第 27 卷第 6 期　　国 防 科 技 大 学 学 报 JOURNAL OF NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY　　Vol.27 No.6 2005

文章编号:1001－2486(2005)06－0082－06

结合多层快速多极和 ILUT 预处理算法分析复杂目标的电磁特性*

董　健,柴舜连,毛钧杰

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙　410073)

摘　要:分层快速多极算法(MLFMM)和 ILUT 预处理算法被结合来分析电大尺寸目标的电磁散射和辐射特性。采用矩量法求解电磁场积分方程,最终须要求解一线性方程组。分层快速多极算法被用来加速用迭代法求解线性方程组时的矩阵向量乘积的运算。ILUT 预处理算法被用来降低方程组系数矩阵的条件数,加快迭代法的收敛速度。计算实例表明了该方法的通用性和高效性。

关键词:积分方程;矩量法(MOM);分层快速多极算法(MLFMM);ILUT 预处理

中图分类号:TB331.03　　文献标识码:A

Combining MLFMM and ILUT Preconditioner for Analysing Electromagnetism Characteristic of the Large Complex Target

DONG Jian, CHAI Shun-lian, MAO Jun-jie

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Electromagnetism characteristics of large complex target are analysed by combining multilevel fast multipole method and ILUT preconditioner. We must solve a linear system when solving electromagnetic integral equation by moment method. Multilevel fast multipole method is used to fast calculate the matrix-vector product when we solve the linear system by iterative method. ILUT preconditioner is used to reduce the prove condition number on the linear system and speed up the convergence iterative method. Numerical experiments show the robustness of our method.

Key words: integral equation; moment method; MLFMM; ILUT preconditioner

边界积分方程(BIE)结合矩量法(MOM)用以分析理想导体目标的电磁散射和辐射问题在近二十年来取得了很大的发展[1~3]。用矩量法求解积分方程,最后要求解一复系数稠密线性方程组。如采用直接方法(如高斯消元法,LU 分解法)计算,其存储量和计算量分别为 $O(N^2)$与 $O(N^3)$。采用迭代法求解线性方程组,可减少计算量,但其所需存储量和计算量依然很大,均为 $O(N^2)$量级。

20 世纪 90 年代以来,快速多极方法(FMM)[4]被广泛应用于电磁场积分方程求解过程中。作为 20 世纪十大算法发明之一[5],其多层快速算法(MLFMM)可以把迭代法中的矩阵向量乘积运算降为 $O(N\log N)$,进而整个求解过程的计算量降为 $O(N^{iter}N\log N)$,存储量需求亦降为 $O(N\log N)$,N^{iter}为迭代法收敛需要的迭代次数。对于复杂目标的散射和辐射问题,离散电磁场边界积分方程后得到的线性方程组通常是病态或近似病态的,即其系数矩阵的条件数很大,这将导致迭代算法的收敛速度很慢,甚至不能收敛到准确的结果,可通过预处理方法来提高迭代算法的收敛速度。本文改进了 ILUT 预处理算法,使用 MLFMM 的近场矩阵做原始矩阵,通过动态的填充和丢弃方法来产生与原矩阵有着相同存储量,但具有不同稀疏格式的 L 矩阵和 U 矩阵。这一预处理算法经验证,在处理电磁散射和辐射问题中非常有效。对很多类型的问题,包括一些强病态问题,都可以使迭代算法在较少的迭代次数内收敛。最后,对电大尺寸金属散射体和喇叭天线的电磁特性计算验证了本文方法的有效性和准确性。

1　电磁场积分方程

考虑自由空间中一理想导体(PEC)目标。其所占区域为 D,Γ 表示其外表面,$\boldsymbol{n}$ 表示其表面的外法

* 收稿日期:2004－12－10
作者简介:董健(1978—),男,博士生。

向矢量。$E = E^{sca} + E^{inc}$表示空间中的总场,E^{sca}和E^{inc}分别表示空间中的散射场和入射场。可以通过求解电场积分方程(EFIE)或磁场积分方程(MFIE)来得到这一问题的解。

EFIE:$\forall y \in \Gamma$,

$$(\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{E}^{inc})(y) = -\mathrm{j}\omega\mu_0\left[\int_\Gamma G(x-y)\boldsymbol{J}(x)\mathrm{d}s(x)\right] \times \boldsymbol{n}(y) + \frac{-\mathrm{j}}{\omega\varepsilon_0}\left\{\int_\Gamma [\nabla_y G(x-y)\nabla_\Gamma \cdot \boldsymbol{J}(x)\mathrm{d}s(x)] \times \boldsymbol{n}(y)\right\} \tag{1}$$

MFIE:$\forall y \in \Gamma$,

$$(\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{H}^{inc})(y) = \frac{\boldsymbol{J}(y)}{2} + \boldsymbol{n}(y) \times \int_\Gamma [\nabla_x G(x-y) \times \boldsymbol{J}(x)\mathrm{d}s(x)] \tag{2}$$

为消除内部谐振问题,并加快迭代求解过程的收敛速度,可以使用 EFIE 和 MFIE 的线性组合,即 $CFIE$:

$$CFIE = \alpha EFIE + (1-\alpha)\frac{-\mathrm{j}}{\mathrm{k}}MFIE \tag{3}$$

在上面的三种积分方程中,因边界条件限制,$EFIE$ 可用来分析具有开放导体面和闭合导体面的问题,$MFIE$ 和 $CFIE$ 只能用来分析具有闭合导体面的问题。

矩量法求解积分方程,首先要把散射体的表面电流用基函数展开,这里我们选择了定义在三角型对上的 RWG 函数作为基函数。这就要求把目标表面作三角形网格剖分。RWG 函数与网格中的每一连接两三角形的内部边相对应[2]。采用 Galerkin 方法,即选取与基函数相同的检验函数与离散化以后的方程作内积,可以得到矩阵方程:

$$\boldsymbol{Z}^q \boldsymbol{I} = \boldsymbol{V}^q \tag{4}$$

其中,$q = EFIE, MFIE, CFIE$,表示积分方程类型,$\boldsymbol{I} = \{I_n\}$为待求量,表示三角形网格中每一边上的离散电流值。可以看到,所得到的线性方程组的系数矩阵为复系数稠密矩阵,其中 Z^{EFIE}为对称矩阵,Z^{MFIE}和 Z^{CFIE}为非对称矩阵。求解这一线性方程组,即可得到目标表面电流,进而可以计算远场、RCS 等电磁参数。

2 分层快速多极算法

矩量法离散积分方程得到了一复系数稠密线性方程组。其系数矩阵的存储量需求为 $O(N^2)$量级,N 为表面电流未知量个数。可采用迭代法求解。在迭代法中,矩阵向量乘积构成了计算量的主要来源。目前,对于复系数非 Hermitan 线性方程组,Krylov 子空间算法是最为有效的一类迭代算法,包括双共轭梯度法(BICG)、无转置最小残差法(TFQMR)、广义最小残差余量法(GMRES)、稳定双共轭梯度法(BICGSTAB)等[6]。

快速多级算法(FMM)是美国耶鲁大学数学家 V. Rolhlin、Greengard 等人在 20 世纪 80 年代末期提出的一种用以快速计算多个点源的场的算法[7,8]。这一算法可被用来加速用迭代法求解积分方程时的矩阵向量乘积的运算。其主要基于空间分组的思想,并利用了积分方程的积分核,即格林函数的可分离性特点。矩量法离散积分方程得到的系数矩阵与待求电流向量的乘积可认为是计算由 N 个源点产生的场在 N 个场点的值。直接计算 N 个场点的值需要 $O(N^2)$的计算量。通过把场点和源点进行空间分组,把场源点之间的作用转化为组与组之间的作用,可把计算量降为 $O(N^{1.5})$。把空间多层分组,采用层叠算法,可把计算量进一步降为 $O(N\log N)$。

对于所要计算的电磁散射问题,应用 FMM 主要基于下面的公式:

$$\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k|\boldsymbol{P}+\boldsymbol{M}|}}{|\boldsymbol{P}+\boldsymbol{M}|} = -\mathrm{j}k\lim_{l\to\infty}\int_{S^2}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k(\boldsymbol{s},\boldsymbol{M})}T_{l,P}(\boldsymbol{s})\mathrm{d}s \quad \boldsymbol{P},\boldsymbol{M}\in R^3 \tag{5}$$

其中,$T_{l,p}(s)$为定义在单位球面 S^2 上的转移函数:

$$T_{L,P}(\boldsymbol{s}) = \sum_{m=0}^{L}\frac{(2m+1)(-\mathrm{j})^m}{4\pi}h_m^{(1)}(k|\boldsymbol{P}|)P_m[\cos(\boldsymbol{s},\boldsymbol{P})] \tag{6}$$

其中，$h_m^{(1)}$ 为第一类球汉克尔函数，P_m 为勒让德多项式，$<\cdot,\cdot>$ 为标量积，L 为截断系数。

把式(5)中的球面积分离散化，即选取定义在单位球面上的单位方向矢量 S_P 和相应的积分权值 ω_P，并考虑空间中相隔较远的两球形区域 S_1 和 S_2，其中心和半径分别为 $\boldsymbol{C}_1$、$\boldsymbol{C}_2$ 和 R_1、R_2。对与 S_1 中任意一点 $\boldsymbol{x}_1$ 和 S_2 中任意一点 $\boldsymbol{x}_2$，定义：$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{C}_1-\boldsymbol{C}_2$，$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{x}_1-\boldsymbol{C}_1+\boldsymbol{C}_2-\boldsymbol{x}_2$，则有：$\boldsymbol{x}_1-\boldsymbol{x}_2=\boldsymbol{P}+\boldsymbol{M}$，代入(5)式可得到：

$$\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k|x_1-x_2|}}{|\boldsymbol{x}_1-\boldsymbol{x}_2|}\approx-\mathrm{j}k\sum_P\omega_P\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k<s_P,x_1-C_1>}T_{L,P}(\boldsymbol{S_P})\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k<s_P,x_2-C_2>}\tag{7}$$

可以看到，对于任意的场点 x_1 属于 S_1 和任意的源点 x_2 属于 S_2 均成立。$T_{L,C_1-C_2}(\boldsymbol{s_P})$ 与具体的场、源点的位置无关，只与场、源点所在区域有关。

注意(7)式中的'$\approx$'号。有两处会引起计算误差：一处是在计算 $T_{l,p}(s)$ 时，需要把无限项求和转换为了有限项，截断系数为 L；另一处是球面积分的计算，采用了数值积分，这会导致计算误差。所以快速多级算法是一种近似的算法，在计算过程中会引入误差。可以通过选取截断系数 L 和球面积分点的数目来控制这一误差。一般地，$L=kd+c\ln(\pi+kd)$，其中，d 为空间分区后的最大分区尺寸，$c=-\lg(\varepsilon)$，ε 为计算精度。比如，当计算精度要求为 0.001 时，$c=3$。球面积分点一般选取 $2L^2$ 个。

用矩量法求解 CFIE，得到的线性方程组的系数矩阵元素可表示为：

$$\begin{aligned}Z_{mn}^{CFIE}=\alpha\int_{\Gamma\times\Gamma}G(x-y)\left[\boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{x})\cdot\boldsymbol{J}_n(y)-\frac{1}{k^2}\nabla_\Gamma\cdot\boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{x})\nabla_\Gamma\cdot\boldsymbol{J}_n(y)\right]\mathrm{d}\Gamma(y)\mathrm{d}\Gamma(x)+(1-\alpha)\frac{-\mathrm{j}}{k}\cdot\\ \frac{1}{2}\int_\Gamma\boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{x})\cdot\boldsymbol{J}_n(\boldsymbol{x})\mathrm{d}\Gamma(\boldsymbol{x})+(1-\alpha)\frac{-\mathrm{j}}{k}\int_\Gamma\boldsymbol{J}_m(\boldsymbol{x})\cdot\boldsymbol{n}(\boldsymbol{x})\times\int_\Gamma\nabla_xG(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y})\times\boldsymbol{J}_n(y)\mathrm{d}\Gamma(y)\mathrm{d}\Gamma(x)\end{aligned}\tag{8}$$

快速多极算法只应用于场点和源点不重合的情况，也即检验函数和展开函数定义在不同的三角形对上。在此情况下，(8)式中等号右边求和式中的第二项为 0。把(7)式代入(8)式中，有：

$$Z_{mn}^{CFIE}\approx-\mathrm{j}k\sum_P\omega_PR_m(\boldsymbol{s^p})\cdot T_{L,C_1-C_8}(\boldsymbol{s^p})F_n(\boldsymbol{s^p})\tag{9}$$

其中，$F_n(\boldsymbol{s^p})$ 和 $R_m(\boldsymbol{s^p})$ 定义为：

$$\begin{cases}F_n(\boldsymbol{s^p})=\boldsymbol{s^p}\int_{\Gamma(y)}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k<s^p,C_r-y>}J_n(\boldsymbol{y})\mathrm{d}\Gamma(\boldsymbol{y})\times\boldsymbol{s^p}\\ R_m(\boldsymbol{s^p})=\alpha\boldsymbol{s^p}\int_{\Gamma(\boldsymbol{x})}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k<s^p,\boldsymbol{x}-C_t>}J_m(\boldsymbol{x})\mathrm{d}\Gamma(\boldsymbol{x})\times\boldsymbol{s^p}+(1-\alpha)\int_{\Gamma(\boldsymbol{x})}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k<s^p,\boldsymbol{x}-C_t>}J_m(x)\times n(\boldsymbol{x})\mathrm{d}\Gamma(\boldsymbol{x})\times\boldsymbol{s^p}\end{cases}\tag{10}$$

注意，(10)式中的积分为单重面积分。因为基函数和检验函数的局部性质(定义在相邻的三角形对上)，可以使用数值积分方法来计算。与(8)式相比，(10)式分离了积分中的 x、y 分量，使本来需要计算的双重面积分转换为了可分别计算的单重面积分。而且，(9)式只能应用于 x、y 相隔较远的情况下。当 x、y 距离很近时，需要用(8)式计算系数矩阵的值。

要应用快速多极算法实现快速矩阵向量乘积的运算，仅仅应用(9)式的近似表达还不够。在(9)式中除了要计算三角形上的面积分外，还要计算单位球面上的积分。快速多极算法之所以可实现快速矩阵向量乘积运算，其原因在于空间中相互距离很近的一组基函数到一组检验函数所在区域的场可以用同一个转移函数来表示，为了应用这一性质，首先需要把待求解问题进行空间分组，即把基函数和检验函数进行空间分组。

原线性方程组的系数矩阵 Z 可表示为近场矩阵和远场矩阵的和，$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{Z}^{near}+\boldsymbol{Z}^{far}$。则矩阵向量乘积运算：$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{ZI}=\boldsymbol{Z}^{near}\boldsymbol{I}+\boldsymbol{Z}^{far}\boldsymbol{I}=\boldsymbol{V}^{near}+\boldsymbol{V}^{far}$。快速多极算法可用于加速计算 $\boldsymbol{V}^{far}=\boldsymbol{Z}^{far}\boldsymbol{I}$。其计算过程可分为 3 步：

(1)计算每一分组 P_r 中的函数 $F_r(\boldsymbol{s}^p)$：

$$F_r(\boldsymbol{s^p})=\sum_{x_n\in P_r}I_n\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k<s_p,C_r-x_n>}\tag{11}$$

(2)计算分组 P_r 的远场组对 P_r 的影响：

$$G_r(s_p) = \sum_{P_t farfrom P_r} F_t(s_p) T_{L, C_r - C_t}(s_p) \tag{12}$$

(3)计算 $V_m^{far} \in P_r$:

$$V_m^{far} = -jk \sum_{s_p} \omega_P G_r(s_p) e^{-jk < s_p, x_m - C_p >} \tag{13}$$

可以通过空间分层分组的方法把快速多极算法的计算量和存储量降为 $O(N\log N)$。从上面的分析中可看到,快速多极算法中,需要计算量最大的部分为转移函数的计算(式(12))。对于单层快速多极算法,当空间分组尺寸减少,分组数目增大时,式(12)的计算量增长得非常快。这限制了 FMM 应用于很大的计算问题中。而分层快速多极算法可有效地解决这一问题,就像快速傅立叶变换(FFT),MLFMM 通过把计算区域分层分组,利用层间递推的思想来减少转移函数的计算量。分层快速多极算法(MLFMM)的基本步骤与快速多极算法(FMM)一样,但多了层与层之间的插值和滤波运算。这是因为各层分组的尺寸不同,其球面积分点的数目也不同。这一运算是高效实现 MLFMM 的关键。有很多方案可以选择,比如 Lagrange 插值($O(N)$),基于 FFT 的谱域插值($O(N^{1.5})$),一维 FMM - FFT 插值 $O(N\log N)$,稀松插值 $O(N)$等[9]。我们采用的是一种改进的基于 FFT 的谱域插值算法,其计算量为 $O(N\log N)$,这将导致整个算法的计算量为 $O(N\log^2 N)$,存储量为 $O(N\log N)$。

3　ILUT 预处理算法

对于前面提到的三种积分方程,EFIE 属于第一类弗雷得霍姆积分方程,其离散化后得到的线性方程组的系数矩阵是病态矩阵,即条件数比较大。这将导致迭代算法的收敛速度很慢,甚至得不到准确的结果。可通过预处理方法来解决这一问题。预处理方法,就是通过一个预处理矩阵把原来求解线性方程组问题 $\boldsymbol{ZI} = \boldsymbol{V}$ 转换为另一个等效问题 $\boldsymbol{MZI} = \boldsymbol{MV}$。其中预处理矩阵 $\boldsymbol{M}$ 为 n 阶非奇异性矩阵。这一转换过程的目的是使新线性方程组问题的系数矩阵 $\boldsymbol{MZ}$ 的条件数远小于原线性方程组的条件数。这将使迭代法的收敛速度加快,迭代次数 N^{iter} 明显减小,从而提高整个程序的计算速度。

现有的预处理算法主要有主对角、快对角、ILU(0)分解、ILU(n)分解、ILUT、SPAI 等方法[6,10,11]。对于要分析的复杂电磁问题,一些简单的预处理算法,如块对角、ILU(0)等,在求解大规模强病态矩阵时,迭代的收敛速度非常慢或不能收敛。ILU(n)算法通过增加预处理阵 $\boldsymbol{M}$ 的元素个数来提高其有效性,这需要较大的存储量。通过使用 ILUT 预处理算法,预处理矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的存储量与 MLFMM 的近场矩阵 $\boldsymbol{Z}^{near}$ 相同,可在不增加存储量需求量级的情况下有效地提高计算的收敛速度。$\boldsymbol{M}$ 通过对近场矩阵 $\boldsymbol{Z}^{near}$ 做 ILU 分解来得到,在分解过程中,通过两个参数 τ、p 来控制动态的填充和丢弃策略。τ 可用来控制计算量的需求,p 可用来控制存储量的需求。具体的算法描述可参看 Y. Saad 的专著[6]。在算法实现中,我们改进了文献[6]中的 ILUT 算法,采用了二叉搜索树来快速查找和保留 ILU 分解后 $\boldsymbol{L}$ 和 $\boldsymbol{U}$ 矩阵中最大的 p 个元素,这里 p 表示 $\boldsymbol{L}$、$\boldsymbol{U}$ 矩阵每行中允许的最大元素个数,这样处理一方面可控制 M 的最大存储需求,另一方面可大大地提高 $\boldsymbol{M}$ 的计算速度。预条件矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的存储需求为 $2 \times p \times N$。

4　数值实现

因为 RWG 基函数时建立在三角形网格的基础之上的,数值模拟的第一步,就是建立目标的计算机模型,并对模型进行三角形网格剖分。这可以通过一些完善的 CAD、CAE 软件来实现。这些软件一般都可以对目标模型进行三角形网格剖分,并可以生成相应的网格数据文件供计算程序使用。网格数据文件一般包括了网格的节点表,存储了节点编号和坐标;单元表,存储了单元编号和组成单元的节点编号。通过这两个表,采用一定的排序和检索算法,可以得到计算所需的所有其它数据结构,包括边表、基函数表、面元连接表等;对于封闭导体面,还要构造其外法向量表,即使面元的法向量均指向模型外部。

在计算近场矩阵 Z^{near} 矩阵单元时,会遇到积分的奇异性问题。对于 EFIE 和 MFIE 积分的奇异项和近似奇异项,可以通过奇异项提取的方法处理[2,12,13],对于非奇异项积分,可用定义在三角面元上的数值积分方法计算[13]。

实现快速多极算法，首先要进行空间的多层分区，即把计算区域用立方体分层包围起来。可以使用八叉树数据结构来描述这一分区方法[14]。八叉树中的各个节点与空间分区的各立方体相对应，每一叶子节点对应空间分区中各最小立方体。MLFMM 计算中需要的各层节点间的遍历可通过对节点相应键值的移位运算得到。

在实现中，使用了无转置最小残差法(TFQMR)[6]作为求解矩阵方程的迭代算法，计算结果表明，通过和 ILUT 预处理算法结合，这一算法可以较快地达到收敛精度。

5 计算结果

下面给出我们开发的基于 MLFMM 和 ILUT 预处理算法的电磁计算代码的一些计算结果。其中，目标模型由通用建模软件 AutoCAD 建立，网格通过网格剖分软件 GID 与 FEMAP 产生。

图 2 为直径为 2m 的导体球在 2GHz 的平面波照射下的双站 RCS。其中未知量 $N=226\ 584$，使用了 CFIE、7 层 MLFMM、主对角预处理算法。TFQMR 迭代算法迭代 28 次收敛，收敛误差为 0.001。

为了验证各种电磁计算代码的准确性和通用性，美国国家航空航天局(NASA)给出了一些标准的低散射截面目标的设计尺寸和 RCS 的测量结果[15]。其中杏仁体是应用最广的一个标准验证目标。图 2 为长度为 9.936inch 的 NASA 杏仁体在 9.92GHz 的平面波照射下的单站 VV 极化 RCS 的 MLFMM 计算结果和测量结果。其中未知量 $N=9333$，使用了 CFIE、7 层 MLFMM、ILUT 预处理算法和 TFQMR 迭代算法。每一个单站角度约迭代 30 次，迭代误差 0.001，计算时间约为 5min。

图 3 给出了长度为 17m 的 F117 飞机模型在 400MHz 的平面波照射下的表面电流，显示的是实部绝对值。其中，未知量 $N=65\ 136$，使用了 CFIE、8 层 MLFMM、ILUT 预处理、TFQMR 迭代算法。入射波与水平方向成 30°角向下入射。极化为 θ 方向。计算时共迭代 16 次，迭代残差为 0.001，计算时间小于 1h。

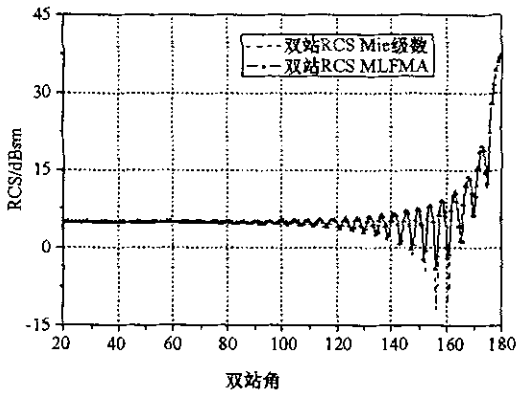

图 1 导体球在 2GHz 的双站 RCS 和电流分布

Fig.1 Bistatic RCS and currents distribution of conductor sphere at 2GHz

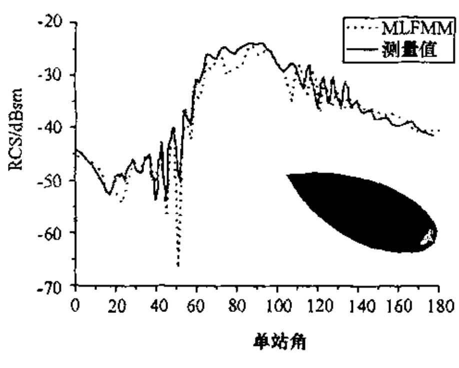

图 2 杏仁体(Almond)的单站 RCS，VV 极化

Fig.2 Monostatic RCS of almond，VV polarzation

图 4、5 分别为 10.1GHz 时，某扇形喇叭天线的表面电流分布，E 面和 H 面的方向图。喇叭尺寸 $a=2.286$，$b=1.016$，$A=12.37$，$B=9.195$，$L=25.6$，单位为 cm[16]。其中，未知量 $N=25\ 356$，使用了 EFIE、6 层 MLFMM、ILUT 预处理算法。TFQMR 迭代算法迭代 26 次收敛，收敛误差为 0.001。整个计算时间约为 0.5h。

6 结 论

通过结合 MLFMM 和 ILUT 预处理算法，可以对电大尺寸复杂目标的电磁散射和辐射特性进行快速准确的计算。数值结果表明，ILUT 预处理算法可有效地解决线性方程组系数矩阵的病态问题，提高迭代算法的收敛速度。我们开发的基于 MLFMM 和 ILUT 预处理算法的电磁计算代码，可以方便地与通用建模和网格剖分软件接口，用以快速分析复杂导体目标的电磁特性。数值计算结果验证了我们的电磁

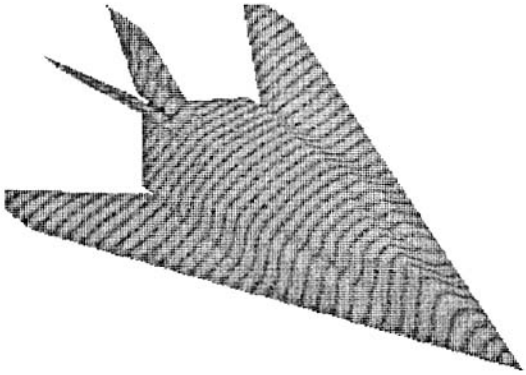

图 3 长 17m 的 F117 飞机模型在 400MHz 的表面电流

Fig.3 Currents distribution of 17 meters long F117 aircraft model at 400MHz

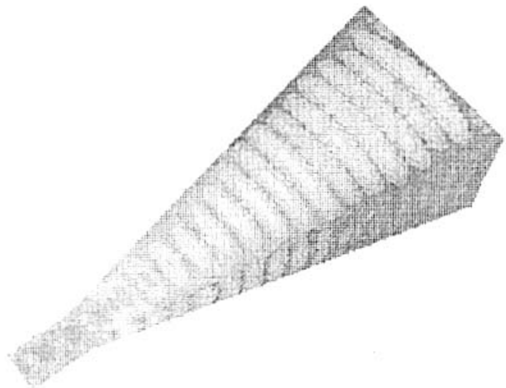

图 4 10.1GHz 时喇叭天线的表面电流分布

Fig.4 Currents distribution of horn antenna at 10.1GHz

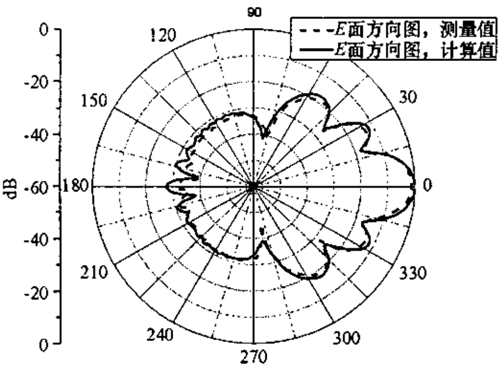

图 5(a) 10.1GHz 时，扇形喇叭天线 *E* 面方向图

Fig.5(a) E-face radiation pattern of horn antenna at 10.1GHz

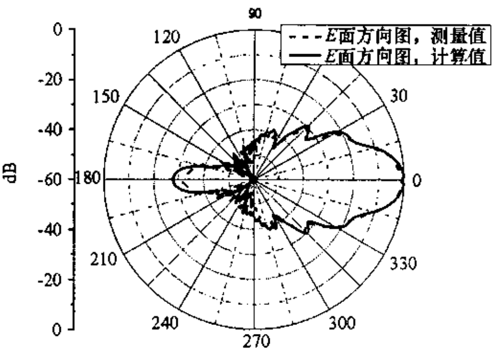

图 5(b) 10.1GHz 时，扇形喇叭天线 *H* 面方向图

Fig.5(b) H-face radiation pattern of horn antenna at 10.1GHz

计算代码的准确性和通用性。

参 考 文 献：

[1] Harrington R F. Field Computation by Method of Moment[M]. IEEE Press, 1992.

[2] Rao S M, Wilton D R, Glisson A W. Electromagnetic Scattering by Surface of Arbitrary Shape[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1982, 30,(5):409-418.

[3] Makarov S. Mom Antenna Simulations with Matlab: RWG Basic Functions[J]. IEEE Antenna & Propagation Mag., 2001, 43(10):100-107.

[4] Chew W C, Jin J M, Midielssen E M. Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics[M]. Boston: Artech House, 2001.

[5] Dongarra J J, Sullivan F. The Top 10 Algorithms in 20th Century[J]. IEEE Computing in Science and Engineering, 2000, (2):22-23.

[6] Saad Y. Iterative Methods for Sparse Linear Systems[M]. Boston: PWS Publishing Company, 1996.

[7] Rokhlin V. Rapid Solution of Integral Equations of Scattering Theory in Two Dimensions[J]. J.Comput. Phys., 1990, 86(2):414-439.

[8] Coifman R, Rokhlin V, Wandzura S. The Fast Multipole Method for the Wave Equation: A Pedestrian Prescription[J]. IEEE Antenna Propagat. Mag., 1993, 35(3):7-12.

[9] Darve E. The Fast Multipole Method: Numerical Implementation[J]. J. Comput. Phys., 2000,160:195-240.

[10] Saad Y. ILUT: A Dual Threshold Incomplete LU Factorization[J]. Mumer. Linear Algebra Appl., 1994, 1:387-402.

[11] Benzi M, Tuma M. A Sparse Approximate Inverse Preconditoner for Nonsymmetric Linear Systems[J]. SIAM J. Sci. Comput., 1998, 19(3):968-994.

[12] Wilton D R, Rao S M, Glisson A W. Potential Integrals for Uniform and Linear Source Distributions on Polygonal and Polyhedral Domains[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagat, 1984, 32(3):276-281.

[13] Graglia R D. On the Numerical Integration of the Linear Shape Functions Times the 3D Green's Function or its Gradient on a Plane Triangle[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagat, 1993, 41(10):1448-1455.

[14] Samet H. The Design and Analysis of Spatial Data Structures[M]. New York: Addison-Wesley, 1994.

[15] Woo A C, Wang H T G, Schuh M J, et al. Benchmark Radar Targets for the Validation of Computational Electromagnetics Programs[J]. IEEE Antennas and Prop. Mag., 1993, 35(1):84-89.

[16] Tirkas P A, Balanis C A. FDTD Method for Antenna Radiation[J]. IEEE Trans. Antennas and Prop., 1992, 40(3):334-340.