

电大尺寸天线罩电磁特性高效数值仿真技术

于冰洋, 阙肖峰, 聂在平

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 针对电大尺寸天线罩电磁特性, 分析研究了快速求解表面积分方程的多层快速多极子算法及其改进技术。构造了具有良好矩阵性态的积分方程形式, 提出加速迭代求解的并行预条件技术, 利用分组稀疏化方式构造预条件矩阵, 显著降低了迭代求解次数。采用快速球谐展开技术对聚合和配置因子项进行压缩, 将其存储量降低了 2/3。通过数值算例验证了方法的精确性和高效性, 并实现了大型带罩阵列天线辐射特性的仿真分析。

关键词: 天线罩; 电磁辐射; 多层快速多极子算法; 预条件; 球谐展开

中图分类号: O 441.4

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.06.005

High Efficiency Numerical Simulation Technology for Electromagnetic Characteristics of Electrically Large Radome

YU Bingyang, QUE Xiaofeng, NIE Zaiping

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the analysis of electromagnetic characteristics of electrically large radome, the multilevel fast multipole algorithm (MLFMA) and its improved technology for the fast solution of surface integral equation are studied. The integral equation form with good matrix properties is constructed, and the parallel preconditioning technology to accelerate iterative solution is proposed, and the preconditioning matrix is constructed by grouping sparse method, which significantly reduces the number of iterations. Fast spherical harmonic expansion technique is applied to compress the aggregation and disaggregation items, which reduces the storage by 2/3 of this part. Numerical examples are used to verify the accuracy and efficiency of the method, and the simulation analysis of the radiation characteristics of the large array antenna with hood is realized.

Key words: radome; electromagnetic radiation; multilevel fast multipole algorithm (MLFMA); preconditioner; spherical harmonics expansion

0 引言

天线罩是用于保护天线免受外部环境影响的—类设备,在雷达系统中应用广泛。随着电子技术的发展,天线罩作为雷达天线的电磁窗口,其电性能显得尤为重要,已经成为雷达天线的一部分^[1]。在天线罩的设计过程中,准确、高效的电磁建模与仿真手段发挥着重要作用。目前,对天线罩的仿真计算方法主要有高频近似法和全波数值法两类^[2-6]。

高频法包括了物理光学法(PO)、弹跳射线法(SBR)等,其物理概念清晰,计算速度快。但是由于高频法是基于局部场近似原理,没有考虑天线罩各部分之间的电磁耦合关系,以及难以准确分析非平滑结构和复杂介质问题,在实际应用中会带来较大的误差。全波数值法包括了广泛采用的矩量法(MoM)、有限元法(FEM)和时域有限差分法(FDTD)等,这些方法考虑了全局电磁耦合关系,计算精度高,但

收稿日期:2019-05-10; 修回日期:2019-12-23

基金项目:国家自然科学基金(61490695);上海航天科技创新基金(SAST2016058)

作者简介:于冰洋(1995—),女,硕士,主要研究方向为天线理论与设计、电磁材料建模。

通信作者:阙肖峰(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向为计算电磁学、天线理论与设计。

是计算复杂度高且计算效率低,很长时间以来只能用于小尺寸天线罩的分析。为了确保计算精度的前提下提高计算效率和计算能力,必须采用正确的电磁理论模型和高效的计算方法。

本文首先采用基于表面积分方程(SIE)的并行多层快速多极子算法(MLFMA),对电大尺寸天线罩的电磁特性进行仿真。相较于基于介质体模型和体网格剖分的数值算法^[7],SIE仅需要在不同媒质的分界面上离散网格和构造基函数,极大地减少了数值计算量。然后提出了改进迭代求解效率的JMCIE表面积分方程和稀疏近似逆(SAI)预条件技术,并引入快速球谐展开(SE)技术,减少内存需求。数值算例验证了本文提出方法的正确性,以及在计算效率和计算资源需求方面的较大优势。最后,对大型阵列天线-天线罩辐射问题开展了一体化建模仿真,在单台小型服务器上完成上百电磁波长尺度天线罩问题的快速计算。

1 基本理论

1.1 天线罩问题的表面积分方程

天线罩电特性仿真实质上是求解导体-介质复合结构的电磁问题。导体和任意介质结构组合示意图如图1所示。其中,导体包括闭合导体(如实体器件)和开放导体(如天线、频选等)结构。图中 $D_i, \dots, D_q$ 表示不同媒质区域, D_0 表示背景媒质区域, S_j 表示 D_j 的表面, S_{ji} 表示 D_j 和 D_i 分界面。阴影区 D_q, D_p 表示闭合导体区域, D_l 表示开放导体区域。

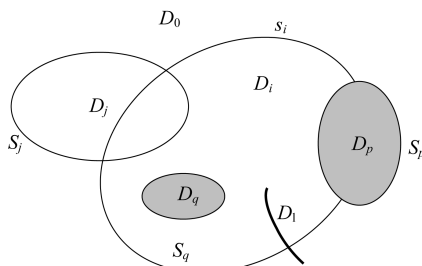


图1 任意导体、介质体组合的几何示意

Fig.1 Geometric sketch of any combination of conductors and dielectric bodies

根据等效原理建立开放导体表面的电场积分方程(EFIE)、闭合导体表面的混合场积分方程(CFIE),以及各介质区域内表面的EFIE和MFIE。

为改进矩阵方程性态,将介质表面的EFIE和MFIE构造为JMCIE:首先建立介质表面两侧的电场混合场积分方程(JCFIE)

$$\alpha E_j + \beta Z_0 \mathbf{n}_j \times \mathbf{M}_j \quad (1)$$

和磁流混合场积分方程(MCFIE)^[8]

$$\alpha Z_0 \mathbf{M}_j - \beta \mathbf{n}_j \times \mathbf{E}_j \quad (2)$$

式中: α 和 β 为比例因子, $\alpha=0\sim 1, \beta=1-\alpha$;下标 j 为第 j 个媒质空间。

将两侧的方程组合得到该分界面的JMCIE。当 $\alpha=1$ 时,则退化为广泛采用的PMCHW方程。

通过以上处理,可以建立含罩天线系统电特性分析时的EFIE-CFIE-JMCIE矩阵方程形式。通过适当选择比例因子,利用伽略金方法得到矩阵方程为

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (3)$$

由于阻抗矩阵具有良好的条件数,方程迭代求解效率高。

为实现电大尺寸天线罩的快速求解,本文采用了并行MLFMA对矩阵方程加速计算^[9]。MLFMA利用几何分组,将子散射体(基函数)之间耦合关系分为近区和远区关系。近区组内子散射体的耦合通过严格的MoM直接计算;远区组内的子散射体耦合关系则利用加法定理将格林函数在谱域内进行展开,采用聚合—转移—配置过程实现。MLFMA的计算和存储复杂度由传统MoM的 $O(N^2)\sim O(N^3)$ 量级降低为 $O(N \log N)$ 量级,其中 N 为数值计算未知量数。

1.2 稀疏近似逆预条件技术

对矩阵方程进行预条件处理,可以提高迭代求解收敛速度。传统构造稀疏近似逆(SAI)预条件矩阵 $\mathbf{M}$ 时,需要对矩阵逐列构造,即需要求解 N 个最小二范数问题,这对于电大尺寸问题而言计算量极大^[10]。而分析介质问题时,分界面上将同时定义等效电流和磁流未知量,进一步加大了计算复杂度。本文提出了基于几何分组信息的SAI预条件技术,具体步骤如下:

步骤1 确定预条件矩阵的稀疏化模式。本文采用MLFMA框架下的附近组矩阵相同的矩阵分布。

步骤2 获取用于构造SAI矩阵的阻抗矩阵元素。首先,得到与之相关的附近组及其附近组的附

近组所包含的矩阵元素,然后,利用近场耦合强弱关系和设定阈值对矩阵元素进行稀疏化。

步骤 3 完成每个分组内基函数对应的最小二范数运算:

$$\min \|I - MA\|_F^2 = \min \|I - M\bar{A}\|_F^2 = \sum_j^{N_g} \min \|e_j - m_j Z\|_2^2 \quad (4)$$

式中: I 、 e_j 分别为全局单位矩阵和分组单位矩阵; $\bar{A}$ 为全局阻抗矩阵 A 的稀疏化模式; m_j 为 M 中第 j 组基函数对应的子矩阵; $\|\cdot\|_F$ 为矩阵的 Frobenius 范数。

步骤 4 合并所有组元素得到预条件矩阵。

该方法的优点是: 1) 按分组方式生成预条件矩阵会极大减少最小二范数的计算次数; 2) 非常容易按组实现并行化。

1.3 球谐展开多层快速多极子算法

MLFMA 通过将散射源对场点的作用分解为一系列平面波的传播行为, 实现了远区作用的快速计算和降低存储, 但是需要存储角谱空间中各基函数的聚合、配置因子。介质问题中基函数个数多, 导致角谱的存储量急剧增加, 本文引入一类基于谱域球谐展开的多层快速多极子算法 (SE-MLFMA)^[11] 来减少内存占用。该方法首先将 MLFMA 展开项分为两部分: 聚合转移因子和配置因子; 然后分别进行球谐展开, 展开系数为其特征值; 最后再利用球谐函数之间的计算实现平面波的传播过程。MLFMA 中的远区矩矢相乘转化为

下述形式:

$$\sum_{i=1}^N A_{ji} a_i = \sum_{p=0}^p \sum_{q=-p}^p \left[(f_{pq}^j)^* \cdot \sum_{m' \in FG} \sum_{i \in G_{m'}} g_{pq}^{mi} a_i \right], j \in G_m \quad (4)$$

式中: p 为截断系数; f_{pq}^i 为第 i 个配置因子的特征值; g_{pq}^{mi} 为将第 i 个散射源聚合至组 m' 中心, 进而转移至组 m 中心的聚合转移因子的特征值; G_m 为第 m 个分组。

SE-MLFMA 将聚合、配置因子在谱域中的样本值存储转化为对其特征值的存储, 存储复杂度将得到显著降低, 而计算复杂度则与 MLFMA 一致。考虑到实际剖分单元 (如三角形网格) 数远小于基函数个数, 因此, 将其转化为对网格单元的存储, 可以进一步改进存储效率。

2 数值算例

通过以下算例验证本文方法的准确性和高效性, 所有算例均在 DELL PowerEdge R730 服务器上完成 (配置为 CPU Intel Xeon E5-2687W, 主频 3.0 GHz, 共 24 核, 内存 512 GB)。

2.1 带罩九元偶极线阵辐射仿真

第 1 个模型为介质球壳内的 9 单元偶极线阵辐射问题, 如图 2(a) 所示。球壳内、外半径分别为 1.20 m 和 1.28 m, 相对介电常数为 $\epsilon_r = 2 + 1i$ 。线阵位于球内中心, 排列和朝向均为 x 轴方向, 单元间距为 0.25 m。工作频率为 300 MHz, 阵元等幅同相馈电。如图 2(b) 所示, 计算所得远区辐射场与 MIE 级数结果^[12]吻合很好。

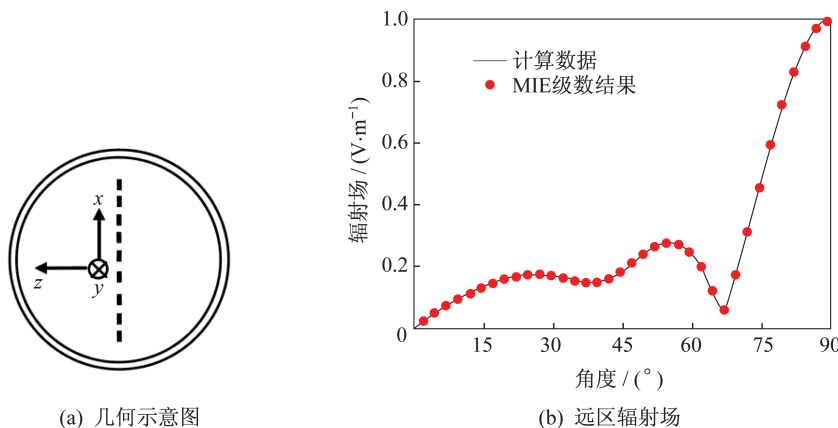


图 2 介质球壳内 9 元偶极线阵远区辐射场

Fig.2 Far-field radiation of the dipole linear array of nine elements in a dielectric spherical shell

2.2 阵列天线-天线罩仿真

天线罩高 460 mm,罩壁等厚 5 mm,天线罩介质材料 $\epsilon_r = 3.3$, $\tan \delta = 0.005$,如图 3 所示。半波振子阵列单元数为 208,朝向为 x 轴方向,阵元中心间距 8.8 mm,形成半径约为 75 mm 的圆形口径,振子单元中心馈电。阵列距离反射面 4.4 mm,反射面距离天线罩底部 60 mm。设定频率为 17 GHz,离散得到未知量数约 81 万。仿真得到 $yo z$ 平面的和差方向图如图 4 所示,并与商业软件 FEKO 仿真结果进行

了对比。其中,和方向图最大峰值增益分别为 26.19 dB 和 26.42 dB(FEKO),差波束方向图也吻合很好。JMCFIE 方程($\alpha=0.9$)和 PMCHW 方程,以及本文提出的 SAI 预条件技术和不采用预条件时的收敛曲线,如图 5 所示。可以看出,SAI 预条件极大地降低了迭代次数,减少了计算时间。SE-MLFMA 的计算时间和内存占用情况见表 1。球谐展开技术将聚合配置因子所占内存减少了 2/3,提高了算法对电大尺寸问题的求解能力。

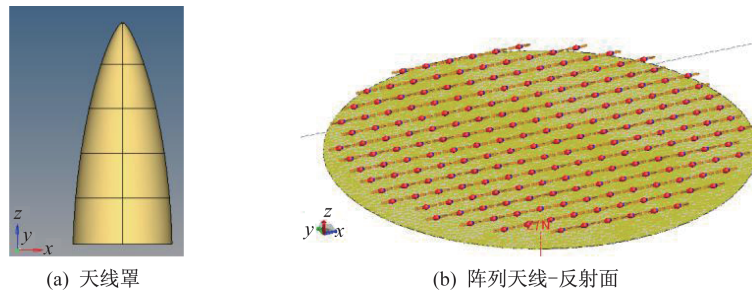


图 3 阵列天线-天线罩几何示意图

Fig.3 Geometric sketch of array antenna-redone

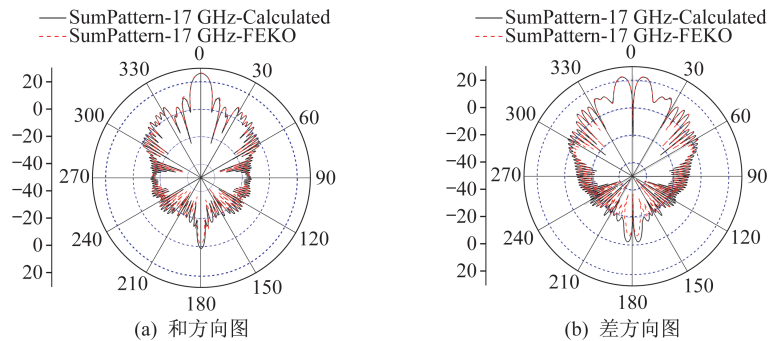


图 4 增益方向图

Fig.4 Gain pattern

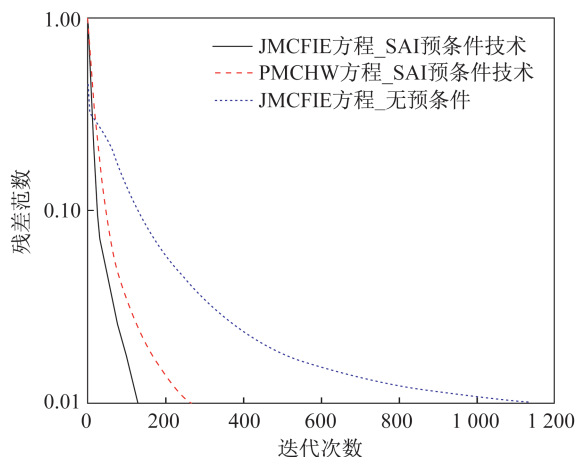


图 5 迭代收敛性比较

Fig.5 Comparison of the Iterations

表 1 采用球谐展开前后计算参数统计

Tab.1 Statistics of calculated parameters before and after spherical harmonic expansion

方法	聚合、配置项 内存/GB	总内存/GB	计算时间/s
MLFMA	2.46	12.48	496
SE-MLFMA	0.81	10.81	508

2.3 电大尺寸天线罩问题

考察频率 75 GHz 时带罩阵列的辐射特性。应用第 2 个算例的天线罩和反射板模型,保持阵列单元数不变。调整半波振子间距 2 mm,阵列到反射面距离 1 mm,所有单元等幅同相馈电。仿真得到

了增益方向图,如图6所示,计算时间和内存占用情况,见表2。可以看出,在单台小型服务器上完成了电尺寸超过 $100\lambda_0$ 天线罩的电特性仿真。

表 2 计算参数统计

Tab.2 Statistics of calculated parameters

电尺寸 λ_0	未知量数/ 10^4	内存占用/ GB	迭代次数	计算时间/h
115	1 628	120	101	1.42

3 结束语

本文针对电大尺寸天线罩电特性分析的高效数值计算方法,从加速计算和减少内存需求两方面开展研究工作。基于导体介质复合结构的表面积分方程法,研究了积分方程构建形式,提出了一种 MLFMA 分组框架下的 SAI 预条件技术,利用近场信息和设定阻抗元素阈值的方式来加速构建预条件矩阵;进一步引入球谐展开技术减少对多极信息的存储。数值结果表明:改进后的积分方程法具有较高的计算精度和计算效率,可用于各类天线阵列-天线罩电磁特性的一体化建模分析。

参考文献

- [1] 刘晓春. 雷达天线罩电性能设计技术[M]. 北京: 中航出版传媒有限公司, 2017.
- [2] GAO X J, FELSEN L B. Complex ray analysis of beam transmission through two-dimensional radomes [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1985, 33(9): 963-975.
- [3] KURODA S, INASAWA Y, KONISHI Y, et al. Radar cross section analysis considering multi-reflection inside a radome using SBR method [C]// Antennas and Propagation Society International Symposium. 2004: 1330353.
- [4] SHIFFLETT J A. CADDRAD: a physical optics radar/radome analysis code for arbitrary 3D geometries [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1997, 39(6): 73-79.
- [5] QUE X F, NIE Z P, HU J. Efficient analysis of dielectric radomes using multilevel fast multipole algorithm with CRWG basis [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19(1): 1-7.
- [6] WANG B B, HE M, LIU J B, et al. Fast and efficient analysis of radome-enclosed antennas in receiving mode by an iterative-based hybrid integral equation/modified surface integration method [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2017, 65(5): 2436-2445.
- [7] 孙旭敏, 杨明林, 盛新庆. 大型波导缝隙阵与天线罩的一体化高效精确分析[J]. 电波科学学报, 2016, 31(4): 749-454.
- [8] YLA-OIJALA P, MATTI T. Application of combined field integral equation for electromagnetic scattering by dielectric and composite objects [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2003, 53(3): 1168-1173.
- [9] PAN X M, SHENG X Q. A sophisticated parallel MLFMA for scattering by extremely large targets [J]. IEEE Antennas Propagat Magazine, 2008, 50(3): 129-138.
- [10] RUI P L, CHEN R S. An efficient sparse approximate inverse preconditioning for FMM implementation [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2006, 49(7): 1746-1750.
- [11] EIBERT T F. A diagonalized multilevel fast multipole method with spherical harmonics expansion of the k -Space integrals [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2005, 53(2): 814-817.
- [12] GUO J L, LI J Y, LIU Q Z. Analysis of arbitrarily shaped dielectric radomes using adaptive integral method based on volume integral equation [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 2006, 54(7): 1910-1916.