

应用改进的特征基函数法和自适应交叉近似算法 快速分析导体目标电磁散射特性*

王仲根^{1)2)†} 孙玉发¹⁾ 王国华¹⁾

1) (安徽大学, 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039)

2) (安徽理工大学电气与信息工程学院, 淮南 232001)

(2013年6月24日收到; 2013年7月23日收到修改稿)

特征基函数的构造是特征基函数法的关键步骤之一, 传统方法在构造特征基函数时, 需要在每个子域设置足够的入射波激励, 生成的特征基函数个数较多, 奇异值分解时间较长. 为了加快特征基函数的构造, 本文提出了一种改进的特征基函数法. 该方法充分考虑每个子域之间的耦合作用, 求出每个子域的次要特征基函数, 从而降低入射波激励的个数, 大大减少了特征基函数的个数; 并且结合自适应交叉近似算法加速阻抗矩阵元素的计算, 提高了次要特征基函数求解和缩减矩阵构建过程中的矩阵矢量相乘的速度. 数值结果证明了本文方法的精确性和高效性.

关键词: 电磁散射, 矩量法, 特征基函数法, 自适应交叉近似

PACS: 41.20.Jb, 41.20.-q

DOI: 10.7498/aps.62.204102

1 引言

矩量法^[1-4]一直是电磁场领域最活跃的课题之一, 近年来先后有多种快速算法被提出, 如多层快速多极子算法(MLFMA)^[5-9]、预条件快速傅里叶变换^[10]法、自适应积分法(AIM)^[11,12]、快速偶极子法^[13]等. 但上述方法需要采用迭代法求解线性方程组, 不仅耗时, 而且对某些复杂结构目标进行分析时所得到的阻抗矩阵条件数差, 存在收敛缓慢甚至不能收敛的问题. 特征基函数法另辟途径, 通过分块技术, 降低阻抗矩阵维数, 对目标进行分块操作并构造特征基函数(CBFs), 使用高阶基函数反映块之间的耦合作用, 然后采用降阶方法构造一个缩减的系数矩阵, 进而可采用LU分解法直接求解, 在分析电大尺寸目标的电磁散射特性中取得了较好的效果, 这其中以Mitra等^[14]提出的I型特征基函数法(CBFM-I)为代表. 随后, 一些学者对基函

数的构造进行了改进, 提出了基于Foldy-Lax多径散射方程的特征基函数法(又称之为II型特征基函数法(CBFM-II)^[15]), 以及自适应修正特征基函数法(AMCBFM)^[16]. 传统的特征基函数法其特征基函数的构造依赖于入射角度、极化方式等入射平面波信息, 对于雷达单站电磁散射特性分析以及多激励问题, 需要对每个激励重复计算, 非常耗时. 2008年, Lucente等^[17]在CBFM-I的基础上, 对特征基函数的构造进行了改进, 提出了一种基于奇异值分解(SVD)的特征基函数法(SVD-CBFM), 该方法在分析目标单站电磁散射特性方面取得了较好的效果. 随后又有学者提出了基于物理光学(PO)的特征基函数法^[18,19]、基于PO的球谐函数展开-多层快速多级子技术(SE-MLFMM)的特征基函数法^[20]、多层奇异值分解(MLSVD)的特征基函数法^[21]、基于自适应交叉近似(ACA)算法的特征基函数法^[22]以及基于AIM的特征基函数法^[23], 这些方法在构造子域的一组完备CBFs时, 需要设置足够

* 国家自然科学基金(批准号: 61172020)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20123401110006)、安徽大学研究生学术创新基金(批准号: 10117700470)和安徽大学211工程基金(批准号: ZYGG201202)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zgwang@ahu.edu.cn

多的入射波激励,生成的特征基函数个数较多,奇异值分解时间较长.本文基于SVD-CBFM,对传统的特征基函数构造加以改进,减少入射波个数,对于每个入射平面波激励,求出每个子域的主要特征基函数(PCBF)后,充分考虑每个子域之间的耦合作用,求出每个子域的次要特征基函数(SCBF),最后将该子域的特征基函数经过奇异值分解,得到与入射角度、极化方式无关的一组完备CBFs.通过对各个子域CBFs不同的线性组合,可求出任意角度入射下目标的表面电流分布,进而分析目标的电磁散射特性.由于该方法考虑到每个子域的耦合作用,所以可以大大减少入射波的个数,从而减少特征基函数的个数,减少SVD时间.另外,利用ACA算法加速远阻阻抗矩阵元素填充、加快求解SCBF以及缩减矩阵构建中的矩阵矢量乘积的速度.

2 基本原理

2.1 奇异值分解特征基函数法

应用矩量法分析电磁散射问题时,需要将连续的电场积分方程^[24]离散为如下矩阵方程:

$$\mathbf{Z} \cdot \mathbf{J} = \mathbf{E}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{Z} 为 $N \times N$ 维的阻抗矩阵, N 为未知量的个数; \mathbf{J} 为待求的 $N \times 1$ 维的电流向量; \mathbf{E} 为激励向量.特征基函数法首先将散射目标划分为 M 个子域,再对每个子域进行剖分,将方程(1)变为如下形式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{12} & \mathbf{Z}_{13} & \cdots & \mathbf{Z}_{1M} \\ \mathbf{Z}_{21} & \mathbf{Z}_{22} & \mathbf{Z}_{23} & \cdots & \mathbf{Z}_{2M} \\ \mathbf{Z}_{31} & \mathbf{Z}_{32} & \mathbf{Z}_{33} & \cdots & \mathbf{Z}_{3M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{M1} & \mathbf{Z}_{M2} & \mathbf{Z}_{M3} & \cdots & \mathbf{Z}_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 \\ \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{J}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \\ \mathbf{E}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{E}_M \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{Z}_{ij}(i=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,M)$ 表示 $N_i \times N_j$ 的子矩阵 \mathbf{J}_i 表示待求感应电流, \mathbf{E}_i 表示激励向量.

与CBFM-I, CBFM-II, AMCBFM构造CBFs方法不同, SVD-CBFM^[17]构造的CBFs与激励无关,对于多入射问题,只需求解出一组完备的CBFs即可表达目标表面电流.为得到一组完备的CBFs, SVD-CBFM需要在目标上方按照 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\phi$ 均匀

地设置足够多的入射平面波激励,对于电大复杂目标,角度间隔需满足 $3^\circ \leq (\Delta\theta, \Delta\phi) \leq 10^\circ$ ^[25,26],假设 N_θ, N_ϕ 分别为 θ 和 ϕ 方向上入射平面波激励的个数,加上两种极化方式,共有 $N_{\text{pws}} = 2N_\theta N_\phi$ 个入射平面波激励,记为 $\mathbf{V}_{ii}^{N_{\text{pws}}}$.则子域 i 在平面波激励下的电流可以通过下式求解:

$$\mathbf{Z}_{ii}^e \cdot \mathbf{J}_{ii}^e = \mathbf{V}_{ii}^{N_{\text{pws}}}, \quad (3)$$

式中, \mathbf{Z}_{ii}^e 为第 i 个子域扩展后的 $N_i^{be} \times N_i^{be}$ 维自阻阻抗矩阵, $\mathbf{V}_{ii}^{N_{\text{pws}}}$ 为 $N_i^{be} \times N_{\text{pws}}$ 维矩阵, \mathbf{J}_{ii}^e 为第 i 个子域在平面波激励 $\mathbf{V}_{ii}^{N_{\text{pws}}}$ 下的电流系数矩阵,维数为 $N_i^{be} \times N_{\text{pws}}$,去掉扩展部分即得到该子域 i 的电流响应.

一般而言,平面波激励数远大于子域的自由度^[25,26],通过求解(3)式得到的 \mathbf{J}_{ii}^e 含有大量的冗余信息,不能直接作为CBFs,为得到一组最小完备CBFs,需要对 \mathbf{J}_{ii}^e 进行SVD,即

$$\mathbf{J}_{ii}^e = \mathbf{U}\mathbf{W}\mathbf{V}^T, \quad (4)$$

式中, \mathbf{U} 为 $N_i^{be} \times N_{\text{pws}}$ 的正交矩阵, \mathbf{W} 为 $N_{\text{pws}} \times N_{\text{pws}}$ 的对角矩阵,对角元素为 \mathbf{J}_{ii}^e 的奇异值, \mathbf{V} 为 $N_{\text{pws}} \times N_{\text{pws}}$ 的正交矩阵.对 \mathbf{U} 选择合适的门限,保留大于门限前 K_i 个列向量作为子域 i 的一组最小完备CBFs,记为 $\mathbf{J}_{ii}^{\text{CBFs}}$.用 \mathbf{J}_i^k 表示矩阵 $\mathbf{J}_{ii}^{\text{CBFs}}$ 的第 k 个列向量,即子域 i 上的第 k 个CBFs.对每个子域进行上述操作后,假设每个子域保留 $K_i(i=1, 2, \dots, M)$ 个CBFs,则各个子域上的电流可以用该子域的CBFs线性组合表示:

$$\mathbf{J}_i = \sum_{k=1}^{K_i} a_i^k \mathbf{J}_i^k \quad (i=1, 2, \dots, M), \quad (5)$$

式中, a_i^k 为相应的展开系数.则目标的表面电流为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{J}_i \\ \vdots \\ \mathbf{J}_M \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{K_1} a_1^k \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1^k \\ [0] \\ \vdots \\ [0] \end{bmatrix} + \cdots + \sum_{k=1}^{K_i} a_i^k \begin{bmatrix} [0] \\ \vdots \\ \mathbf{J}_i^k \\ \vdots \\ [0] \end{bmatrix} + \cdots + \sum_{k=1}^{K_M} a_M^k \begin{bmatrix} [0] \\ \vdots \\ [0] \\ \vdots \\ \mathbf{J}_M^k \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, $a_i^k (i = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, K_i)$ 为待求 CBFs 的展开系数. 将 (5) 式代入到 (2) 式, 对方程两边同乘 $\mathbf{J}_i^{\text{CBFs}}$ 所有列向量的转置, 得到一个关于 a_i^k 降阶的线性方程组, 即

$$\mathbf{Z}^R \cdot \mathbf{a} = \mathbf{V}^R, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{J}_1^1)^T \mathbf{Z}_{11} \mathbf{J}_1^1 & (\mathbf{J}_1^1)^T \mathbf{Z}_{11} \mathbf{J}_1^2 & \cdots & (\mathbf{J}_1^1)^T \mathbf{Z}_{11} \mathbf{J}_1^{K_1} & \cdots & (\mathbf{J}_1^1)^T \mathbf{Z}_{1M} \mathbf{J}_M^1 & (\mathbf{J}_1^1)^T \mathbf{Z}_{1M} \mathbf{J}_M^2 & \cdots & (\mathbf{J}_1^1)^T \mathbf{Z}_{1M} \mathbf{J}_M^{K_M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ (\mathbf{J}_1^{K_1})^T \mathbf{Z}_{11} \mathbf{J}_1^1 & (\mathbf{J}_1^{K_1})^T \mathbf{Z}_{11} \mathbf{J}_1^2 & \cdots & (\mathbf{J}_1^{K_1})^T \mathbf{Z}_{11} \mathbf{J}_1^{K_1} & \cdots & (\mathbf{J}_1^{K_1})^T \mathbf{Z}_{1M} \mathbf{J}_M^1 & (\mathbf{J}_1^{K_1})^T \mathbf{Z}_{1M} \mathbf{J}_M^2 & \cdots & (\mathbf{J}_1^{K_1})^T \mathbf{Z}_{1M} \mathbf{J}_M^{K_M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ (\mathbf{J}_M^1)^T \mathbf{Z}_{M1} \mathbf{J}_1^1 & (\mathbf{J}_M^1)^T \mathbf{Z}_{M1} \mathbf{J}_1^2 & \cdots & (\mathbf{J}_M^1)^T \mathbf{Z}_{M1} \mathbf{J}_1^{K_1} & \cdots & (\mathbf{J}_M^1)^T \mathbf{Z}_{MM} \mathbf{J}_M^1 & (\mathbf{J}_M^1)^T \mathbf{Z}_{MM} \mathbf{J}_M^2 & \cdots & (\mathbf{J}_M^1)^T \mathbf{Z}_{MM} \mathbf{J}_M^{K_M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ (\mathbf{J}_M^{K_M})^T \mathbf{Z}_{M1} \mathbf{J}_1^1 & (\mathbf{J}_M^{K_M})^T \mathbf{Z}_{M1} \mathbf{J}_1^2 & \cdots & (\mathbf{J}_M^{K_M})^T \mathbf{Z}_{M1} \mathbf{J}_1^{K_1} & \cdots & (\mathbf{J}_M^{K_M})^T \mathbf{Z}_{MM} \mathbf{J}_M^1 & (\mathbf{J}_M^{K_M})^T \mathbf{Z}_{MM} \mathbf{J}_M^2 & \cdots & (\mathbf{J}_M^{K_M})^T \mathbf{Z}_{MM} \mathbf{J}_M^{K_M} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

降阶后的缩减矩阵维数较小, 可以通过 LU 分解直接求解出系数矩阵 \mathbf{a} , 再将 \mathbf{a} 代入到 (6) 式就可得到目标表面电流 \mathbf{J} . 显然, 对于多激励问题, 对 \mathbf{Z}^R 进行一次 LU 分解后, 可以重复利用, 求解出所有激励的电流响应, 非常适用于目标的单站电磁散射特性分析.

2.2 改进的特征基函数法

本文基于 SVD-CBFM^[17], 对特征基函数的构造进行改进, 减少入射平面波激励的个数, 对于每个平面激励, 求出每个子域的 PCBF 后, 充分考虑子域间的互耦作用, 求出各个子域的 SCBF. 由于考虑到了每个子域的互耦作用, 可以大大减少入射平面波激励的个数, 从而减少特征基函数的个数, 减少 SVD 时间.

对于每一个入射平面波激励, 为每个子域构造特征基函数, 包括 PCBF 和 SCBF. 扩展子域 i 的 PCBF 可表示为

$$\mathbf{Z}_{ii}^e \mathbf{J}_i^p = \mathbf{E}_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, M), \quad (9)$$

式中 \mathbf{E}_i 是一个 $N_i^{be} \times 1$ 维的激励向量, \mathbf{Z}_{ii}^e 是 $N_i^{be} \times N_i^{be}$ 维的方阵, 表示扩展子域 i 的自阻抗. 采用 LU 分解法直接求解 (9) 式, 得到扩展子域 i 的 \mathbf{J}_i^p , 去掉扩展部分即得到子域 i 的 PCBF.

将所有其他子域的 PCBF 产生的散射场作为子域 i 的入射场, 可得到第一阶 SCBF 的表达式, 如 (10) 式所示. 依此类推, 更高阶的 SCBF 表达式如

式中 \mathbf{Z}^R 为降阶后的缩减矩阵, 维数为 $\sum_{i=1}^M K_i \times \sum_{i=1}^M K_i$, \mathbf{a} 为未知 CBFs 的展开系数矩阵, \mathbf{V}^R 为降阶后的激励矩阵, 其中缩减矩阵 \mathbf{Z}^R 表示为

(11) 式所示 (本文取至 2 阶):

$$\mathbf{Z}_{ii}^e \mathbf{J}_i^{S1} = - \sum_{j=1(j \neq i)}^M \mathbf{Z}_{ij} \mathbf{J}_j^p \quad (i = 1, 2, \dots, M), \quad (10)$$

$$\mathbf{Z}_{ii}^e \mathbf{J}_i^{S2} = - \sum_{j=1(j \neq i)}^M \mathbf{Z}_{ij} \mathbf{J}_j^{S1} \quad (i = 1, 2, \dots, M), \quad (11)$$

求解 (10) 和 (11) 式并去除扩展部分, 即可得各阶 SCBF.

本文方法假设在每个子域 θ 和 ϕ 方向上入射平面波数分别为 $N_\theta^{\text{new}}, N_\phi^{\text{new}} (N_\theta^{\text{new}} N_\phi^{\text{new}} \ll N_\theta N_\phi)$, SCBF 取至 2 阶, 再考虑两种极化方式, 通过求解 (9)—(11) 式得到的特征基函数个数为 $N_{\text{pws}}^{\text{new}} (N_{\text{pws}}^{\text{new}} = 6N_\theta^{\text{new}} N_\phi^{\text{new}})$. 新方法构造的特征基函数包含大量的冗余信息, 经 SVD 后得到一组最小完备 CBFs, 再采用相同的方法构造缩减矩阵, 求解出 CBFs 的展开系数.

2.3 ACA 加速计算

改进的特征基函数法在构造特征基函数过程中, 填充远组阻抗矩阵元素、求解次要特征基函数以及构造缩减矩阵中的矩阵矢量相乘运算, 都是非常耗费时间的步骤. 为了提高运算效率, 引入 ACA^[27] 算法加快计算过程.

使用 ACA 方法, 将 (2) 式中两个远场区域相互作用的子阻抗矩阵 \mathbf{Z}_{ij} 分解为两个满秩矩阵的乘积形式:

$$\mathbf{Z}_{ij}^{N_i \times N_j} \approx \tilde{\mathbf{Z}}_{ij}^{N_i \times N_j} = \mathbf{Z}_U \mathbf{Z}_V, \quad (12)$$

其中 Z_U 为 $N_i \times r$ 维矩阵, Z_V 为 $r \times N_j$ 维矩阵, r 为矩阵 Z_{ij} 的有效秩, 自适应交叉近似过程中的误差由误差迭代门限 τ 控制, 该门限决定何时停止计算新的 Z_U 和 Z_V 的行和列, 即

$$\|Z_{ij}^{N_i \times N_j} - \tilde{Z}_{ij}^{N_i \times N_j}\| \leq \tau \|Z_{ij}^{N_i \times N_j}\|, \quad (13)$$

其中 $\|\bullet\|$ 是矩阵的 Frobenius 范数, $r \ll \min(N_i, N_j)$. 由此可以看出, ACA 算法只需抽取计算 $r(N_i + N_j)$ 个阻抗矩阵元素, 远小于 $N_i \times N_j$, 大大加快了远组阻抗矩阵填充速度.

构造 SCBF 过程中, 需要做大量的矩阵向量相乘运算, 利用压缩格式的子矩阵代替 (10) 式中的 Z_{ij} , 并交换乘积顺序:

$$Z_{ii}^e J_i^{S1} = - \sum_{j=1(j \neq i)}^M Z_U (Z_V J_j^P), \quad (14)$$

可将计算量由 $N_i \times N_j$ 降为 $r(N_i + N_j)$. 同样在构造缩减矩阵的过程中, 也需要频繁地进行矩阵向量相乘运算. 将 (8) 式中的阻抗矩阵 Z_{ij} 用压缩格式表示, 并设置合适的乘积顺序, 可得

$$Z_{ij}^R = [(J_i^A)^T Z_U] [Z_V J_j^B] \quad (i, j \leq M, A \leq K_i, B \leq K_j), \quad (15)$$

此时, 计算量由原来的 $(N_i + 1) \times N_j$ 降为 $r(N_i + N_j + 1)$, 由于 $r \ll \min(N_i, N_j)$, 因此加速效果是显著的.

3 数值算例与结果

为了验证本文方法的有效性, 分别对 16 个导体圆柱、正方体导体和杏仁体的 RCS 进行了计算. 本文所有计算均在 Intel(R) Core(TM) i7-3820 3.60 GHz, 64 GB RAM 的 PC 机上完成, 操作系统为 Fedora 64 位系统, 编译器采用 GNU g++ 4.7.2, 所有算例均采用双精度浮点计算, SCBF 取至 2 阶, ACA 误差迭代门限 τ 为 0.001, SVD 门限取 0.001.

算例 1 研究了 16 个离散导体圆柱的双站电磁散射特性, 每个圆柱的半径为 0.25 m, 高为 0.5 m, 相邻圆柱间隔为 0.5 m, 用三角单元进行剖分, 单元数为 9728, 未知数为 14592, 入射波频率为 500 MHz, 入射角 $\theta_i = 60^\circ$, $\phi_i = 0^\circ$. 将每个圆柱划为一个子域, 采用 SVD-CBFM 时, 在 θ 方向、 ϕ 方向各构造 20 个平面波激励, 再考虑两种极化方式, 共需要 800 个平面波激励, 每个子域生成 800 个 CBFs, 经过 SVD 后, 每个子域有 141 个 CBFs, 最后生成

的缩减矩阵的维数为 2256. 采用 SVD-ICBFM-ACA 时, 在 θ 方向、 ϕ 方向各构造 6 个平面波激励, 再加上两种极化方式, 共需要 72 个平面波激励, 每个子域生成 216 个 CBFs, 与 SVD-CBFM 相比, CBFs 个数减少了 73%. 经过 SVD 后, 每个子域平均只有 68 个 CBFs, 最后生成的缩减矩阵维数为 1092, 与 SVD-CBFM 比较, 缩减矩阵维数减少 52%. 两种方法的计算结果如图 1(a) 和 (b) 所示, 由 1 图可见 SVD-ICBFM-ACA 计算得到的雷达散射截面 (RCS) 曲线与 SVD-CBFM 符合较好.

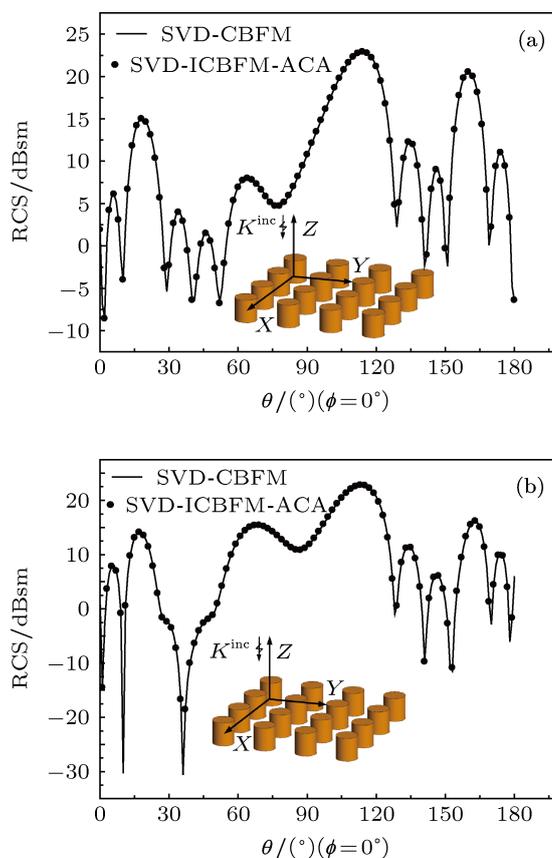


图 1 (a) 16 个导体圆柱的 HH 极化双站 RCS; (b) 16 个导体圆柱的 VV 极化双站 RCS

算例 2 研究了一个边长为 0.8 m 正方体导体的单站电磁散射特性, 用三角单元进行剖分, 单元数为 7794, 将其划分 8 个子域, 相邻子域间扩展 0.15λ , 扩展后未知数为 14306, 入射波频率为 1 GHz, 入射角 $\theta_i = 0^\circ - 180^\circ$, $\phi_i = 0^\circ$. 采用 SVD-CBFM 时, 在 θ 方向、 ϕ 方向上各构造 20 个平面波激励, 再考虑两种极化方式, 共需要 800 个平面波激励, 每个子域生成 800 个 CBFs, 经过 SVD 后, 每个子域平均有 174 个 CBFs, 最后生成的缩减矩阵的维数为 1396. 采用 SVD-ICBFM-ACA 时, 在 θ

方向、 ϕ 方向各构造 6 个平面波激励, 加上两种极化方式, 需要 72 个平面波激励, 每个子域生成 216 个 CBFs, 与 SVD-CBFM 相比, CBFs 个数减少 73%. 经过 SVD 后, 每个子域平均只有 98 个 CBFs, 最后生成的缩减矩阵维数为 789, 与 SVD-CBFM 比较, 缩减矩阵维数减少了 44%. 两种方法的计算结果如图 2(a) 和 (b) 所示, 可以看出 SVD-ICBFM-ACA 具有较高的计算精度.

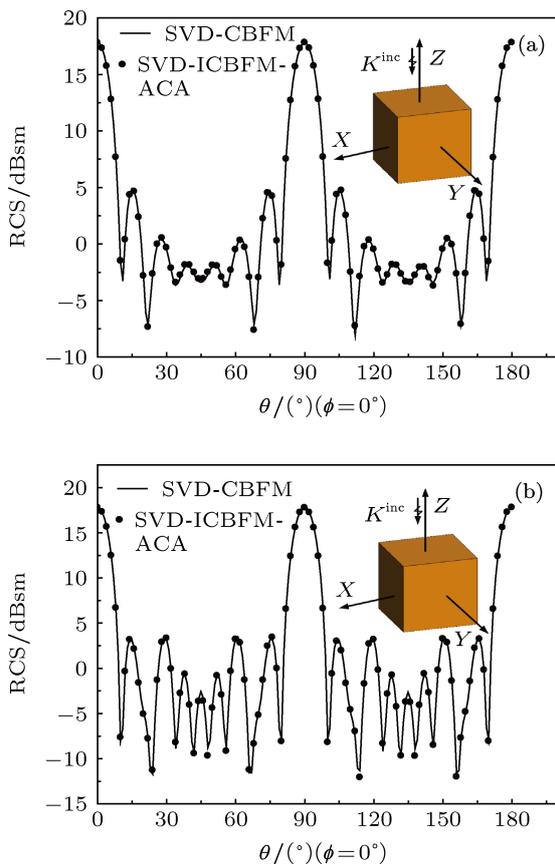


图 2 (a) 正方体导体 HH 极化单站 RCS; (b) 正方体导体 VV 极化单站 RCS

算例 3 研究了一个 252.3744 mm 导体杏仁体的单站电磁散射特性, 用三角单元进行剖分, 单元数为 6124, 将其沿 x 方向划分 10 个子域, 相邻子域间扩展 0.15λ , 扩展后未知数为 13348, 入射波频率为 7 GHz, 入射角 $\theta_i = 90^\circ$, $\phi_i = 0^\circ - 180^\circ$. 采

用 SVD-CBFM 时, 在 θ 方向、 ϕ 方向上各构造 20 个平面波激励, 再考虑两种极化方式, 共需要 800 个平面波激励, 每个子域生成 800 个 CBFs, 经过 SVD 后, 每个子域平均有 136 个 CBFs, 最后生成的缩减矩阵的维数为 1360. 采用 SVD-ICBFM-ACA 时, 在 θ 方向、 ϕ 方向各构造 7 个平面波激励, 加上两种极化方式, 需要 98 个平面波激励, 每个子域生成 294 个 CBFs, 与 SVD-CBFM 相比, CBFs 个数减少了 64%. 经过 SVD 后, 每个子域平均只有 92 个 CBFs, 最后生成的缩减矩阵维数为 918, 与 SVD-CBFM 比较缩减矩阵维数减少了 33%. 两种方法计算结果如图 3(a) 和 (b) 所示, SVD-ICBFM-ACA 与 SVD-CBFM 符合较好.

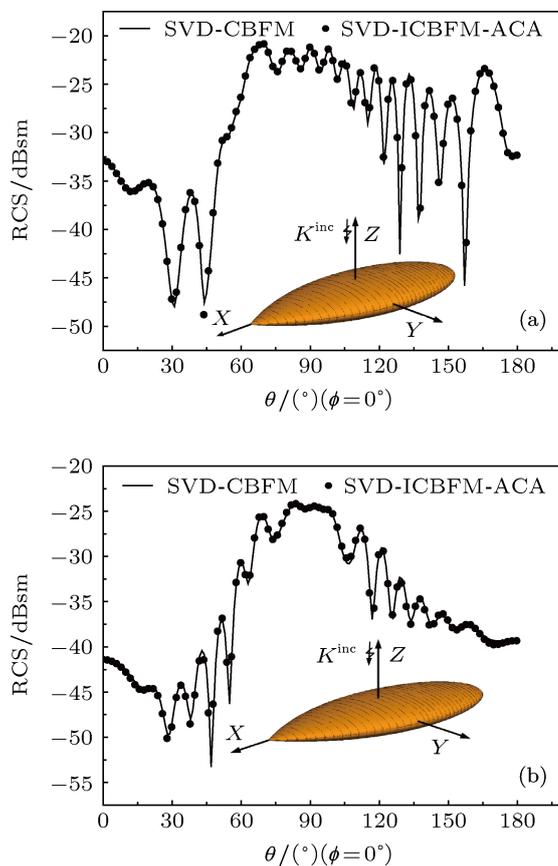


图 3 (a) 杏仁体 HH 极化单站 RCS; (b) 杏仁体 VV 极化单站 RCS

表 1 CPU 时间比较

目标及未知量个数	计算方法	基函数生成时间/s	缩减矩阵填充时间/s	RCS 求解时间/s	总时间/s
离散圆柱 (14592)	SVD-CBFM	2083	38542	30	40655
	SVD-ICBFM-ACA	758	5131	16	5905
正方体 (14306)	SVD-CBFM	2652	28447	38	31137
	SVD-ICBFM-ACA	1393	5042	24	6459
杏仁体 (13348)	SVD-CBFM	2100	12032	25	14157
	SVD-ICBFM-ACA	930	4225	19	5174

三个算例所需要的时间如表 1 所示. 表 1 中分别给出了 SVD-CBFM, SVD-ICBFM-ACA 在基函数生成、缩减矩阵构造、RCS 求解所消耗的时间. 通过比较, 本文方法在基函数生成、缩减矩阵构造、RCS 求解时间上都有了大大的缩减, 计算效率大大提高.

4 结论

本文提出了一种改进的特征基函数法, 并结合

自适应交叉近似算法对导体目标电磁散射特性进行了分析. 该方法充分考虑到子域间的耦合作用, 求出次要特征基函数以减少入射波激励个数, 减少了特征基函数的个数, 减少了 SVD 分解时间; 另外, 利用自适应交叉近似算法来加速远组阻抗矩阵元素填充、加快次要特征基函数求解以及构建缩减矩阵中的矩阵矢量乘积的速度. 数值结果表明, 本文给出的 SVD-CBFM-ACA 较之 SVD-CBFM, 计算效率大大提高.

- [1] Harrington R F 1993 *Field Computation by Moment Methods* (New York: IEEE)
- [2] Kang Y M, Xu J X, Xie Y 2005 *Chin. Phys. B* **14** 1691
- [3] Wang A Q, Guo L X, Chai C 2011 *Chin. Phys. B* **20** 050202
- [4] Cao X Y, Chen M S, Wu X L 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 028401
- [5] Wu H J, Jiang W K, Lu W B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 054301 (in Chinese) [吴海军, 蒋伟康, 鲁文波 2012 物理学报 **61** 054301]
- [6] Wang X B, Liang Z C, Wu Z S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 124104 (in Chinese) [王晓冰, 梁子长, 吴振森 2012 物理学报 **61** 124104]
- [7] Song J M, Lu C C, Chew W C 1997 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **45** 1488
- [8] Li M M, Chen H, Chen R S 2010 *Chin. J. Radio Sci.* **25** 127 (in Chinese) [李猛猛, 陈华, 陈如山 2010 电波科学学报 **25** 127]
- [9] Pan X M, Sheng X Q 2011 *Chin. J. Radio Sci.* **33** 1690 (in Chinese) [潘小敏, 盛新庆 2011 电波科学学报 **33** 1690]
- [10] Ma J, Guo L X, Wang A Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3431
- [11] Nie X C, Yuan N, Li L W 2008 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **56** 3526
- [12] Hu J, Wang X F, Nie Z P, Xiao Y H 2007 *Chin. J. Radio Sci.* **22** 614 (in Chinese) [胡俊, 王晓峰, 聂在平, 肖运辉 2007 电波科学学报 **22** 614]
- [13] Chen X L, Gu C Q, Niu Z Y, Li Z 2012 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **60** 1186
- [14] Prakash V V S, Mittra R 2003 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **36** 95
- [15] Sun Y F, Chan C H, Mittra R 2003 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Columbus*, June 22–27, 2003 p1068
- [16] Han G D, Gu C Q 2007 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **49** 2879
- [17] Lucente E, Monorchio A, Mittra R 2008 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **56** 999
- [18] Delgado C, Mittra R 2008 *IEEE Antenn. Wirel. Propag. Lett.* **7** 43
- [19] Hou Z G, Wang C, Dong C Z, Yin H C 2011 *Syst. Engineer. Electron.* **33** 1458 (in Chinese) [侯兆国, 王超, 董纯柱, 殷红成 2011 系统工程与电子技术 **33** 1458]
- [20] Wang Q Q, Wang W, Liu Z W, Chen H, Fan Z H, Chen R S 2010 *Syst. Engineer. Electron.* **32** 2103 (in Chinese) [王全全, 王唯, 刘志伟, 陈华, 樊振宏, 陈如山 2010 系统工程与电子技术 **32** 2103]
- [21] Gu J J, Gu C Q 2010 *J. Microwave* **26** 7 (in Chinese) [顾晶晶, 顾长青 2010 微波学报 **26** 7]
- [22] Chen X L, Gu C Q, Niu Z Y, Li Z 2012 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & EM Theory Xi'an* October 22–26, 2012 p1021
- [23] Hu L, Li W L, Mittra R 2010 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **58** 3086
- [24] Wang R, Guo L X, Ma J, Wu Z S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1503
- [25] Bucci O M, Franceschetti G 1989 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **37** 918
- [26] Bucci O M, Franceschetti G 1997 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **45** 1445
- [27] Zhao K Z, Vouvakis M N, Lee J F 2005 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **47** 763

Fast analyses of electromagnetic scattering characteristics from conducting targets using improved and the adaptive cross approximation algorithm*

Wang Zhong-Gen^{1)2)†} Sun Yu-Fa¹⁾ Wang Guo-Hua¹⁾

1) (Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China)

2) (College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

(Received 24 June 2013; revised manuscript received 23 July 2013)

Abstract

Constructing characteristic basis functions (CBFs) is a key step of characteristic basis function method (CBFM). But it is required to set adequate plane wave excitations in each sub-block, which leads to the increased number of characteristic basis functions and the longer time consumed in singular value decomposition of traditional method. In order to accelerate the construction of CBFs, an improved CBFM is presented, which fully considers the mutual coupling effects among sub-blocks and then the secondary level characteristic basis function (SCBF) is obtained, therefore the number of plane wave excitations is reduced greatly, and so is the number of characteristic basis functions. The adaptive cross approximation algorithm is also used to accelerate the matrix-vector multiplication procedure of generating SCBF and constructing the reduced matrix. Numerical results demonstrate that the proposed method is accurate and efficient.

Keywords: electromagnetic scattering, method of moments, characteristic basis function method, adaptive cross approximation

PACS: 41.20.Jb, 41.20.-q

DOI: 10.7498/aps.62.204102

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61172020), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20123401110006), the Academic Innovation Research for College Graduates of Anhui University, China (Grant No. 10117700470), and the Fund for 211 Project of Anhui University, China (Grant No. ZYGG201202).

† Corresponding author. E-mail: zgwang@ahu.edu.cn