

参考文献:

- 姜光兴, 曹伟, 朱洪波.《基于不同积分方程的线天线矩量法分析》[J].南京邮电学院学报, 2005, 25(1):46-49.
 曹伟.《电磁场数据计算方法》(硕士生) [M].南京: 南京邮电学院无线通信与电磁兼容实验室, 2004.
 WARREN L STUTZMAN, GARY A. THIELE 《ANTENNA THEORY AND DESIGN》[M]. Published Simultaneously in Canada. 1981.
 曹伟, 徐立勤.《地磁场与微波技术》[M].北京: 北京邮电大学出版社, 1999.
 MEI K K. On the integral equation of thin wire

antennas [J]. IEEE Trans on AP; 1966, 13:374-378.
 GARY A. THIELE, Analysis of Yagi-Uda Type Antennas [J]. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION VOL. AP-17 NO. 1 JANUARY 1969.
 陈方亮 (1980-), 男, 山东人, 硕士。
 Email: fangliang.chen@gmail.com
 张旭翔 (1958-), 男, 江苏无锡人, 博士。
 Email: Zxx58@sohu.com
 曹伟 (1939-), 男, 湖南长沙人, 博士。
 Email

基于特征基函数的二维多导体目标宽带 RCS 的快速计算

杜燕 孙玉发 朱挺挺

(安徽大学电子科学与技术学院, 安徽 合肥 230039)

摘要 特征基函数法是近年来提出的一种求解电磁散射问题的有效方法, 特征基函数法的使用不受传统矩量法离散尺寸的限制, 因而可以大大减小要求解的矩阵方程。本文用特征基函数法计算出目标的表面电流, 然后再结合渐近波形估计技术计算出二维多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 多体散射, 矩量法, 特征基函数法, 渐近波形估计, 雷达散射截面
 中图分类号

Fast solution of wide-band scattering of two-dimensional electrically large conducting objects based on characteristic basis function method

DU Yan SUN Yu-fa ZHU Ting-ting

(School of Electronic science and technology, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract The characteristic basis function (CBF) method is a novel approach for efficient solution of electromagnetic scattering problems .Since the characteristic basis functions are not restricted by the conventional domain discrimination, the matrix size can be reduced dramatically .In this paper, the surface currents are calculated with the CBF method , and wide-band RCS is obtained by asymptotic waveform evaluation (AWE) 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 scattering from multi-objects, method of moments, characteristic basis function method, asymptotic waveform evaluation ,radar cross section.

1 引言

研究复杂多目标电磁散射特性一直是电磁场领域最活跃最富有挑战性的课题之一。导体目标的电磁散射特性通常采用积分方程进行分析, 当散射体很多或者为电大尺寸时, 用传统矩量法^[1]求解积分方程, 要求解的未知变量数会变得很

大。为了克服这个困难, 人们提出了一些快速有效的方法, 如: 共轭梯度快速傅立叶变换(CG-FFT) 法^[2]、快速多极子法^[3-4] (FMM)、稀疏矩阵规则网格 (SMCG) 法^[5]和自适应积分法^[6] (AIM), 来降低计算机内存和计算量的需求, 提高矩量法的效率。近年来, 人们又相继开

展了一些基于部分域(子域或块)概念来降低矩阵维数的研究,如多层矩量法^[7](MMM)、子域多层法^[8](SMA)和合成基函数法^[9](SBF)等。特征基函数法^[10]是基于散射体分块的概念,构造高层级基函数,并通过全局矩阵来计及块间互耦,可避免迭代方法考虑块间互作用时的缺陷,提供了求解多导体以及大尺度问题的新思路。目前特征基函数法被逐步应用到天线阵特性的分析^[11]、随机分布目标的散射分析^[12]和电磁场边值问题的求解^[13]等。

在隐身与反隐身技术,雷达目标识别,宽带雷达及超宽带雷达技术以及宽带天线技术中,需要对目标的宽带散射截面进行快速精确的计算,所以,研究多导体目标的宽带散射特性有着重大的意义。

本文将特征基函数法与渐近波形估计技术^{[14][15]}结合起来,应用于多导体目标的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 特征基函数

自由空间中一 TM 波入射到 N 个二维理想导体柱上,相应的积分方程为

$$\sum_{m=1}^N \frac{k\eta}{4} \int_{C_m} H_0^{(2)}(k|\rho - \rho'|) J_z^m(\rho') dl' = E^{inc}(\rho), \rho \in C_m$$

(1)

式中 $J_z^m(\rho')$ 是第 m 个子导体上待求的表面感应电流, $E^{inc}(\rho)$ 是入射场。

将每个导体的边界划分 M 段,选择脉冲函数为基函数,δ 函数为检验函数,应用 MOM 可将方程(1)化成矩阵方程

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \cdots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \cdots & Z_{2N} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & \cdots & Z_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & Z_{N3} & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ \vdots \\ J_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1^{inc} \\ E_2^{inc} \\ E_3^{inc} \\ \vdots \\ E_N^{inc} \end{bmatrix}$$

(2)

式中 Z_{ij} ($i=1,2,3,\dots,N$; $j=1,2,3,\dots,N$) 为 $M \times M$ 的子矩阵,可以通过传统矩量法求出。

应用特征基函数法可以减小矩阵方程(2),特征基函数可根据 Foldy-Lax 多径散射方程^[14]构造,即第 i 个散射体最终的激励场等于入射场加上除此散射体之外的所有散射体的散射场。每个散射体的主要特征基函数为入射场投射到每个孤立散射体上的表面感应电流,它的建立忽略所有其他散射体的散射。而第一个次要特征基函

数是通过将所有其他散射体的主要特征基函数产生的散射场代替入射场计算出来的,类似地,可计算出其他的次要特征基函数。这些特征基函数可写成

$$Z_{ii} J_i^P = E_i^{inc} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (3)$$

$$Z_{ii} J_i^{S1} = - \sum_{j=(j \neq i)}^N Z_{ij} J_j^P \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (4)$$

$$Z_{ii} J_i^{S2} = - \sum_{j=(j \neq i)}^N Z_{ij} J_j^{S1} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (5)$$

$$J_i^I = a_i J_i^P + b_i J_i^{S1} + c_i J_i^{S2} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (6)$$

式中 J_i^P 可以直接通过矩阵求逆算出,把 J_i^P 代入(4)式,同理可算出 J_i^{S1} ,类似可算出 J_i^{S2} 。当 J_i 用(6)式中的 J_i^I 表示时,每个子散射体的未知变量个数就等于 CBF 的个数,方程(2)中的系数矩阵将大大减小。而新的矩阵元素形式为 $(J_i^{P,S})^T \bullet (Z_{ij} J_j^{P,S})$,上标 T 表示矩阵的转置。

2.2 渐近波形估计技术

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

$$I(k) = \sum_{n=0}^{\infty} m_n (k - k_0)^n \quad (7)$$

展开系数的表达式为

$$m_0 = Z^{-1}(k_0) V(k_0) \quad (8)$$

$$m_n = Z^{-1}(k_0) \left[\frac{V^{(n)}(k_0)}{n!} - \sum_{i=1}^n \frac{Z^{(i)}(k_0) m_{n-i}}{i!} \right] \quad (9)$$

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

$$I(k) = \frac{\sum_{i=0}^L a_i (k - k_0)^i}{\sum_{j=0}^M b_j (k - k_0)^j} \quad (10)$$

式中 $b_0 = 1$,系数 a_i, b_j 通过求解下列方程

$$\begin{bmatrix} m_L & m_{L-1} & m_{L-2} & \cdots & m_{L-M+1} \\ m_{L+1} & m_L & m_{L-1} & \cdots & m_{L-M+2} \\ m_{L+2} & m_{L+1} & m_L & \cdots & m_{L-M+3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{L+M-1} & m_{L+M-2} & m_{L+M-3} & \cdots & m_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{L+1} \\ m_{L+2} \\ m_{L+3} \\ \vdots \\ m_{L+M} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ m_1 & m_0 & 0 & \cdots & 0 \\ m_2 & m_1 & m_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_L & m_{L-1} & m_{L-2} & \cdots & m_{L-M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix} \quad (12)$$

确定。将系数代入式可得到整个频带内的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

利用 CBF 和 AWE 结合的方法，本文给出了两个计算实例，并与传统矩量法进行了比较，从中可以看到 CBF 和 AWE 结合计算多导体宽带电磁散射特性在计算时间上的优势和较高的计算精度。

如图 1 所示为两个导体圆柱，导体半径为 $a=1\text{cm}$ ，间距为 2cm ，入射波为 $E_i = e^{-jka}$ ，每个圆柱的周边被均匀划分成 36 段。图 2 给出了其在 1GHz ~ 9GHz 频率范围内的 RCS 与频率之间的关系。从图中可看出，MOM 和 CBFM-AWE 计算结果吻合良好。图中，MOM 计算了 81 个频率点，耗时 81.7s，CBFM-AWE 计算了 801 个点，耗时 36.6s。其中展开频率为 5GHz ，Padé 逼近参数为： $L=4, M=3$ 。

如图 3 所示为 16 个导体方柱，导体边长和间距均为 $a=0.8\text{cm}$ ，入射波为 $E_i = e^{-jka}$ ，每个方柱周边被均匀划分成 16 段。图 4 给出了其在 2GHz ~ 12GHz 频率范围内的 RCS 与频率之间的关系。从图中可看出，MOM 和 CBFM-AWE 计算结果吻合良好。图中，MOM 计算了 101 个频率点，耗时 1251.1s，CBFM-AWE 计算了 1001 个点，耗时 577.5s。其中展开频率为 7GHz ，Padé 逼近参数为： $L=4, M=3$ 。

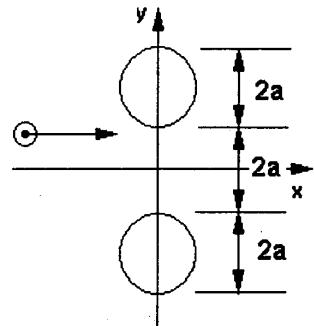


图 1 TM 波照射两个导体圆柱

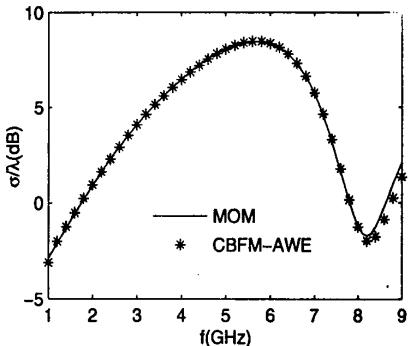


图 2 两个导体圆柱的 RCS 频率响应

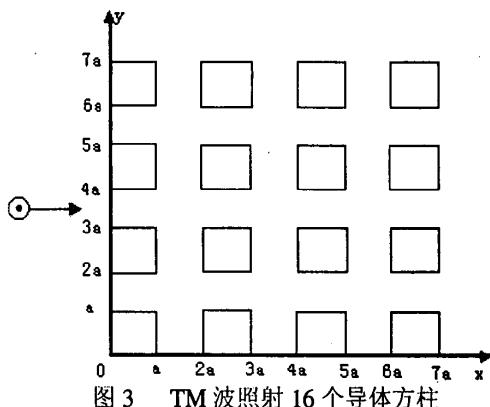


图 3 TM 波照射 16 个导体方柱

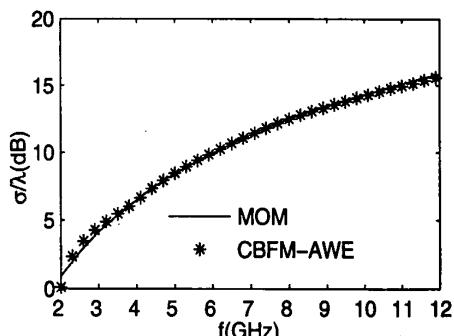


图 4 16 个导体方柱的 RCS 频率响应

4 结论

本文通过特征基函数法计算出中心频率点的表面电流,然后结合渐近波形估计技术计算目标的宽带 RCS。由数值计算结果可知,与传统矩量法逐点计算比较,计算效率得到了大大提高,且具有较高的精度。

参考文献

- [1] R.F.Harrington. 计算电磁场的矩量法.王尔杰等译.北京:国防工业出版社,1981,49~59.
- [2] Y.Zhang, K.Wu, et al. A combined full-wave CG-FFT method for rigorous analysis of large microstrip antenna array[J]. IEEE Trans. Antennas Propagation 1996, 44: 102-109.
- [3] J.Song, C.Lu, and W.C.Chew. Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large diakoptics-based multilevel moments method for planar circuits[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Technology 1998, 46: 280-291.
- [4] E. Suter, and J. Mosing. A subdomain multilevel approach for the MoM analysis of large planar antennas[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2000, 26: 270-277.
- [5] L.Matekovits, G.Vecchi, et al. Synthetic function analysis of large printed structures:the solution space sampling approach[C]. IEEE Antennas Propagation Soc. Inc. Symp., 2001, 568-571.
- [6] V.V.S.Prakash, R.Mitra, Characteristic Basis Function Method: A new technique for efficient solution of method of moments matrix equations[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 36(2): 95-100.
- [7] Junho Yeo, V.V.S.Prakash, R.Mitra. Efficient analysis of a class of microstrip antennas using the characteristic basis function method[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 36(2): 95-100.
- [8] C.H.Chan and L.Tsang. A sparse-matrix canonical-grid method for scattering by many scatterers[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1995, 114-118.
- [9] E.Bleszynski, M. Bleszynski, and T.Jaroszewics. AIM: adaptive integral method for solving large-scale electromagnetic scattering and radiation problems[J]. Radio Science, 1996, 31:1225-1251.
- [10] S.Ooms, D.D.Zutter. A New iterative and Optical Technology Letters, 2003, 39(6): 456-464.
- [11] Y.F.Sun, C.H.Chan, R.Mitra, and L.Tsang. Characteristic basis function method for solving large problem arising in dense medium scattering[C]. IEEE Antennas Propagation Soc. Inc. Symp., 2003, 1068-1071.
- [12] M.Kuzuoglu. Fast solution of electromagnetic boundary value problems by the Characteristic Basis Functions/ FEM approach[C]. IEEE Antennas Propagation Soc. Inc. Symp., 2003, 1072- 1075.
- [13] 孙玉发,徐善筠.渐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.
- [14] 童创明,洪伟.AWE 应用于介质柱宽带 RCS 频率响应的

基于微遗传算法的超宽带天线阵列优化

覃延明 廖成 卫涛 刘昆
(西南交通大学电磁所, superfoxqym@163.com, 四川 成都, 610031)

摘要: 采用阵列天线是提高超宽带天线增益和方向性,降低副瓣电平的有效途径。本文应用时域有限差分法对超宽带 TEM 喇叭天线进行了时域模拟和分析,利用叠加原理,得到了九元 TEM 喇叭线阵的时域辐射场信息;结合微遗传算法,对线阵天线的能量方向图进行了优化,获得了较窄的天线波束宽度,同时限制了天线阵列的最大旁瓣电平。

关键词: 微遗传算法, 时域有限差分法, 超宽带天线, TEM 喇叭天线, 天线阵列

Optimization of Ultra-Wide Band Antenna Array Using Micro Genetic Algorithm
QIN Yan-Ming LIAO Cheng WEI Tao LIU Kuan
(Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University,

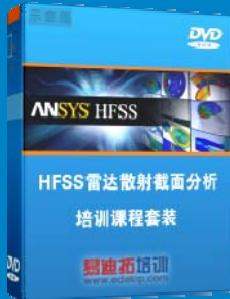
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

易迪拓培训(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/>