

混合场积分方程结合 MLFMA 分析导体介质复合目标电磁散射问题

阙肖峰, 聂在平, 胡 俊

(电子科技大学电子工程学院, 四川成都 610054)

摘 要: 针对组合目标电磁散射问题, 采用一类新的混合场积分方程进行分析. 通过合理选择比例系数组合表面电场和磁场积分方程, 构造出具有良好收敛性的阻抗矩阵. MLFMA 的迭代求解采用广义最小残差方法 (GMRES), 结合预条件技术进一步减少迭代次数, 加速计算并提高处理电大尺寸导体介质复合目标的能力. 研究了几类典型目标电磁散射特性并比较了计算效率, 数值算例验证了该方法的准确性和高效性.

关键词: 电磁散射; 导体介质复合目标; 多层快速多极子方法; 混合场积分方程; 预条件

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 11-2062-05

Analysis of EM Scattering by Composite Conducting and Dielectric Object Using Combined Field Integral Equation with MLFMA

QUE Xiao-feng, NIE Zai-ping, HU Jun

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: A new combined field integral equation is proposed to analyze the electromagnetic scattering for composite conducting and dielectric object. Through properly choosing the coupling coefficients of the equations, the resultant matrix equation achieves better convergence properties. The restarted generalized minimum residual method (GMRES) is applied in the multilevel fast multipole algorithm (MLFMA) and preconditioning technique is used to further improve the convergence rate. Numerical examples are presented to compare the efficiency of different methods and show the validity and high efficiency of proposed method.

Key words: electromagnetic scattering; composite conducting and dielectric object; multilevel fast multipole algorithm (MLFMA); combined field integral equation (CFIE); preconditioning technique

1 引言

对导体介质复合目标的电磁散射分析具有重要研究意义和工程价值. 例如飞行器为隐身而涂覆吸波材料, 为研究飞行目标的雷达散射截面积 (RCS), 就涉及到对含介质目标的电磁散射分析. 采用数值方法分析此类问题较常采用积分方程方法^[1,2], 如体积分方程方法 (VIE)^[3] 和表面积分方程方法 (SIE)^[4]. 当介质体为均匀或分段均匀时, 采用 SIE 更具有计算上的优势. 由于 SIE 只需在目标表面定义未知电流和磁流, 避免了对介质体内部的剖分, 降低了未知量个数. 采用 SIE 分析含介质目标时, 其数值求解的准确性和高效性依赖于积分方程形式的选取. 在导体表面建立混合场积分方程 (CFIE), 介质表面建立 PMCHW 方程的 CFIE-PMCHW 方法广泛用于组合目标的电磁散射分析^[5,6]. 但由于介质材料的存在, 表面电流相互耦合增强; 不同介质材料中单元剖分尺寸不同等, 都导致所构造的矩阵方程性态变差^[7]. 特别是在处理大尺寸、复杂结构目标时, 迭代求解收敛缓慢, 降低了计算效率.

本文采用一类新的表面混合场积分方程 CFIE-JMCFIE^[8,9] 并结合 MLFMA^[10,11] 分析电大尺寸目标电磁特性. CFIE-JMCFIE 利用伽略金方法构造的阻抗矩阵具有对角占优的特点, 相对于 CFIE-PMCHW 方程, CFIE-JMCFIE 构造的阻抗矩阵具有更小的条件数, 然后讨论了积分方程组合系数的选择对收敛性的影响. 采用广义最小残差方法 (GMRES) 迭代求解矩阵方程, 并结合块对角 (BD) 预条件技术进一步改善矩阵方程收敛性, 减少迭代次数. 最后通过对介质体、涂覆目标以及任意导体介质复合目标电磁散射问题的数值算例验证了方法的准确性和高效性.

2 基本理论与方法

2.1 混合场积分方程 CFIE-JMCFIE

如图 1(a) 所示均匀介质目标等效原理示意图, 其中 R_0 和 R_1 分别表示自由空间和介质区域, R_0 和 R_1 中媒质参数分别为 (ϵ_0, μ_0) 和 (ϵ_1, μ_1) , \mathbf{E}^{inc} 和 \mathbf{H}^{inc} 分别表示入射电场和磁场. 根据等效原理, 介质表面 S_d 上定义等效电流 \mathbf{J}_d 和等效磁流 \mathbf{M}_d . 在 S_d 内外建立电场积分方

程 $EFIE_{1,0}$ 和磁场积分方程 $MFIE_{1,0}$, 其中下标 1,0 分别表示介质面内和在外. 传统 PMCHW 方程的构造是通过介质表面内外电场积分方程组合 $EFIE_0 - EFIE_1$, 磁场积分方程组合 $MFIE_0 - MFIE_1$ 得到. 介质表面建立的 PMCHW 方程可表示为:

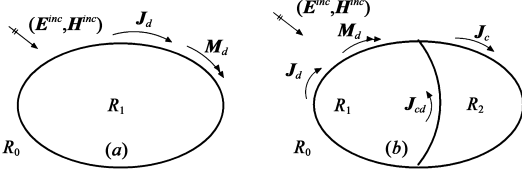


图 1 含介质目标等效原理示意图 (a) 均匀介质目标; (b) 导体介质组合目标

$$[Z_0 L_0 + Z_1 L_1] J_d - [K_0^+ + K_1^-] M_d = -E^{inc} \quad (1)$$

$$[K_0^+ + K_1^-] J_d + \left[\frac{1}{Z_0} L_0 + \frac{1}{Z_1} L_1 \right] M_d = -H^{inc} \quad (2)$$

其中 Z_i 为媒质 i 中波阻抗, 算子 L_i 和 K_i 的表达式为:

$$L_i(X) = -jk_i \int_s \left[X(r') + \frac{1}{k_i^2} \nabla \nabla \cdot X(r') \right] G_i(r, r') ds' \quad (3)$$

$$K_i^\pm(X) = \pm 0.5 X \times n + P.V. \int_s \nabla G_i(r, r') \times X(r') ds' \quad (4)$$

其中 X 表示 J 或 M , $j = \sqrt{-1}$, k_i 和 G_i 分别表示媒质 i 中的波数和格林函数, r' 和 r 表示源点和场点位置矢量, n 为介质面单位外法向矢量, $P.V.$ 表示主值积分.

PMCHW 方程通过伽略金法构造的矩阵方程不具有主对角占优的特点, 因此在迭代求解矩阵方程时需要较多的迭代次数. 本文采用一类新的混合场积分方程^[8], 即分别建立介质表面内外的电流混合场方程 JCFIE 和磁流混合场方程 MCFIE.

$$\text{JCFIE: } \alpha_d EFIE_l + \beta_d Z_0 n \times MFIE_l \quad (5)$$

$$\text{MCFIE: } \alpha_d Z_0 MFIE_l - \beta_d n \times EFIE_l \quad (6)$$

其中 α_d, β_d 为比例因子, $\beta_d = 1 - \alpha_d$. 然后采用与建立 PMCHW 方程类似的方法, 将介质表面内外的电流混合场方程组合 $JCFIE_0 - JCFIE_1$, 磁流混合场方程组合 $MCFIE_0 - MCFIE_1$, 得到 JMCIE 表达式:

$$\begin{aligned} & \{ \alpha_d [Z_0 L_0 + Z_1 L_1] + \beta_d Z_0 [n \times K_0^+ - n \times K_1^-] \} J_d + \\ & \left\{ -\alpha_d Z_0 [K_0^+ + K_1^-] + \beta_d \left[\frac{Z_0^2}{Z_0} n \times L_0 - \frac{Z_0^2}{Z_1} n \times L_1 \right] \right\} M_d \\ & = -\alpha_d E^{inc} - \beta_d Z_0 n \times H^{inc} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \{ \alpha_d Z_0 [K_0^+ + K_1^-] + \beta_0 [-Z_0 n \times L_0 + Z_1 n \times L_1] \} J_d + \\ & \left\{ \alpha_d \left[\frac{Z_0^2}{Z_0} L_0 + \frac{Z_0^2}{Z_1} L_1 \right] + \beta_d Z_0 n \times [K_0^+ - K_1^-] \right\} M_d \\ & = -\alpha_d Z_0 H^{inc} + \beta_d n \times E^{inc} \end{aligned} \quad (8)$$

为了得到相同量级上的矩阵元素值, 式(7)、(8)中 MCFIE 等号两端均乘以了 Z_0 , 所有未知磁流系数 M_d 均除以了 Z_0 , 这和文献[8]中确定矩阵元素系数的方式有所不同. 本文方法的优点是不仅主对角线矩阵元素具有

相同的量级分布, 非对角矩阵元素以及所求电、磁流未知系数也具有相同大小的量级. 通过伽略金方法得到矩阵方程表示为:

$$\begin{aligned} & [\alpha_d (Z_0 P_0^{TE} + Z_1 P_1^{TE}) + \beta_d Z_0 (Q_0^{NH+} - Q_1^{NH-})] J_d + \\ & \left[\alpha_d Z_0 (-Q_0^{TE+} - Q_1^{TE-}) + \beta_d \left(\frac{Z_0^2}{Z_0} P_1^{NH} - \frac{Z_0^2}{Z_1} P_1^{NH} \right) \right] M_d \\ & = \alpha_d b^{TE} + \beta_d b^{NH} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & [\alpha_d Z_0 (Q_0^{TE+} + Q_1^{TE-}) + \beta_d (-Z_0 P_0^{NH} + Z_1 P_1^{NH})] J_d + \\ & \left[\alpha_d \left(\frac{Z_0^2}{Z_0} P_0^{TE} + \frac{Z_0^2}{Z_1} P_1^{TE} \right) + \beta_d Z_0 (+Q_0^{NH+} - Q_1^{NH-}) \right] M_d \\ & = \alpha_d b^{TH} - \beta_d b^{NE} \end{aligned} \quad (10)$$

其中矩阵和向量中的元素表示为:

$$P_{inn}^{TE} = \langle f_m, L_i(f_n) \rangle \quad (11)$$

$$P_{inn}^{NH} = \langle f_m \times n, L_i(f_n) \rangle \quad (12)$$

$$Q_{inn}^{TE\pm} = \langle f_m, K_i^\pm(f_n) \rangle \quad (13)$$

$$Q_{inn}^{NH\pm} = \langle f_m \times n, K_i^\pm(f_n) \rangle \quad (14)$$

$$b_m^{TE} = \langle f_m, -E^{inc} \rangle \quad (15)$$

$$b_m^{NE} = \langle f_m, -n \times E^{inc} \rangle \quad (16)$$

$$b_m^{TH} = \langle f_m, -Z_0 H^{inc} \rangle \quad (17)$$

$$b_m^{NH} = \langle f_m, -Z_0 n \times H^{inc} \rangle \quad (18)$$

其中 f_n 和 f_m 分别表示基、权函数. JMCIE 方程所构造的阻抗矩阵, 主对角元素表达式与传统导体目标 CFIE 的对角元素表达式相同; 而非主对角元素, 如 P_{inn}^{NH} , Q_{inn}^{TE+} 具有较小的值, 因此全局阻抗矩阵具有主对角占优的特点. 当 $\alpha_d = 1$ 时矩阵方程退化为 PMCHW 方程形式.

如图 1(b) 所示任意导体介质复合目标, R_1 和 R_2 分别表示介质和导体区域. 根据等效原理, 导体表面 S_c 和导体介质连接面 S_{cd} 上分别定义等效电流 J_c 和 J_{cd} . 在 S_c 和 S_{cd} 上建立混合场积分方程(CFIE):

$$\alpha_c \{ Z_0 L_0(J_c, J_d) - Z_0 K_0^+(M_d) \} + \beta_c Z_0 n_c \times [K_0^+(J_c, J_d) + L_0(M_d)] = -\alpha_c E^{inc} - \beta_c Z_0 n_c \times H^{inc}, \quad \text{on } S_c \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \alpha_c \{ Z_1 L_1(J_{cd}, -J_d) - Z_0 K_1^-(M_d) \} + \beta_c Z_0 n_{cd} \\ & \times \left[K_1^-(J_{cd}, -J_d) + \frac{Z_0}{Z_1} L_1(-M_d) \right] = 0, \quad \text{on } S_{cd} \end{aligned} \quad (20)$$

其中 α_c 和 β_c 为比例因子, $\beta_c = 1 - \alpha_c$. $n_{c/cd}$ 为相对于导体面的单位外法向矢量, $\Gamma_i(A, B) = \Gamma_i(A) + \Gamma_i(B)$, Γ_i 表示 L_i 或 K_i . 式(7)和(8)中加入等效电流 J_c 和 J_{cd} 在各自媒质中的贡献, 并结合(19)、(20)就构成了求解任意导体介质复合目标的 CFIE-JMCIE 方程.

2.2 求解含介质目标的 MLFMA

相对于导体目标, 含介质目标的电磁散射问题不仅分析方法较复杂, 数值计算未知量个数也大大增加. 即使采用 SIE, 也需要在介质表面以及不同介质, 介质与金属分界面上定义未知电流和磁流, 计算量增加. 传

统矩量法(MoM)只能求解较小介质目标电磁问题,为了实现电大尺寸目标电磁散射计算,本文采用 MLFMA 并结合 BD 预条件、快速远场近似(FAFFA)等方法提高计算效率和计算能力。

MLFMA 用于加速迭代求解线性方程组过程中的矩阵矢量相乘运算^[10,11].它的主要思路是通过目标进行分组,相邻组内阻抗矩阵元素通过直接计算得到;而对于非附近组内矩阵元素的计算则通过聚合-转移-配置过程完成,计算过程中仅需要保存各附近组的阻抗矩阵元素. MLFMA 的计算复杂度和内存需求均为 $O(N \log N)$ 量级(其中 N 为数值计算未知量个数),极大地提高了处理电大尺寸问题的能力. MLFMA 的数学基础是加法定理,即利用加法定理将积分方程中的格林函数在角谱空间展开,利用平面波进行算子对角化. 标量格林函数可以写为:

$$\frac{e^{-jk_r r_{mn}}}{r_{mn}} = \frac{-jk_i}{4\pi} \int d^2 \hat{k} e^{-jk_i \cdot (r_m - r_n)} \alpha_{il'}(\hat{r}_{il'} \cdot \hat{k}) \quad (21)$$

其中 r_m 和 r_n 分别表示场源位置矢量, r_l 和 $r_{l'}$ 分别表示场源所在组中心位置矢量. 转移因子 $\alpha_{il'}$ 的表达式为

$$\alpha_{il'}(\hat{r}_{il'} \cdot \hat{k}) = \sum_{s=0}^{L-1} -j^s (2s+1) h_s^{(2)}(k_i r_{il'}) P_s(\hat{r}_{il'} \cdot \hat{k}) \quad (22)$$

其中 $h_s^{(2)}$ 为第一类球汉克尔函数, P_s 为勒让德多项式. 多极子模式数 L 的选择是为了确保级数的收敛和稳定. 在无耗媒质空间 k_i 为实数, $L \approx k_i D + \gamma \ln(\pi + k_i D)$, 其中 D 为子散射体组的最大尺寸, 系数 γ 决定相对误差, 一般取 $\gamma = 2$ 则相对误差小于 10^{-2} ; 当媒质有耗时, $\sigma_i \neq 0$, $k_i = k' + jk''$, 多极子模式数 L 的选择取决于 k''/k' . 在损耗较小的情况下, L 的稍微增加就能确保级数的收敛^[12]. 于是式(11~14)中各元素表示为:

$$\begin{aligned} P_{ilm}^{TE} &= \langle \mathbf{f}_m, \mathbf{L}_i(\mathbf{f}_n) \rangle \\ &= - \left(\frac{k_i}{4\pi} \right)^2 \oint \mathbf{V}_{ilm}^{TEP}(\hat{k}) \cdot \alpha_{il'}(\hat{k} \cdot \hat{r}_{il'}) \mathbf{V}_{il'n}(\hat{k}) d^2 \hat{k} \quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{ilm}^{TE} &= \langle \mathbf{f}_m, \mathbf{K}_i(\mathbf{f}_n) \rangle \\ &= \left(\frac{k_i}{4\pi} \right)^2 \oint \mathbf{V}_{ilm}^{TEQ}(\hat{k}) \cdot \alpha_{il'}(\hat{k} \cdot \hat{r}_{il'}) \mathbf{V}_{il'n}(\hat{k}) d^2 \hat{k} \quad (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{ilm}^{NH} &= \langle \mathbf{f}_m \times \hat{n}, \mathbf{L}_i(\mathbf{f}_n) \rangle \\ &= \left(\frac{k_i}{4\pi} \right)^2 \oint \mathbf{V}_{ilm}^{NHP}(\hat{k}) \cdot \alpha_{il'}(\hat{k} \cdot \hat{r}_{il'}) \mathbf{V}_{il'n}(\hat{k}) d^2 \hat{k} \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{ilm}^{NH} &= \langle \mathbf{f}_m \times \hat{n}, \mathbf{K}_i(\mathbf{f}_n) \rangle \\ &= - \left(\frac{k_i}{4\pi} \right)^2 \oint \mathbf{V}_{ilm}^{NHQ}(\hat{k}) \cdot \alpha_{il'}(\hat{k} \cdot \hat{r}_{il'}) \mathbf{V}_{il'n}(\hat{k}) d^2 \hat{k} \quad (26) \end{aligned}$$

其中聚合量 $\mathbf{V}_{il'n}$, 配置量 \mathbf{V}_{ilm}^{TEP} 、 \mathbf{V}_{ilm}^{TEQ} 、 \mathbf{V}_{ilm}^{NHP} 和 \mathbf{V}_{ilm}^{NHQ} 表示为:

$$\mathbf{V}_{il'n}(\hat{k}) = \int_s e^{jk_i \cdot \mathbf{r}_l} \mathbf{f}_n ds' \quad (27)$$

$$\mathbf{V}_{ilm}^{TEP}(\hat{k}) = \int_s e^{jk_i \cdot \mathbf{r}_m} (\mathbf{I} - \hat{k} \hat{k}) \cdot \mathbf{f}_m ds \quad (28)$$

$$\mathbf{V}_{ilm}^{TEQ}(\hat{k}) = \int_s e^{jk_i \cdot \mathbf{r}_m} \hat{k} \times \mathbf{f}_m ds \quad (29)$$

$$\mathbf{V}_{ilm}^{NHP}(\hat{k}) = \int_s e^{jk_i \cdot \mathbf{r}_m} (\mathbf{I} - \hat{k} \hat{k}) \cdot \hat{n} \times \mathbf{f}_m ds \quad (30)$$

$$\mathbf{V}_{ilm}^{NHQ}(\hat{k}) = \int_s e^{jk_i \cdot \mathbf{r}_m} \hat{k} \times \hat{n} \times \mathbf{f}_m ds \quad (31)$$

2.3 加速计算的方法

2.3.1 块对角(BD)预条件技术 采用 MLFMA 加速了迭代求解过程中的矩阵矢量相乘运算,但收敛效率却与阻抗矩阵的条件数以及所采用的迭代方法有关. 采用 CFIE-PMCHW 方法构造的阻抗矩阵条件数较差;而根据 CFIE-JMCFIE 建立的阻抗矩阵条件数得到了明显的改善;采用预条件技术,如 ILUT^[13,14], SAI^[15]可进一步改善矩阵收敛性. 但即使只选用近区组阻抗矩阵元素用于构造预条件矩阵,计算时间和内存需求上的代价也是很大的. 本文采用类似导体目标 CFIE 分析中的 BD 预条件技术^[10],构造预条件矩阵仅需很少的计算时间,不需要额外的存储需求,即可获得明显改善的收敛效果.

2.3.2 GMRES 迭代方法 数值实验发现 CFIE-PMCHW 和 CFIE-JMCFIE 建立的矩阵方程采用 CG 迭代方法都能收敛,但采用 GMRES 时却收敛缓慢;而 CFIE-JMCFIE-BD 方法采用 GMRES 能获得较快的收敛速度. 由于聚合-转移-配置运算将在不同的媒质中进行;不同的算子方程运算过程也有所不同,因此对远区组矩矢相乘需要进行多次的聚合-转移-配置运算. 每次迭代 CG 需要计算两次矩矢相乘,而 GMRES 仅需一次,约减少了一半的计算量.

2.3.3 快速远场近似技术(FAFFA) 在分析电大尺寸目标散射问题时,采用加速矩阵迭代求解效率的高效方法,如 FAFFA,能降低每次矩矢相乘的计算量^[16]. 其主要思路是在 MLFMA 中选择最粗层 $L_c > 2$;在最粗层远区组间进行转移运算时,仅对两个组中心连线方向上角谱分量进行转移运算,降低了计算量.

3 数值算例

以下所有计算均在 SGI O350 服务器的单 CPU 上完成,导体表面采用混合场积分方程 CFIE,比例因子设定 $\alpha_c = 0.5$. 入射平面波频率为 300MHz,自由空间波长 $\lambda_0 = 1\text{m}$.

表 1 阻抗矩阵条件数和迭代次数比较

	矩阵条件数	迭代次数
CFIE-PMCHW	1021	129
CFIE-JMCFIE($\alpha_d = 0.7$)	419	71
CFIE-JMCFIE($\alpha_d = 0.5$)	341	52
CFIE-JMCFIE($\alpha_d = 0.3$)	292	41

首先考查 CFIE-JMCFIE 所建立阻抗矩阵的条件数

以及迭代求解的收敛性. 计算模型为导体柱介质半球模型, 导体柱底部直径和高均为 $0.6\lambda_0$, 导体柱上表面与直径为 $0.6\lambda_0$ 介质半球连接, 介质球的相对介电常数为 $\epsilon_r = 2$. x 极化平面波从半球顶部入射. 采用不同比例因子 α_d 建立 CFIE-JMCFIE ($\alpha_d = 1$ 即为 CFIE-PMCHW 方程), 通过伽略金法建立阻抗矩阵方程并采用 CG 迭代求解. 图 2 为不同比例因子时 HH 极化双站 RCS, 表 1 给出阻抗矩阵的条件数和相对误差收敛到 10^{-3} 时的迭代步数. 在未采用预条件技术情况下, CFIE-JMCFIE 改善了阻抗矩阵条件数, 减少了迭代次数. 综合考虑计算效率和计算精度, 以下数值计算均采用 $\alpha_d = 0.5$.

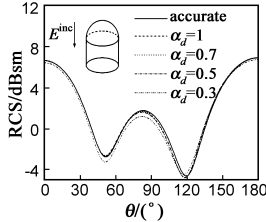


图 2 介质半球导体柱双站 RCS

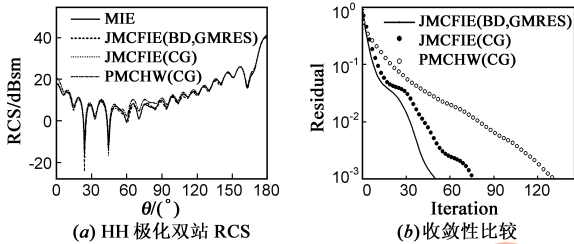


图 3 介质球计算结果

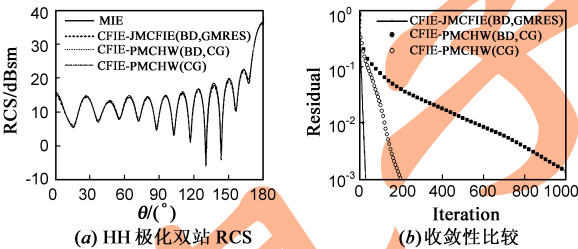


图 4 涂覆球 1 计算结果

然后计算了介质球和涂覆导体球在平面波照射下 HH 极化双站 RCS. 其中介质球半径 $r = 3\lambda_0$, $\epsilon_r = 2$; 涂覆球体定义 r 为导体球半径, t 和 ϵ_r 分别为涂覆介质厚度

和相对介电常数: (1) $r = 2\lambda_0, t = 0.1\lambda_0, \epsilon_r = 2$; (2) $r = 6.5\lambda_0, t = 0.1\lambda_0, \epsilon_r = 2.15$; (3) $r = 10\lambda_0, t = 0.1\lambda_0, \epsilon_r = 2$. 介质表面建立 PMCHW 或 JMCFIE, 导体表面建立 CFIE, 比较了采用 BD 预条件技术以及不同迭代方法时的计算结果和计算效率. 图 3(a) 和 (b) 给出介质球的计算结果, JMCFIE 和 PMCHW 方程计算所得 RCS 和 MIE 级数解析结果都较吻合, 而 JMCFIE 结果吻合更好. 采用 JMCFIE 收敛性得到改善, 结合 BD 预条件更进一步减少了迭代次数. 从表 2 的数据看, JMCFIE 方法构造阻抗矩阵时间略多于 PMCHW 方法, 但由于求解矩阵方程时间减少, 总的计算时间下降, 结合 BD 预条件技术时计算时间更大幅减少. 如图 4~图 6 所示涂覆导体球计算结果, CFIE-JMCFIE 和 CFIE-PMCHW 方程计算 RCS 结果和 MIE 级数解均相当吻合; 从收敛曲线来看, 采用 BD 预条件技术的 CFIE-JMCFIE 收敛性能得到了很大的改善, 而 CFIE-PMCHW 采用 BD 预条件收敛性变差. 计算涂覆球 2 时, 相对于 CFIE-PMCHW 方程, 采用 CFIE-JMCFIE-BD 方法时迭代求解时间从 64902s 下降为 6708s. 求解矩阵方程时间的减少对于单站 RCS 的计算是非常有利的. 涂覆球 3 的计算中, 未知量个数为 1117683. 采用 CFIE-JMCFIE-BD 方法, 内存需求 14.2Gb. 结合 FAFFA 加速矩矢相乘运算中的转移运算, 选取最粗层为第三层, 最粗层的远区组判定因子 $\gamma = 1.5$. 每次矩矢相乘计算时间则减少约 13%. 图 6 给出涂覆球 3 的双站 RCS, 采用 FAFFA 计算结果与未采用 FAFFA 结果吻合很好.

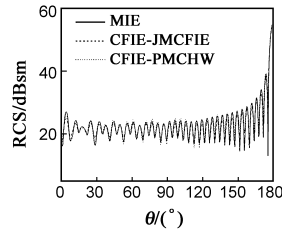


图 5 涂覆球 2 双站 RCS

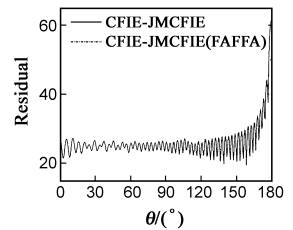


图 6 涂覆球 3 双站 RCS

表 2 计算时间比较

	未知量个数	积分方程	迭代方法	预条件	附近组阻抗矩阵	每次迭代	矩阵方程	总计算时间
					计算时间(s)	计算时间(s)	求解时间(s)	(s)
介质球	59958	JMCFIE	GMRES	BD	3223	20	1017	4604
		JMCFIE	CG		3227	51	4010	7601
		PMCHW	CG		2287	40	5304	7955
涂覆球 1	51 645	CFIE-JMCFIE	GMRES	BD	4888	10	331	5497
		CFIE-PMCHW	CG	BD	4014	23	24806	29100
		CFIE-PMCHW	CG		4009	21	4141	8426
涂覆球 2	315 054	CFIE-JMCFIE	GMRES	BD	18 698	112	6708	29691
		CFIE-PMCHW	CG		15 384	205	64902	85237
涂覆球 3	1117683	CFIE-JMCFIE	GMRES	BD	94758	467	38610	138568
		* FAFFA	GMRES	BD	94755	407	33711	134153

最后一个算例计算涂覆立方体的单站 RCS. 导体立

方体边长 $l = 5\lambda_0$, 周围均匀涂覆厚度为 $t = 0.1\lambda_0$, 相对

介电常数为 $\epsilon_r = 2.23 - 0.01j$ 的介质材料. 数值计算未知量个数为 96 426, 分别采用了 CFIE-PMCHW 和 CFIE-JMCFIE 方法, 利用继承迭代计算了 $\theta = 0 \sim 45^\circ$ HH 极化单站 RCS. 内存需求均为 1.1Gb, 计算时间分别 79.7hrs 和 9.8hrs. 由于求解线性方程迭代次数

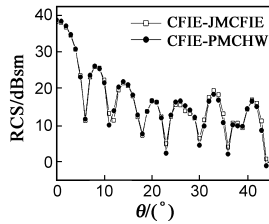


图 7 涂覆立方体单站 RCS

4 结论

求解导体介质复合目标电磁散射问题时, 建立 CFIE-JMCFIE 方程, 有效地改善生成阻抗矩阵的条件数, 迭代求解获得良好的收敛性能. 采用了 MLFMA 提高处理电大目标问题的能力, 并结合 BD 预条件技术以及 FAFFA 进一步提高计算效率. 对比传统 PMCHW 方法, 本文所采用积分方程在计算效率上有了明显的提高, 特别在计算目标单站问题时计算时间显著降低. 该方法可用于分析各类含介质目标电磁问题, 如涂覆目标、天线罩、有限微带结构问题等, 并可以结合并行技术实现更大目标的电磁问题分析.

参考文献:

- [1] Rao S M, Cha C C, Cravey R L, Wilkes D L. Electromagnetic scattering from arbitrary shaped conducting bodies coated with lossy materials of arbitrary thickness[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 1991, 39(5): 627 - 631.
- [2] Umashankar K R, Taflove A, Rao S M. Electromagnetic scattering by arbitrary shaped three-dimensional homogeneous lossy dielectric objects [J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 1986, 34(6): 758 - 766.
- [3] Schaubert D H, Wilton D R, Glisson A W. A tetrahedral modeling method for electromagnetic scattering by arbitrarily shaped inhomogeneous dielectric bodies[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 1984, 32(1): 77 - 85.
- [4] Sheng X Q, Jin J M, Song J M, Chew W C, Lu C C. Solution of combined-field integral equation using multilevel fast multipole algorithm for scattering by homogeneous bodies[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 1998, 46(11): 1718 - 1726.
- [5] Donepudi K C, Jin J M, Chew W C. A higher order multilevel fast multipole algorithm for scattering from mixed conducting/dielectric bodies[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 2003, 51(10): 2814 - 2821.
- [6] 姚海英. 介质以及涂敷介质结构电磁散射特性的基础研究 - 积分方程方法及其快速求解[D]. 成都, 电子科技大学博士学位论文, 2002.

- [7] Kolundzija B M, Sarkar T. Iterative solvers in frequency analysis of complex structures based on MoM solution of surface integral equations[A]. IEEE AP-S International Symposium[C]. Boston: IEEE, 2001. 588 - 591.
- [8] Pasi Y Q, Matti T. Application of combined field integral equation for electromagnetic scattering by dielectric and composite objects[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 2003, 53(3): 1168 - 1173.
- [9] Pasi Y Q, Matti T. Improving conditioning of electromagnetic surface integral equations using normalized field quantities[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 2007, 55(1): 178 - 185.
- [10] Song J M, Lu C C, Chew W C. Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects [J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 1997, 45(10): 1488 - 1498.
- [11] 聂在平, 胡俊, 姚海英, 王浩刚. 用于复杂目标三维矢量散射分析的快速多极子方法[J]. 电子学报, 1999, 27(6): 104 - 109.
Nie Zai-ping, Hu Jun, Yao Hai-ying, Wang Hao-gang. The fast multipole methods for vector analysis of scattering from 3-Dimensional objects with complex structure[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(6): 104 - 109. (in Chinese)
- [12] Geng N, Sullivan A, Carin L. Fast multipole method for scattering from an arbitrary PEC target above or buried in a lossy half space[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 2001, 49(5): 740 - 748.
- [13] Lee J, Zhang J, Lu C C. Incomplete LU preconditioner for large scale dense complex linear systems from electromagnetic wave scattering problems[J]. J Comput Phys, 2003, 185(1): 158 - 175.
- [14] Sertel K, Volakis J L. Incomplete LU preconditioner for FMM implementation[J]. Microw Opt Technol Lett, 2000, 26(4): 265 - 267.
- [15] Lee J, Zhang J, Lu C C. Sparse inverse preconditioning of multilevel fast multipole algorithm for hybrid integral equations in electromagnetics[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 2004, 52(9): 2277 - 2286.
- [16] Chew W C, Cui T J, Song J M. A FAFFA-MLFMA algorithm for electromagnetic scattering[J]. IEEE Trans Antennas and Propagat, 2002, 50(11): 1641 - 1649.

作者简介:

阙肖峰 男, 1977 年生于重庆市, 电子科技大学电磁场与微波技术专业在职博士研究生. 主要研究方向为计算电磁学、天线分析与设计等. E-mail: quexiaofeng@163.com

聂在平 男, 1946 年生于四川, 电子科技大学教授, 博士生导师. 获 2002 年国家科技进步二等奖一项、省部级一、二、三等奖七项, 在国内外发表学术论文 350 余篇, 著译 60 余万字. 主要研究方向包括计算电磁学、电磁散射与逆散射、非均匀介质中的场与波、新一代移动通信中的多天线技术等. E-mail: zpnie@uestc.edu.cn