03-0325-05

## 二维电大导体目标宽带 雷达散射截面的快速计算\*

施长海 孙玉发

(安徽大学电子工程与信息科学系, yfsun@mars. ahu. edu. cn, 安徽 合肥 230039)

**摘要** 在矩量法的基础上, 应用空间分解技术将二维电大导体目标剖分成若干子区域, 考虑子区域间的耦合, 通过累进迭代法计算出目标表面电流, 然后结合渐近波形估计技术计算了二维电大导体目标的宽带雷达散射截面。数值计算表明: 计算结果与矩量法逐点计算结果相吻合, 计算效率大大提高。

**关键词** 雷达散射截面, 空间分解技术, 累进迭代法, 渐近波形估计

**中图分类号** TN011      **文献标识码** A

### Fast solution of wide-band scattering of two-dimensional electrically large conducting objects

SHI Chang-hai SUN Yu-fa

(Dept. of Electronic Engineering and Information Science,  
Anhui University, yfsun@mars. ahu. edu. cn, Hefei Anhui 230039, China)

**Abstract** Based on the method of moments, the two-dimensional electrically large conducting object is divided into several small regions by employing spatial decomposition technique. Considering the coupling effect between sub-regions, the surface currents are calculated with the progressive iterative numerical method, and the wide-band RCS is obtained by asymptotic waveform evaluation technique. The numerical results presented in this paper are in good agreement with that achieved by the method of moments (MoM), and the proposed scheme exceeds considerably MoM in the computational efficiency.

**Key words** radar cross section, spatial decomposition technique, progressive iterative numerical method, asymptotic waveform evaluation

### 1 引言

分析电大目标电磁散射特性的主要方法有各种高频近似法, 如几何绕射理论、物理绕射理论、一致性绕射理论和等效电磁流理论等。这些高频近似方法都有其一定的应用范围和局限条件, 而且求解不够精确。应用矩量法<sup>[1]</sup>求解电场积分方程(EFIE)或磁场积分方程(MFIE)可以精确地预估目标的雷

达散射截面(RCS), 但矩量法形成的阻抗矩阵一般是稠密矩阵。由于受到现有计算机内存和执行时间的限制, 应用传统矩量法很难分析电大尺寸目标的电磁散射特性。快速多极子方法<sup>[2][3]</sup>可以有效地加速矩阵与向量相乘的运算速度, 节省存储矩阵的空间。空间分解技术(SDT)和累进迭代法(PNM)<sup>[4][5]</sup>的基本思想是将电大目标分解成一些子区域, 考虑子区域间的耦合, 然后逐个计算每个子

\* 收稿日期: 2003-06-29.

基金项目: 安徽省教育厅重点科研项目(No. 2004kj002zd)

区域,从而得到目标的表面电流和雷达散射截面。

在隐身与反隐身技术,雷达目标识别,宽带雷达与超宽带雷达技术中,需要对雷达目标的宽带雷达散射截面进行快速精确计算,随着频率的提高,被研究的雷达目标成为电大目标,所以研究电大目标的宽带电磁散射特性有着重要的意义。本文将基于矩量法的空间分解技术和累进迭代法与渐近波形估计(AWE)<sup>[6][7]</sup>技术结合起来,应用于二维电大导体目标宽带雷达散射截面的快速计算,与传统矩量法逐点计算相比较,结果吻合良好,计算效率却大大提高。

## 2 理 论

### 2.1 二维导体目标 RCS 的矩量法解

TM 波激励,对于任意形状二维理想导体目标有电场积分方程

$$\frac{k\eta}{4} \int_C J_z(\rho') H_0^{(2)}(k|\rho - \rho'|) d\rho' = E_z^i(\rho)$$

$\rho$  在 C 上 (1)

式中 C 为导体截面的边界,  $J_z$  为导体表面上的电流密度,  $E_z^i$  为入射电场,  $H_0^{(2)}$ (·) 为第二类零阶 Hankel 函数,  $\rho$  和  $\rho'$  分别表示场点和源点的位置矢量,  $k$  和  $\eta$  分别是自由空间波数和波阻抗。

将理想导体的边界 C 划分成 N 段,选择脉冲函数作为基函数,δ 函数作为检验函数,应用矩量法可以将 EFIE 划成矩阵方程

$$Z(k)I(k) = V(k) \quad (2)$$

式中 Z 为  $N \times N$  阻抗矩阵, V 为激励向量,它们的表达式分别为

$$V_m = e^{-jk(x_m \cos\theta + y_m \sin\theta)} \quad (3)$$

$$Z_{mn}(k) = \frac{k\eta}{4} \int_{\Delta C_n} H_0^{(2)} \cdot \begin{cases} [k\sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2}] \\ \frac{k\eta\Delta C_n}{4} [1 - j\frac{2}{\pi}(\ln \frac{k\Delta C_n}{4} + \gamma - 1)] \\ m = n \\ \frac{k\eta\Delta C_n}{4} H_0^{(2)} \cdot \\ [k\sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2}] \end{cases} \quad (4)$$

$m \neq n$

式中  $\theta$  为入射平面波与 x 轴间的夹角。

给定计算频率(对应波数 k),求解方程(2)可得该频率下导体表面未知电流的分布。由公式

$$E^i = \frac{k\eta}{\sqrt{8\pi k\rho}} e^{-jk(\rho + \frac{3\pi}{4})} \int_C e^{jk\rho' \cdot \epsilon} I(\rho') d\rho' \quad (5)$$

计算出远区散射场  $E^i$ ,再根据雷达散射截面定义

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 2\pi r \frac{|E^i|^2}{|E^i|^2} \quad (6)$$

可得目标的 RCS。

### 2.2 空间分解技术和累进迭代法

如图 1 所示,将电大目标划分为 n 个子区域,阴影部分为相邻子区域耦合部分。如果直接用积分方程和矩量法求解每一个子区域,会产生较大的误差。对目标空间分解,考虑到子区域间的耦合作用,进行累进迭代可提高精确性。目标被分解后,(2)式可以写成

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

对角线上的子矩阵  $[Z_{11}]$ ,  $[Z_{22}]$  …  $[Z_{nn}]$ , 是  $M_i \times M_i$  的方阵,为子区域的自阻抗,其中  $i=1, 2, \dots, n$ , 并且  $M_i \ll N$ 。而非对角线上的子矩阵  $[Z_{ij}]$  是一个  $M_i \times M_j$  的矩阵,为子区域间的互阻抗,其中  $i, j=1, 2, \dots, n$ 。

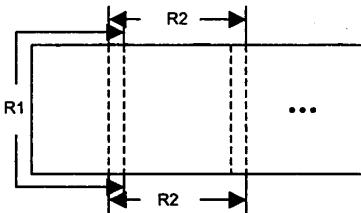


图 1 子区域  $R_1, R_2, \dots, R_n$  以及重叠区

对于子区域  $R_1$ ,有矩阵方程

$$[Z_{11}][I_1] = [V_1] \quad (8)$$

假设子区域和重叠区域所包含的脉冲数分别是 M 和 P。由于重叠区域受其它子区域影响较大,所以重叠区域电流与真实电流误差较大。对于子区域  $R_1$ ,可以将 P 个不准确解从 M 个解中删除,保留  $[I_1]$  中非重叠的部分  $[I'_1]$ ,所以对于子区域  $R_2$  有矩阵方程

$$[Z_{22}][I_2] = [V_2] - [Z_{21}][I'_1] \quad (9)$$

同理,对于子区域  $R_j$  有

$$[Z_{jj}][I_j] = [V_j] - \sum_{i=1, i \neq j}^n [Z_{ji}][I'_i] \quad (10)$$

这个过程一直继续到子区域  $R_n$ 。当第一次扫描结束后,可重复进行第二次迭代。判断迭代收敛的依据是

$$\|[V] - [Z][I]\| / \|V\| < \epsilon \quad (11)$$

其中,  $\epsilon$  为预先设定的误差。根据(10)式可以计算出目标的子区域电流并能综合出表面电流,进而计算目标的雷达散射截面。

### 2.3 演近波形估计技术

在入射角一定的情况下, AWE 技术将  $I(k)$  在给定  $k_0$  处展开成泰勒级数, 即

$$I(k) = \sum_{n=0}^{\infty} m_n (k - k_0)^n \quad (12)$$

展开系数的表达式为

$$m_0 = Z^{-1}(k_0) V(k_0) \quad (13)$$

$$m_n = Z^{-1}(k_0) \left[ \frac{V^{(n)}(k_0)}{n!} - \sum_{i=1}^n \frac{Z^{(i)}(k_0) m_{n-i}}{i!} \right] \quad (14)$$

式中  $Z^{(i)}$  表示  $Z(k)$  的  $i$  阶导数,  $V^{(n)}$  表示  $V(k)$  的  $n$  阶导数。为了扩大泰勒级数的收敛半径, 可通过 Padé 逼近将  $I(k)$  展开成有理函数, 即

$$I(k) = \frac{\sum_{i=0}^L a_i (k - k_0)^i}{\sum_{j=0}^M b_j (k - k_0)^j} \quad (15)$$

式中  $b_0 = 1$ 。系数  $a_i, b_j$  通过求解下列方程

$$\begin{bmatrix} m_L & m_{L-1} & m_{L-2} & \cdots & m_{L-M+1} \\ m_{L+1} & m_L & m_{L-1} & \cdots & m_{L-M+2} \\ m_{L+2} & m_{L+1} & m_L & \cdots & m_{L-M+3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{L+M-1} & m_{L+M-2} & m_{L+M-3} & \cdots & m_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{L+1} \\ m_{L+2} \\ m_{L+3} \\ \vdots \\ m_{L+M} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ m_1 & m_0 & 0 & \cdots & 0 \\ m_2 & m_1 & m_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_L & m_{L-1} & m_{L-2} & \cdots & m_{L-M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix} \quad (17)$$

确定。将系数  $a_i, b_j$  代入(15)式可得到整个频带内目标的表面电流分布, 进而可以求出目标宽带 RCS。

### 3 数值计算与结果

在频域中, 计算导体目标宽带 RCS 的一种方法是应用传统矩量法逐个频率点计算, 此方法耗费大

量计算机内存和计算时间。其次, 还可以把传统矩量法与渐近波形估计技术结合起来计算目标宽带 RCS, 本文记为 MOM-AWE。

由空间分解技术和累进迭代法计算出各子区域的电流, 再综合出目标表面电流, 然后应用渐近波形估计技术得到频带内任一频率点处的表面电流, 进而计算电大目标的宽带 RCS, 本文记为 MOM-SDT-PNM-AWE(1)。另外, 还可以将 AWE 分析应用到每个子区域中, 将每个子区域的宽带电流求出, 然后利用公式累加求出宽带 RCS, 该方法本文记为 MOM-SDT-PNM-AWE(2)。例如 TM 波激励, 若求得无限长理想导体柱的各子区域宽带电流, 则其宽带雷达散射截面可由下面公式得到

$$\sigma(\varphi) = \frac{k(f)^2}{4} \left( \int_{C_1} I_{C_1}(x'_1, y'_1) e^{ik(f)(x'_1 \cos \theta + y'_1 \sin \theta)} dl' |^2 + \cdots + \int_{C_n} I_{C_n}(x'_n, y'_n) e^{ik(f)(x'_n \cos \theta + y'_n \sin \theta)} dl' |^2 \right) \quad (18)$$

式中,  $f$  为频带内任一频率点。方法 MOM-SDT-PNM-AWE(2) 在 AWE 分析时没有大矩阵求逆运算, 较前一种方法效率更高, 更适合目标电尺寸很大时宽带电磁散射特性的分析。

为了验证基于矩量法的空间分解技术和累进迭代法的正确性和有效性, 计算了理想导体圆柱的表面电流和双站 RCS, 如图 2 和图 3 所示。其中圆柱截面周长为  $36\lambda$ ,  $\lambda$  为  $f_0 = 3.0 \times 10^9$  Hz 对应的波长, TM 波入射, 取脉冲基的宽度  $\Delta = \lambda/10$ , 子区域数为 4, 相对误差为  $\epsilon = 1e-6$ , 迭代次数为 11。

分别以上例理想导体圆柱和无限长理想导体矩形柱为例分析宽带 RCS 频率响应。其中理想导体圆柱 1GHz~5GHz 频率范围内的 RCS 与频率间的关系如图 4 所示, 入射波与  $x$  轴夹角  $\theta$  为  $180^\circ$ ,

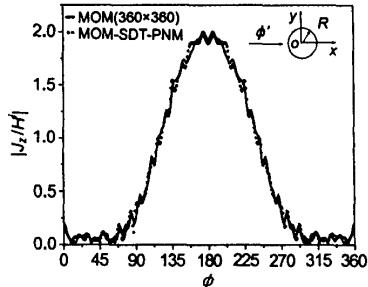


图 2 导体圆柱表面电流分布

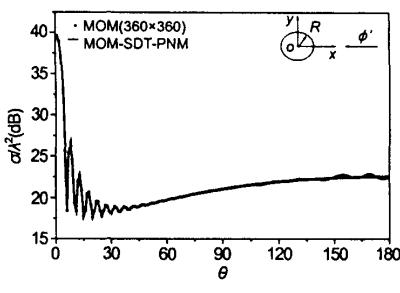


图 3 导体圆柱双站 RCS

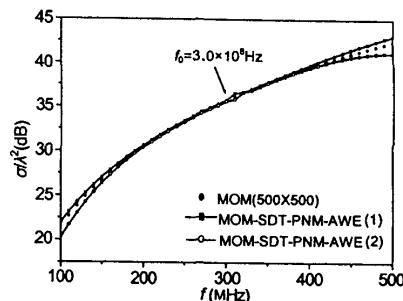


图 5 矩形导体柱的 RCS 与频率间的关系

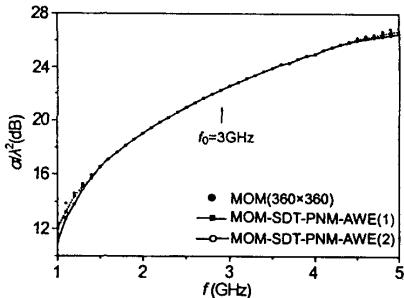


图 4 导体圆柱的 RCS 与频率间关系

AWE 分析中, Padé 逼近参数为:  $L=4, M=3$ 。矩形导体柱截面尺寸为  $24.5\lambda \times 0.5\lambda$ ,  $f_0 = 3.0 \times 10^8 \text{ Hz}$ ,  $\theta = 90^\circ$ , 子区域数为 3, 迭代次数为 15, 100MHz~500MHz 频率范围内的 RCS 与频率间的关系如图 5 所示。图 4 和图 5 计算时间比如表 1。本文所有计算都是在 PIII 650M/128MB 的 PC 机上完成。

#### 4 结论

本文应用空间分解技术剖分电大目标, 通过累进迭代法计算出中心频率点处的子区域电流和表面电流, 然后结合渐近波形估计技术计算目标的宽带 RCS。由表 1 可知, 与传统矩量法逐点计算比较, 计算效率大大提高。

数值计算表明:(1)子区域以及重叠区域的大小对收敛性存在一定的影响, 一般地, 子区域大小取  $5\lambda$  到  $20\lambda$  附近。在一定范围内, 加大重叠区域可以加速收敛, 一般当子区域为  $10\lambda$  时取重叠区域为  $0.5\lambda$ 。(2)累进方向应该是从照明区往阴影区。(3)子区域的多少对计算时间有一定的影响, 子区域数一般要大于 2, 若太大则会增加计算时间, 甚至会不收敛。(4)Padé 逼近参数  $L, M$  对计算精度有一定的影响, 在一定范围内增加  $L, M$  可以提高计算精度。

表 1 CPU 时间比较

	图 4		图 5	
	CPU 时间(秒)	频率点	CPU 时间(秒)	频率点
MOM	1815.3	41	3473	41
MOM-AWE	1681.8	401	2572.8	401
MOM-SDT-PNM-AWE(1)	1532.4	401	1832	401
MOM-SDT-PNM-AWE(2)	851.2	401	985.9	401

#### 参考文献

- [1] R F Harrington. Field computation by moment method [M]. New York: Macmillan, 1968.
- [2] N Engheta, W D Murphy, V Rokhlin. The fast multipole method for electromagnetic scattering problems [J]. IEEE Trans., 1992, AP-40(6): 634~641.
- [3] J Song, C C Lu, W C Chew. Multilevel fast multipole

algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects[J]. IEEE Trans., 1997, AP-45(10): 1488~1493.

- [4] K R Umashanker, S Nimmagadda, A Taflove. Numerical analysis of electromagnetic scattering by electrically large objects using spatial decomposition technique[J]. IEEE Trans., 1992, AP-40(8): 867~877.

(下转第 347 页)

- 173.
- YAN Xiao-rong, JIN Yuan-song, LUO Cui-mei. Analysis of wide-band properties and efficiency for dipole antennas with resistive and capacitive loadings [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2000, 15(2): 169~173.
- [8] 薛翼. 最优化原理与方法[M]. 北京:北京工业大学出版社,2001.
- [9] 徐璐,涂承宇. 一种新的改进遗传算法及其性能分析[J]. 电子学报,2001,29(7):902~904.
- [10] 金菊良,杨晓华,丁晶. 基于实数编码的加速遗传算法[J]. 四川大学学报(工程科学版),2000,32(4):20~24.
- [11] Barrick D E, Lipa B J. Gated FMICW DF radar signal processing for range/Doppler/Angle determination. United States Patent[P], 5361072, 1994.
- [12] 高火涛. 高频表面波超视距雷达天线问题的研究[D]. 武汉:武汉大学电信学院,2002.



**魏忠伟** (1976—),男,辽宁人,武汉大学电子信息学院博士研究生。主要研究方向:天线理论与设计。

**高火涛** (1964—),男,湖北人,武汉大学电子信息学院副教授,博士,发表论文多篇。主要研究方向:天线理论工程与工程设计,复杂目标的电磁散射和陈列信号分析等。



**柯亨玉** (1957—),男,湖北人,武汉大学电子信息学院教授,博士生导师,发表论文数十篇,获省部级以上奖多项。研究方向:天线理论与设计,电磁场理论与工程应用和高频无线电海洋遥感技术等。

(上接第328页)

- [5] Q Ye, L Shafai. Performance of the progressive numerical method and Its comparison with the modified spatial decomposition technique in solving large scattering problems [J]. IEE Proc-Microw. Antennas Propag., 1998, 145(2):169~173.
- [6] 孙玉发,徐善驾. 漸近波形估计技术在三维电磁散射问题快速分析中的应用[J]. 电子学报,2002,30(6):794~796.
- [7] 童创明,洪伟. 漸近波形估计技术用于介质柱宽角度 RCS 的计算[J]. 电波科学学报,2001,16(1):72~75. TONG Chuang-ming, HONG Wei. Fast calculation of wide angle mono-static RCS of dielectric cylinders based on asymptotic wave evaluation technique [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(1):72~75



**施长海** (1977—),男,安徽人,1999、2003年获安徽大学电磁场与微波技术专业学士、硕士学位。目前在上海交通大学电子工程系攻读博士学位。主要研究方向为电磁散射、电磁场数值计算方法和光纤通信。



**孙玉发** (1966—),男,安徽人,安徽大学电子工程与信息科学系教授,中国电子学会高级会员。1988、1991年获山东大学无线电物理专业学士、硕士学位,2001年获中国科学技术大学电磁场与微波技术专业博士学位,2002年赴香港城市大学进修,目前为中国科学技术大学信息与通信工程流动站博士后。主要研究领域为微带天线、电磁散射和电磁场数值计算方法等。

## 雷达散射截面（RCS）分析培训课程

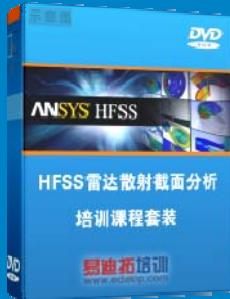
易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

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/>