



电大涂覆目标SBR算法与MPI并行加速技术

吴 扬, 王思凡, 申子昂, 贾浩文, 祝强强, 徐若锋, 郭卿超, 赵 雷

SBR algorithm for electrically large coated targets and MPI parallel acceleration technology

WU Yang, WANG Sifan, SHEN Ziang, JIA Haowen, ZHU Qiangqiang, XU Ruofeng, GUO Qingchao, and ZHAO Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2025009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于天线方向图与近场SBR的海面舰船复合散射研究

Composite scattering from sea and ship based on antenna pattern and near field SBR

电波科学学报. 2022, 37(1): 1-7

基于改进SBR技术的地面目标SAR图像快速生成技术

Efficient SAR image simulation for target on rough ground surface using the improved SBR technique

电波科学学报. 2024, 39(2): 322-331

计算电大尺寸目标的新型多层快速物理光学高效算法

The novel multilevel fast physical optics efficient method for computing electrically large scatterers

电波科学学报. 2025, 40(1): 96-103

基于时域弹跳射线与BP算法的聚束SAR目标电磁成像快速仿真方法

A fast simulation method for spotlight SAR electromagnetic imaging using time domain SBR and BP algorithm

电波科学学报. 2025, 40(1): 80-88

一种采用吸波透波超表面的天线RCS宽带减缩新方法

A novel method of antenna broadband radar cross section reduction by absorptive/transmissive metasurface

电波科学学报. 2022, 37(3): 471-477

基于FE-BI的介质粗糙面上方涂覆目标电磁散射特性研究

Electromagnetic scattering characteristics of a coated target above a dielectric rough surface based on the FE-BI method

电波科学学报. 2020, 35(2): 252-256



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

引用格式: 吴扬, 王思凡, 申子昂, 等. 电大涂覆目标 SBR 算法与 MPI 并行加速技术 [J]. 电波科学学报, 2025, 40(3): 407-414. DOI: 10.12265/j.cjors.2025009

WU Y, WANG S F, SHEN Z A, et al. SBR algorithm for electrically large coated targets and MPI parallel acceleration technology [J]. Chinese journal of radio science, 2025, 40(3): 407-414. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2025009

电大涂覆目标 SBR 算法与 MPI 并行加速技术

吴扬¹ 王思凡¹ 申子昂² 贾浩文¹ 祝强强¹ 徐若锋¹ 郭卿超³ 赵雷^{1*}

(1. 中国矿业大学, 徐州 221116; 2. 南京航空航天大学, 南京 210000; 3. 电磁信息控制与效应全国重点实验室, 沈阳 110035)

摘 要 为满足涂覆雷达吸波材料 (radar absorbing material, RAM) 的复杂目标电磁散射快速计算需求, 提出了一种基于弹跳射线 (shooting and bouncing ray, SBR) 的高效计算方法。该方法利用广义传播矩阵法理论推导了金属衬底多层介质的反射系数, 并将其与 SBR 法耦合, 精确计算了多层介质涂覆目标的雷达散射截面 (radar cross section, RCS); 为进一步提高计算效率, 采用基于 CPU 平台的 MPI 并行加速技术, 实现了 SBR 算法的高效并行。数值结果表明: 所计算的二面角反射器模型和舰船模型 RCS 结果与商业软件 FEKO 结果之间吻合良好, 其中二面角反射器的均方根误差小于 3 dBsm; 针对电大涂覆飞行器目标, 各计算进程的并行效率均达到 80% 以上。该方法有效解决了电大涂覆目标电磁散射计算的精度和速度, 为电大复杂目标隐身性能的评估计算提供了高效的解决方案。

关键词 弹跳射线 (SBR) 法; 广义传播矩阵法; MPI 并行; 雷达散射截面 (RCS); 雷达吸波材料 (RAM)

中图分类号 TN011

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2025)03-0407-08

DOI 10.12265/j.cjors.2025009

SBR algorithm for electrically large coated targets and MPI parallel acceleration technology

WU Yang¹ WANG Sifan¹ SHEN Ziang² JIA Haowen¹ ZHU Qiangqiang¹ XU Ruofeng¹
GUO Qingchao³ ZHAO Lei^{1*}

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116; 2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000; 3. National Key Laboratory of Electromagnetic Information Control and Effects, Shenyang 110035)

Abstract In this paper, an efficient shooting and bouncing ray (SBR) based computational method is proposed to address the rapid electromagnetic scattering computation of electrically large targets coated with radar-absorbing material (RAM). Using the generalized propagation matrix method, the reflection coefficient of multi-layer dielectrics with a metallic substrate is derived, which is subsequently coupled with the SBR method to accurately calculate the radar cross section (RCS) of complex targets coated with multi-layer dielectric materials. To further improve computational efficiency, message passing interface (MPI) parallel acceleration technology based on CPU platforms is employed to reduce computation time, resulting in high parallel efficiency for the SBR method. Numerical results show that the calculated RCS of the dihedral corner reflector and ship models agree well with FEKO results, with the reflector RMSE below 3 dBsm. Additionally, for electrically large coated aircraft targets, the parallel efficiency exceeds 80%, demonstrating the accuracy and efficiency of the method. This method effectively solves the accuracy and speed issues in the electromagnetic scattering computation of coated large-scale targets, providing an efficient solution for the stealth performance evaluation of complex large-scale targets.

Keywords shooting and bouncing ray (SBR); generalized transmitting matrix; message passing interface (MPI)

收稿日期: 2025-01-17

资助项目: 电磁信息控制与效应全国重点实验室基金 (20240101); 中国矿业大学中央高校基本科研业务费专项资金 (2024-10942); 江苏省研究生科研与实践创新计划 (KYCX24_2767); 中国矿业大学研究生创新计划 (2024WLKXJ092)

通信作者: 赵雷 E-mail: leizhao@cumt.edu.cn

parallel; radar cross section (RCS); radar absorbing material (RAM)

0 引言

雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 是评估目标隐身性能的关键参数^[1]。为了有效降低目标的 RCS, 工程实践中常采用对目标外形进行优化设计的技术手段, 但该方法存在固有局限性, 即无法实现外形确定目标的全方位 RCS 缩减。近年来, 随着雷达吸波材料 (radar absorbing material, RAM) 技术的迅速发展, 采用 RAM 涂覆技术已成为减少目标回波能量、实现全方位 RCS 缩减的有效手段^[2]。相较于外形优化, RAM 涂覆具有更高的灵活性与可控性, 能够在多个入射角度显著降低目标的 RCS^[3]。因此, 如何快速准确地计算涂覆 RAM 目标的 RCS, 已成为雷达隐身技术领域亟待解决的关键科学问题之一。

在电磁散射计算领域, 目前主要采用全波仿真方法和高频近似方法两类计算策略。全波方法以时域有限差分 (finite-difference time-domain, FDTD) 法^[4]和时域间断伽辽金 (discontinuous Galerkin time-domain, DGTD) 法^[5]等为代表, 虽然具有较高的计算精度, 但在处理电大尺寸复杂目标时面临显著挑战。由于目标几何结构复杂且涂覆层多为薄介质层, 网格划分将产生海量未知数, 远超全波方法的计算能力范围。相比之下, 高频近似方法能够在保证计算精度的前提下显著降低计算资源需求, 因而成为更实用的解决方案。其中物理光学 (physical optics, PO) 法^[6]、迭代 PO (iterative PO, IPO) 法^[7]以及弹跳射线 (shooting and bouncing ray, SBR) 法^[8]等应用广泛, 特别是 SBR 方法, 因其能够有效处理复杂目标间的耦合效应并保持较高的计算效率, 已成为求解电大目标电磁散射特性的首选方法。

SBR 方法通过引入射线追踪技术求解目标多次散射, 然而随着目标尺寸的增大和入射波频率的增加, 射线追踪过程的计算复杂度呈指数级增长, 导致计算效率显著下降。为应对这一挑战, 研究者提出了多种加速技术, 在数据结构优化方面, 开发了基于八叉树^[9]和 KD-tree^[10]的高效搜索算法; 在硬件加速方面, 充分利用 GPU 的并行计算能力^[11-13], 取得了显著的加速效果。然而, 在多核处理器广泛普及的背景下, 基于 CPU 的并行计算仍然具有重要的研究价值和应用潜力。近年来, 研究者在该方向取得了一系列进展, 刘祥基于 OpenMP 多线程并行框架有效提升了射线追踪的效率^[14]; 徐万里采用 Spark 集群并行计算方法解决了电大尺寸目标的近场电磁散射问题^[15]; Wang 等人基于 MPI 并行技术加速 SBR 的

算法, 成功应用于海面目标电磁散射特性分析^[16]。尽管如此, 现有研究在 SBR 并行处理方面仍存在一定局限性。因此, 从算法层面深入探索适用于 CPU 架构的高效并行算法, 不仅能够显著提升 SBR 方法的实际应用价值, 同时也为电磁散射计算领域的技术创新提供了新的研究思路。

本文立足于 SBR 算法核心原理, 提出了一种基于射线管并行思想的 MPI 并行加速策略, 并通过将广义传播矩阵方法与 SBR 方法结合, 实现了多层介质反射系数的精确计算, 同时将其应用于电大尺寸目标的 RCS 分析。该方法有效解决了电大涂覆目标电磁散射的快速计算问题, 为复杂目标的隐身性能评估提供了有效方案。

1 涂覆理论分析

本节主要研究电磁波在 RAM 中的电磁传播特性以及与高频近似算法 SBR 相结合的理论分析。

1.1 广义传播矩阵方法

根据麦克斯韦方程组, 可以推导得到横向场与介质参数之间的关系^[17]:

$$d\mathbf{S}/dz = \mathbf{C}\mathbf{S} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{S} = [E_x, E_y, H_x, H_y]^T$ 为状态矢量, 由电场和磁场的横向分量组成; $\mathbf{C}$ 为 4×4 阶耦合矩阵, 对于各向同性介质和单轴各向异性介质, $\mathbf{C}$ 矩阵中的元素为 $C_{11} = C_{12} = C_{21} = C_{22} = C_{33} = C_{34} = C_{43} = C_{44} = 0$, $C_{13} = k_x k_y / (\omega \epsilon_{33})$, $C_{14} = -k_x k_x / (\omega \epsilon_{33}) + \omega \mu_{22}$, $C_{23} = k_y k_y / (\omega \epsilon_{33}) - \omega \mu_{11}$, $C_{24} = -k_x k_y / (\omega \epsilon_{33})$, $C_{31} = -k_x k_y / (\omega \mu_{33})$, $C_{32} = k_x k_x / (\omega \mu_{33}) - \omega \epsilon_{11}$, $C_{41} = -k_y k_y / (\omega \epsilon_{33}) + \omega \epsilon_{11}$, $C_{42} = k_x k_y / (\omega \mu_{33})$ 。式 (1) 的通解形式为

$$\mathbf{S}(z) = \mathbf{A} \exp(j\lambda z) \mathbf{B} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{A}$ 为 $\mathbf{C}$ 矩阵的 4×4 阶特征向量矩阵, 其列向量与 $\mathbf{C}$ 矩阵的特征值 λ 一一对应; $\mathbf{B}$ 为电磁波传播的振幅值, 为一个待定系数。

平面波在介质内任意两点 z 和 z' 间的传播特性可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}(z) &= \mathbf{A} \exp(j\lambda(z - z')) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A} \exp(j\lambda z') \mathbf{B} \\ &= \mathbf{P}(z, z') \mathbf{S}(z') \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{P}(z, z')$ 为广义传播矩阵。

根据界面处电、磁场切向分量连续的边界条件, 可得到多层介质的传播矩阵为

$$\mathbf{P}(z_n, z_0) = \prod_{k=n}^1 \mathbf{P}_k(z_k, z_{k-1}) \quad (4)$$

在区域 0 与区域 $n+1$ 中分别有:

$$S^0(z) = A^0 \exp(j\lambda^0 z) \begin{bmatrix} R \\ I \end{bmatrix} B_-^0 \quad (5)$$

$$S^{n+1}(z) = A^{n+1} \exp(j\lambda^{n+1}(z - z_n)) \begin{bmatrix} 0 \\ T \end{bmatrix} B_-^0 \quad (6)$$

式中: A^{n+1} 和 A^0 分别为区域 $n+1$ 和区域 0 的特征矩阵; B_-^0 为区域 0 下行波的幅值; R 和 T 分别为反射系数矩阵和透射系数矩阵; I 为 2×2 阶单位矩阵。

结合式 (4)~(6) 可得 R 和 T 的关系式为

$$A^{n+1} \begin{bmatrix} 0 \\ T \end{bmatrix} = P(z_n, z_0) A^0 \begin{bmatrix} R \\ I \end{bmatrix} \quad (7)$$

当多层介质涂覆至理想电导体 (perfect electric conductor, PEC) 表面, 即图 1 中的区域 $n+1$ 为 PEC。区域 0 的上行波是区域 0 下行波的反射与区域 1 上行波的透射之和, 即

$$\Gamma B_-^0 = R_{0n} B_-^0 + T_{n0} \exp(j\lambda^n d) R_0 B_-^0 \quad (8)$$

区域 n 下行波是区域 $n-1$ 下行波的透射与区域 n 上行波的反射之和, 即

$$\exp(j\lambda^n d) B_-^n = T_{0n} B_-^0 + R_{n0} \exp(j\lambda^n d) R_0 B_-^0 \quad (9)$$

式中: Γ 为 PEC 衬底下的多层介质涂覆总广义反射系数矩阵; R_{0n} 和 T_{0n} 分别为无 PEC 衬底情况下入射波从区域 0 入射、区域 $n+1$ 出射的广义反射系数矩阵和广义透射系数矩阵; R_{n0} 和 T_{n0} 分别为无 PEC 衬底情况下入射波从区域 n 入射、区域 0 出射的广义反射系数矩阵和广义透射系数矩阵, 可通过式 (7) 求解 R_{0n} 、 T_{0n} 、 R_{n0} 、 T_{n0} ; d 为区域 n 介质层的厚度。

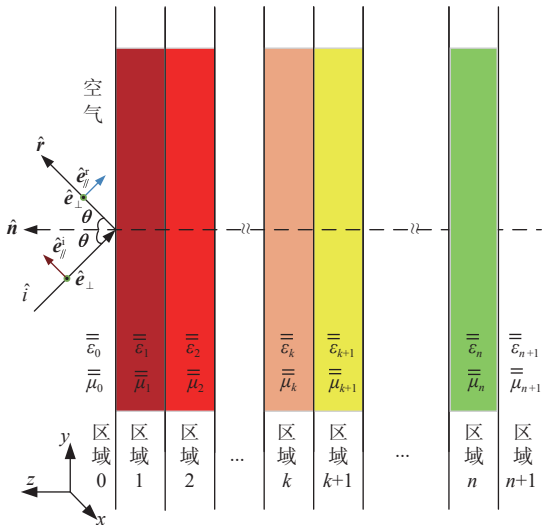


图 1 多层介质涂覆示意图

Fig. 1 Schematic of multilayer dielectric coating

将式 (8)~(9) 结合可得:

$$\Gamma = R_{0n} + T_{n0} \exp(j\lambda^n d) R_0 Q \quad (10)$$

$$Q = (I - \exp(-j\lambda^n d) R_{n0} \exp(j\lambda^n d) R)^{-1} \exp(-j\lambda^n d) T_{0n} \quad (11)$$

得到 Γ 后, 还需将其转换成通常意义下的反射系数, 其转换关系为^[18]:

$$R_{11} = \frac{\sqrt{(A_{21}^0)^2 + (A_{11}^0)^2}}{\sqrt{(A_{23}^0)^2 + (A_{13}^0)^2}} \exp(j2k_z z) \Gamma_{11} \quad (12)$$

$$R_{22} = \frac{\sqrt{(A_{42}^0)^2 + (A_{32}^0)^2}}{\sqrt{(A_{44}^0)^2 + (A_{34}^0)^2}} \exp(j2k_z z) \Gamma_{22} \quad (13)$$

1.2 涂覆目标的 SBR 方法

SBR 方法是以射线的方式模拟电磁波的传播过程, 根据目标模型的几何形状在距离目标一定距离且垂直于入射平面波的方向生成一个虚拟孔径面, 再以一定的分裂步长在虚拟空间面划分射线管 (包括四条角点射线和一条中心射线), 用一系列密集的射线管表征入射平面波, 射线从虚拟孔径面出发, 沿着入射平面波的方向进行传播, 在遇到目标表面时会发生反射, 并将反射射线更新为入射射线, 不断进行射线追踪迭代, 直到离开目标表面或达到最大反射次数, 如图 2 所示。

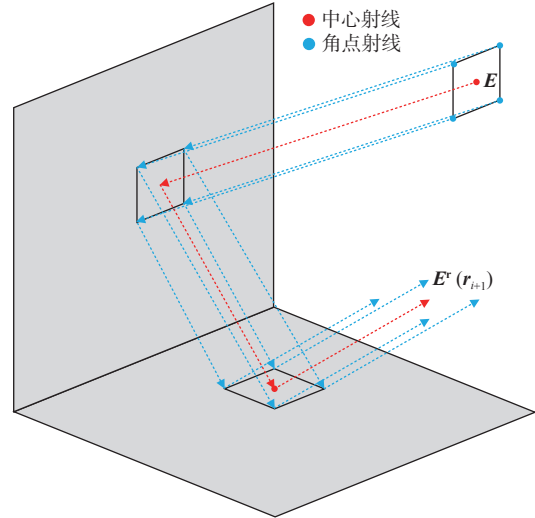


图 2 射线追踪反射过程示意图

Fig. 2 Schematic of ray tracing reflection process

在射线追踪过程中, 初始场强为 E 的射线从虚拟孔径面出射, 根据几何光学 (geometric optics, GO) 原理, 反射场的计算公式为

$$E^r(r_{i+1}) = F_{D_i} \cdot \bar{R}(r_{i+1}) E^r(r_i) \exp(-jk|r_{i+1} - r_i|) \quad (14)$$

式中: $E^r(r_{i+1})$ 和 $E^r(r_i)$ 分别为第 $i+1$ 和 i 次反射时的反射场; F_{D_i} 为第 i 次反射时的散度因子, 本文对目标采用平面三角形剖分, 故 F_{D_i} 取值为 1; $\bar{R}$ 为射线与不同面元相交时的反射系数, 由 1.1 节求出。

根据 Stratton-Chu 公式, 涂覆目标的远场散射场公式如下:

$$\mathbf{E}^s = \frac{jk}{4\pi r} \exp(-jkr) \int_S \hat{\mathbf{s}} \times (\mathbf{M} + Z\hat{\mathbf{s}} \times \mathbf{J}) \exp(jkr \cdot \hat{\mathbf{s}}) d\mathbf{s} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{J}$ 和 $\mathbf{M}$ 分别为涂覆目标表面的感应电流和感应磁流; Z 和 k 分别为波阻抗与自由空间的波数; $\hat{\mathbf{s}}$ 为散射方向的单位向量。

$\mathbf{J}$ 和 $\mathbf{M}$ 可表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H} \\ &= \frac{1}{Z} [(1 - R_{11})E_{\perp} \cos \theta \hat{\mathbf{e}}_{\perp} + (1 + R_{22})E_{\parallel} (\hat{\mathbf{n}} \times \hat{\mathbf{e}}_{\perp})] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \mathbf{E} \times \hat{\mathbf{n}} \\ &= (1 - R_{22})E_{\parallel} \cos \theta \hat{\mathbf{e}}_{\perp} - (1 + R_{11})E_{\perp} (\hat{\mathbf{n}} \times \hat{\mathbf{e}}_{\perp}) \end{aligned} \quad (17)$$

当入射方向垂直于平面入射时, 入射电场不能够分解, $\mathbf{J}$ 和 $\mathbf{M}$ 变为:

$$\mathbf{J} = \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H} = \frac{1}{Z} [(1 - R_{11})\mathbf{E}^i] \quad (18)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{E} \times \hat{\mathbf{n}} = (1 + R_{11})\mathbf{E}^i \times \hat{\mathbf{n}} \quad (19)$$

式中, $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别为目标表面的总电场和总磁场, $\mathbf{E} = \mathbf{E}^i + \mathbf{E}^r$, $\mathbf{H} = \mathbf{H}^i + \mathbf{H}^r$ 。

在图1所示的局部坐标系下, 可得到电场平行极化和垂直极化方向单位矢量的局部表达式:

$$\hat{\mathbf{e}}_{\perp}^i = (\hat{\mathbf{n}} \times \hat{\mathbf{i}}) / |\hat{\mathbf{n}} \times \hat{\mathbf{i}}|, \hat{\mathbf{e}}_{\parallel}^i = \hat{\mathbf{i}} \times \hat{\mathbf{e}}_{\perp}^i, \hat{\mathbf{e}}_{\parallel}^r = \hat{\mathbf{r}} \times \hat{\mathbf{e}}_{\perp}^i \quad (20)$$

此时入射场和反射场可定义为:

$$\mathbf{E}^i = E_{\perp} \hat{\mathbf{e}}_{\perp} + E_{\parallel} \hat{\mathbf{e}}_{\parallel}^i \quad (21)$$

$$\mathbf{E}^r = R_{11} E_{\perp} \hat{\mathbf{e}}_{\perp} + R_{22} E_{\parallel} \hat{\mathbf{e}}_{\parallel}^r \quad (22)$$

2 基于 MPI 的 SBR 并行加速策略

SBR 射线追踪部分占据了算法流程中大量的计算时间, 为解决射线追踪计算效率问题, 充分利用计算机资源, 本节将介绍一种基于 MPI 的新型 SBR 并行计算策略。

2.1 虚拟孔径面区域块划分

本节提出一种虚拟孔径面区域块划分方法进行虚拟孔径面的划分, 其步骤如下:

- 1) 将虚拟孔径面沿着 y_1 、 z_p 轴的方向分别扩展 $0.1\lambda \sim 0.5\lambda$ 投影, 防止射线落在边界上;
- 2) 以一个波长的分裂步长对虚拟孔径面进行区域块划分, 每个区域块里面再按照十分之一的分裂步长划分四边形射线管;
- 3) 判断区域块是否有效。

划分完整的区域块如图3所示, 可以看出虚拟孔径面上完美包含了目标模型剖分后所投影的区

域, 但存在着一些无用的区域块区域, 其所产生的射线管参与了射线追踪过程, 占据了射线追踪的计算时长。区域块是否有效, 本质上为判断投影三角形包围盒是否与块相交, 若面元三角形在 y_1 、 z_p 方向的投影包围盒矩形与区域块相交, 则区域块为有效块。

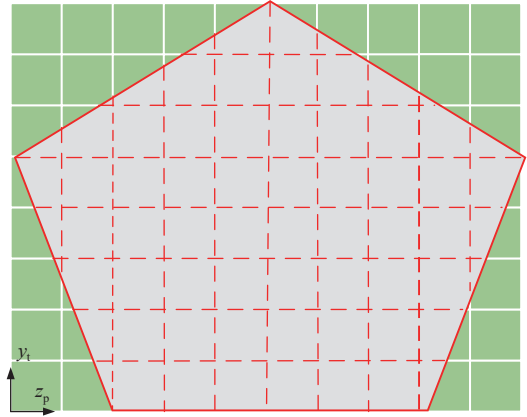


图3 虚拟孔径面分块示意图

Fig. 3 Schematic of virtual aperture surface chunking

2.2 MPI 进程分配

在主进程读入模型及配置文件之后, 基于2.1节所述在虚拟孔径面上划分有效区域块, 在将区域块分配给不同的进程中 (例如每个进程处理一整个区域块, 会导致部分进程的任务量不多), 以及每个射线的交点检测和反射次数的计算复杂度可能不同 (例如有些射线可以很快找到与目标面元的交点, 有些可能需要进行反复迭代反射), 从而形成了负载不均衡。算法的复杂度主要来源于射线追踪部分, 假设目标模型的三角形面元数量为 N , 射线管数量为 M , 采用八叉树数据结构进行射线与面元的快速求交, 计算复杂度为 $O(M \log_8 N)$ 。

由于射线追踪任务的独立性, 进程间的通信开销非常小, 几乎可以忽略不计。为确保射线均衡, 基于循环分配策略, 获取当前进程的 ID procid 、总进程数 nproc , 每条射线用一个全局 ID ray_id 标识。利用 $\text{ray_id} \% \text{nproc}$ 与 procid 的关系来确保只有属于当前进程的任务会被执行, 其他任务则跳过。通过循环分配策略, 使得射线均匀分布在所有进程上, 确保任务细粒度分配, 每个进程处理的射线数量基本相等, 即便某些射线的计算量较大, 大量任务也可以抵消单个高负载任务的影响, 负载达到均衡。

2.3 并行加速流程

综上, 本节提出了一种基于 MPI 并行技术加速 SBR 算法的策略, 充分利用计算资源解决了电大目标电磁散射问题, 具体加速流程如图4所示。

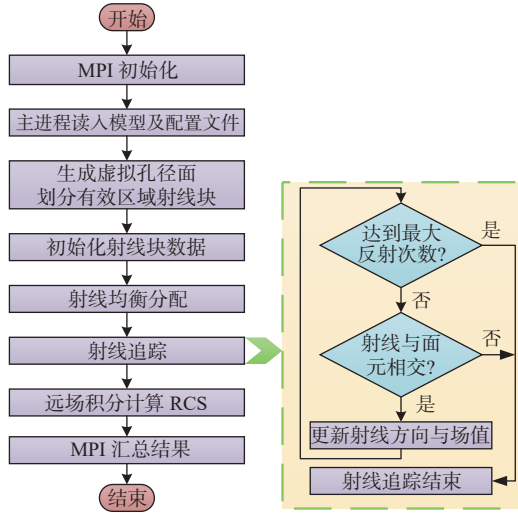


图 4 并行加速流程图

Fig. 4 Parallel acceleration flowchart

具体步骤为:

- 1) 在主进程中读取模型文件并配置参数文件, 根据模型三角形网格生成投影虚拟孔径面。
- 2) 对虚拟孔径面进行区域块划分, 并进行区域块有效性判断, 将射线块区域利用 MPI 分配到各个进程。
- 3) 初始化射线块数据, 为射线区域块中的射线管赋予电磁信息, 包括射线管的四根角点射线和一根中心射线。
- 4) 基于循环分配策略对每根射线分配 ID, 判断该射线是否属于当前进程, 非本进程的射线管直接跳过, 实现更细粒度的射线分配, 减小无效计算。
- 5) 对每条射线进行射线追踪循环, 利用八叉树技术快速找到与射线相交的节点, 进行射线方向与场强的更新。重复这个过程, 直到达到最大反射次数或射线与面元无交点。
- 6) 进行远场积分计算 RCS, MPI 汇总计算结果。

3 数值结果

3.1 PEC 衬底的 RAM 涂覆反射系数分析

考虑三层涂覆介质材料, 入射频率为 10 GHz, 最底层为 PEC, 依次往上涂覆 A、B、C 三种介质材料。材料 A 为各向同性材料, 厚度为 2 mm; 材料 B 为正单轴各向异性材料, 厚度为 3 mm; 材料 C 为负单轴各向异性介质, 厚度为 4 mm。三种介质材料参数来自文献 [19], 具体如下:

$$\text{A: } \epsilon_r = 27.32 - j4.58, \mu_r = 2.22 - j1.72$$

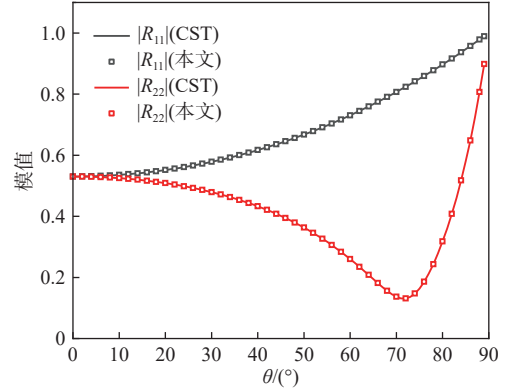
$$\text{B: } \epsilon_r = \text{diag}[9.23 - j2.4, 9.23 - j2.4, 27.32 - j4.58]$$

$$\mu_r = \text{diag}[1.31 - j0.64, 1.31 - j0.64, 2.22 - j1.72]$$

$$\text{C: } \epsilon_r = \text{diag}[27.32 - j4.58, 27.32 - j4.58, 9.23 - j2.4]$$

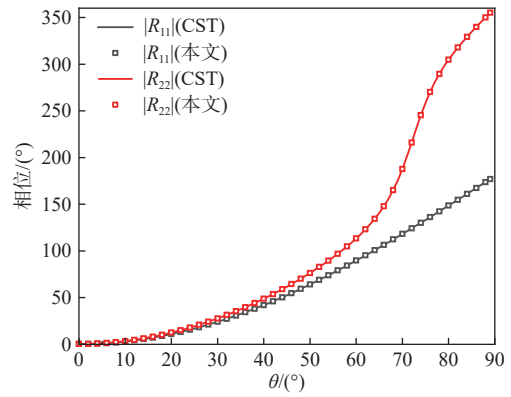
$$\mu_r = \text{diag}[2.22 - j1.72, 2.22 - j1.72, 1.31 - j0.64]$$

多层介质涂覆反射系数随入射角变化如图 5 所示, 并将基于广义传播矩阵方法计算的反射系数与商业软件 CST 进行了对比。可以看出, 所计算的反射系数模值和相位与商业软件 CST 计算结果高度一致, 证实了方法的准确性。



(a) 反射系数模值

(a) Module of reflection coefficient



(b) 反射系数相位

(b) Phase of reflection coefficient

图 5 多层介质涂覆反射系数随入射角变化

Fig. 5 Variation of reflection coefficient with angle of incidence for multilayer dielectric coating

3.2 涂覆目标的 RCS 精确度分析

为验证所提方法的准确性, 对一个具有典型多次反射特征的涂覆 RAM 二面角反射器目标进行计算分析, 并与 FEKO 中的多层快速多极子方法 (multilevel fast multipole method, MLFMM) 计算结果进行对比, 结果如图 6 所示。二面角反射器模型尺寸为 1 m×1 m×1 m, 涂覆介质参数为 $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = 4 - j0.28$, $\mu_{11} = \mu_{22} = \mu_{33} = 3.28 - j2.45$, 涂层厚度为 0.9 mm, 入射波频率为 3 GHz, 入射角度 θ 为 $0^\circ \sim 90^\circ$, φ 为 0° 。表 1 给出了不同极化方式下有无涂覆二面角反射器 RCS 结果的均方根误差 (root mean square error, RMSE)。

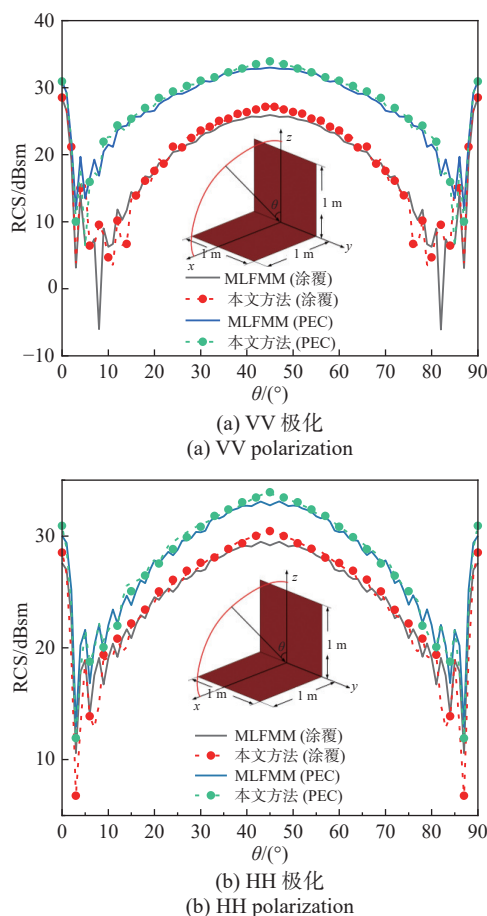


图6 二面角反射器 RCS 计算结果对比

Fig. 6 Comparison of dihedral corner reflector RCS calculation results

表1 二面角反射器 RCS 结果 RMSE

Tab. 1 RMSE of dihedral corner reflector RCS results

极化方式	涂覆与否	RMSE/dBsm
VV极化	涂覆	2.35
	PEC	1.64
HH极化	涂覆	2.22
	PEC	1.17

从图6和表1可以看出,本文所提方法结果与MLFMM计算结果吻合较好,RCS结果RMSE均小于3 dBsm,证实了本文所提方法的准确性。

为显现本文方法的广泛适用性,对一艘涂覆多层RAM舰船目标进行计算分析,结果如图7所示。舰船模型尺寸为12 m×1.3 m×2.4 m,涂覆介质RAM1介质参数为 $\epsilon_{11}=\epsilon_{22}=\epsilon_{33}=6-j3$ 、 $\mu_{11}=\mu_{22}=\mu_{33}=1$,涂层厚度为0.015 m;RAM2介质参数为 $\epsilon_{11}=\epsilon_{22}=\epsilon_{33}=1-j3$ 、 $\mu_{11}=\mu_{22}=\mu_{33}=1$,涂层厚度为0.011 m。入射波频率为1 GHz,入射角度 θ 为 $0^\circ\sim 90^\circ$, φ 为 0° ,VV极化。

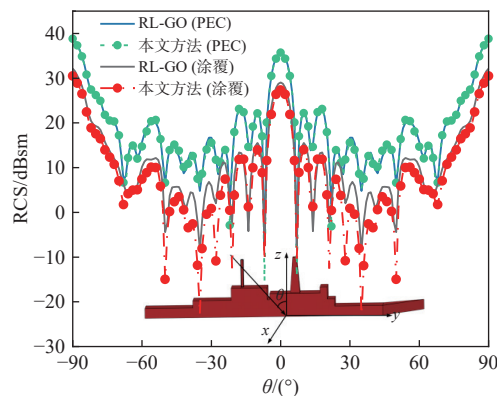


图7 舰船目标 RCS 计算结果对比

Fig. 7 Comparison of RCS calculation results for ship targets

由图7可知,涂覆两层RAM后,RCS有了明显的缩减,所提出方法的结果与FEKO中射线追踪方法RL-GO计算结果基本一致,进一步验证了本文方法的适用性。

3.3 涂覆介质飞行器模型 RCS 及并行加速分析

如图8所示,飞行器的尺寸为7 m×3.5 m×1 m,其表面涂覆了两层各向异性介质材料,介电常数和磁导率如3.1节的B和C材料所示,厚度分别为0.9 mm和1 mm,入射波频率为3 GHz。对此飞行器和未涂覆各项异性介质情况下的飞行器模型进行RCS计算比较,并对不同进程下并行加速效果进行分析,结果如图9所示。可以看出,涂覆两层各向异性介质的情况下对电磁波的吸收能力明显增强。

实际应用中,面对大规模计算问题时,串行执行通常会导致较长的计算时间,因此通常采用多个进程进行并行效率测试。如表2所示,记录了多个进程并行执行的时间,并计算了相应的加速比以及并行效率,可以看出随着进程的增加,并行效率有所下降,但在采用了循环分配策略确保射线均衡后,本文所提出的加速方法在各个进程中均有着80%以上的并行效率。

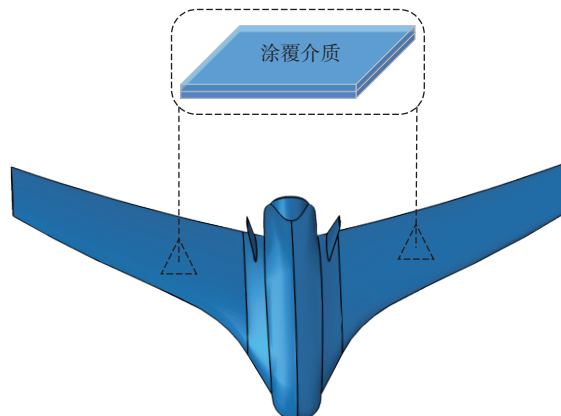


图8 涂覆RAM的飞行器几何模型

Fig. 8 RAM-coated vehicle geometry model

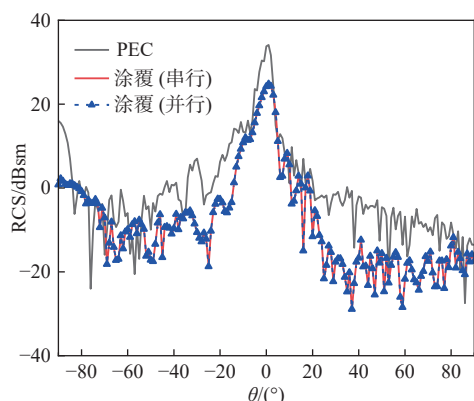


图 9 无涂覆与涂覆介质下的 RCS 结果

Fig. 9 RCS results with uncoated and coated media

表 2 飞行器多进程并行效率测试

Tab. 2 Efficiency testing of multi-process parallelism for aircrafts

进程数	计算时间/s	加速比	并行效率/%
1	579.614	-	100.0
4	156.822	3.69	92.3
6	109.775	5.28	88.0
8	84.051	6.90	86.3
16	44.504	13.02	81.4

4 结 论

本文提出了一种创新的 MPI 并行加速 SBR 算法,该算法能够快速、精确地计算电大尺寸涂覆目标的电磁散射特性。基于广义传播矩阵法计算金属衬底多层介质涂覆的反射系数,进而实现对复杂涂覆目标的精确求解。通过引入基于射线管并行思想的 MPI 并行加速技术,显著提升了涂覆介质目标的电磁散射计算效率,为目标特性研究领域提供了一个高效可靠的计算解决方案。未来可进一步与边缘绕射理论相结合,并引入射线分裂技术,以提升电大涂覆目标的计算精度;同时,探索与 GPU 异构并行计算的融合,有望实现整体计算效率的进一步提升。

参考文献

- [1] KNOTT E F, SCHAEFFER J F, TULLEY M T. Radar cross section[M]. SciTech Publishing, 2004.
- [2] BILAL A, HAMZA S M, TAJ Z, et al. Multi-frequency analysis of gaussian process modelling for aperiodic RCS responses of a parameterised aircraft model[J]. IET radar, sonar & navigation, 2020, 14(7): 1061-1067.
- [3] 孔祥林, 马洪宇, 陈鹏, 等. 基于电阻膜的超宽带超材料吸波体设计[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 947-952.
KONG X L, MA H Y, CHEN P, et al. Design of ultra-wideband metamaterial absorber based on resistance films[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(6): 947-952. (in Chinese)
- [4] AI X, TIAN Y, CUI Z W, et al. A dispersive conformal FDTD technique for accurate modeling electromagnetic scattering of THz waves by inhomogeneous plasma cylinder array[J]. Progress in electromagnetics research, 2013, 142: 353-368.
- [5] CHEN G, ZHAO L, YU W H, et al. A general scheme for the discontinuous Galerkin time-domain modeling and S-parameter extraction of inhomogeneous waveports[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2018, 66(4): 1701-1712.
- [6] BIAN Z, LI J T, GUO L X, et al. Analyzing the electromagnetic scattering characteristics of a hypersonic vehicle based on the inhomogeneity zonal medium model[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2020, 69(2): 971-982.
- [7] BURKHOLDER R J, LUNDIN T. Forward-backward iterative physical optics algorithm for computing the RCS of open-ended cavities[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2005, 53(2): 793-799.
- [8] ZHU Y, WEI G, LI J Z. A shooting and bouncing ray method for electrically large targets with non-uniform thickness anisotropic material[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2024, 72(7): 6156-6161.
- [9] DONG C L, GUO L X, MENG X, et al. An accelerated SBR for EM scattering from the electrically large complex objects[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2018, 17(12): 2294-2298.
- [10] TAO Y B, LIN H, BAO H J. KD-tree based fast ray tracing for RCS prediction[J]. Progress in electromagnetics research, 2008, 81: 329-341.
- [11] KASDORF S, TROKSA B, KEY C, et al. Parallel GPU optimization of the shooting and bouncing ray tracing methodology for propagation modeling[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2024, 72(1): 174-182.
- [12] ZHAO G, SUN N W, SHEN S, et al. GPU-accelerated target strength prediction based on multiresolution shooting and bouncing ray method[J]. Applied sciences, 2022, 12(12): 6119.
- [13] HUO J C, XU L, SHI X W, et al. An accelerated shooting and bouncing ray method based on GPU and virtual ray tube for fast RCS prediction[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2021, 20(9): 1839-1843.
- [14] 刘祥. 基于并行 SBR 的电大尺寸目标近场电磁散射研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
LIU X. Near-field electromagnetic scattering of large-size targets based on parallel SBR[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [15] 徐万里. 基于 Spark 的近海与舰船目标复合散射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.

- XU W L. Research on composite scattering characteristics of near sea and ship target based on spark[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [16] WANG J J, GUO L X, WEI Y W, et al. Application of the improved SBR-TSM based on MPI to EM scattering from multiple targets above a 3-D rough sea surface[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2021, 21(2): 411-415.
- [17] 郑宏兴, 葛德彪. 广义传播矩阵法分析分层各向异性材料对电磁波的反射与透射[J]. *物理学报*, 2000, 49(9): 1702-1706.
- ZHENG H X, GE D B. Electromagnetic wave reflection and transmission of anisotropic layered media by generalized propagation matrix method[J]. *Acta physica sinica*, 2000, 49(9): 1702-1706. (in Chinese)
- [18] 朱逸, 李建周, 秦则芸, 等. 分层双轴各向异性介质电磁传播矩阵计算[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(12): 3420-3428.
- ZHU Y, LI J Z, QIN Z Y, et al. Computation of electromagnetic propagation matrix for layered biaxial anisotropic media[J]. *Journal of systems engineering and electronics*, 2021, 43(12): 3420-3428. (in Chinese)
- [19] DONG C L, GUO L X, MENG X. Application of CUDA-accelerated GO/PO method in calculation of electromagnetic scattering from coated targets[J]. *IEEE access*, 2020, 8: 35420-35428.

作者简介

吴扬 (1998—), 中国矿业大学硕士研究生, 研究方向为计算电磁学与应用。E-mail: yangwumax@163.com

王思凡 (1996—), 中国矿业大学博士研究生, 研究方向为计算电磁学与应用。E-mail: sfwang@cumt.edu.cn

赵雷 (1974—), 中国矿业大学教授, 博士生导师, ACES Fellow, IEEE 高级会员, 中国电子学会天线分会委员, IEEE AP-S Chapter Xuzhou 主席, 主要研究方向为射频微波器件、新型电磁材料、涡旋波通信、计算电磁学等。E-mail: leizhao@cumt.edu.cn