

中文核心期刊要目总览

- 中国科技核心期刊
- •中国科学引文数据库 (CSCD)
- 中国科技论文与引文数据库 (CSTPCD)
- 中国学术期刊文摘数据库 (CSAD)
- 中国学术期刊(网络版)(CNKI)

中国超星期刊域出版平台
国家科技学术期刊开放平台

• 中文科技期刊数据库

• 万方数据知识服务平台

- 荷兰文摘与引文数据库(<u>SCOPUS)</u>
- 日本科学技术振兴机构数据库 (JST)

基于Vulkan的电大复杂目标电磁散射SBR计算方法与GPU加速技术

王思凡,吴扬,贾浩文,胡志明,申子昂,徐若锋,梁达,赵 雷

Vulkan-based SBR method for electromagnetic scattering of electrically large and complex targets with GPU acceleration techniques

WANG Sifan, WU Yang, JIA Haowen, HU Zhiming, SHEN Ziang, XU Ruofeng, LIANG Da, and ZHAO Lei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12265/j.cjors.2024259

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

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

基于PE-PO混合方法的海洋大气波导环境下电大目标电磁散射研究

Study on electromagnetic scattering of electrically large targets in ocean atmosphere duct environment based on PE-PO hybrid method

电波科学学报. 2025, 40(1): 29-36

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

基于多区域面积分方程的电大非均匀等离子体电磁特性高效计算方法

A multi-region surface integral equation method for electromagnetic analysis of electrically large inhomogeneous plasma sheath 电波科学学报. 2024, 39(1): 26-38



关注微信公众号,获得更多资讯信息

引用格式: 王思凡, 吴扬, 贾浩文, 等. 基于 Vulkan 的电大复杂目标电磁散射 SBR 计算方法与 GPU 加速技术 [J]. 电波科学学报, 2025, 40(3): 457-463. DOI: 10.12265/j.cjors.2024259

WANG S F, WU Y, JIA H W, et al. Vulkan-based SBR method for electromagnetic scattering of electrically large and complex targets with GPU acceleration techniques [J]. Chinese journal of radio science, 2025, 40(3): 457-463. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2024259

基于 Vulkan 的电大复杂目标电磁散射 SBR 计算方法 与 GPU 加速技术

王思凡¹ 吴扬¹ 贾浩文¹ 胡志明¹ 申子昂² 徐若锋¹ 梁达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. 航空工业济南特种结构研究所, 济南 250023)

摘 要 提出了一种基于 Vulkan 架构的弹跳射线 (shooting and bouncing ray, SBR) 加速计算方法,用于电大 复杂目标雷达散射截面的快速计算。设计了高效的 Vulkan 计算着色器,充分利用 GPU 硬件光追,显著提升了 SBR 法中光线求交的计算速度;引入了双命令缓冲机制,使得 CPU 与 GPU 能够高效协同工作,从而加速多角度 扫描任务的执行;在虚拟孔径面上划分互不干扰的子任务,进一步提升了多 GPU 并行的利用效率。实验结果表 明:所提出方法在计算电大复杂目标雷达散射截面时相较于 FEKO RL-GO 方法实现了 40 倍以上的加速;双命令 缓冲机制提升了约 42% 的多角度扫描速度;双 GPU 计算并行效率超过 90%。

关键词 雷达散射截面 (RCS); 弹跳射线 (SBR) 法; 光线追踪; GPU 加速计算; 电大复杂目标
 中图分类号 TN011 文献标志码 A 文章编号 1005-0388(2025)03-0457-07
 DOI 10.12265/j.cjors.2024259

Vulkan-based SBR method for electromagnetic scattering of electrically large and complex targets with GPU acceleration techniques

WANG Sifan¹ WU Yang¹ JIA Haowen¹ HU Zhiming¹ SHEN Ziang² XU Ruofeng¹ LIANG Da³ ZHAO Lei^{1*}

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China; 3. Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composite, Jinan 250023, China)

Abstract This paper proposes a Vulkan-based acceleration method for shooting and bouncing ray (SBR) to obtain fast computation of the radar cross section (RCS) of complex electrically large targets. An efficient Vulkan compute shader is designed to fully leverage GPU hardware ray tracing, which an significantly improve the ray intersection computation speed for the SBR method. A dual-command-buffer mechanism is introduced to enhance CPU-GPU collaboration for accelerating multi-angle scanning tasks. Additionally, non-interfering sub-tasks are divided on the virtual aperture surface, further improving multi-GPU parallel utilization efficiency. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves over 40× acceleration in RCS computation for complex electrically large targets compared to the FEKO RL-GO method. The dual-command-buffer mechanism improves multi-angle scanning speed by approximately 42%, while dual-GPU computation achieves over 90% parallel efficiency.

Keywords radar cross section(RCS); shooting and bouncing rays(SBR); ray tracing; GPU accelerated computation; large and complex targets

资助项目: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)

收稿日期: 2024-12-07

通信作者: 赵雷 E-mail: leizhao@cumt.edu.cn

0 引 言

电大复杂目标的电磁散射特性分析是航空航 天、国防军事等领域中的重要研究课题,其中雷达散 射截面 (radar cross section, RCS) 是衡量目标电磁特 性的核心参数之一^[1]。随着工作频率的提高和目标 几何结构的复杂化, RCS 计算通常需要高分辨率的 精细网格建模,不仅显著增加了计算复杂度和存储 需求,还对计算方法的效率提出了极高要求。因此, 如何高效、精确地求解电大复杂目标的 RCS 成为当 前研究的热点和难点。

针对电磁散射问题,传统的数值方法在低频小 目标计算中表现优异。近年来, Zygiridis 等人^[2] 提出 了一种优化 FDTD 算法时间步长的方法, 解决了低 阶时间积分与高阶空间表达式结合时性能下降和收 敛缓慢的问题;通过推导更小的时间步长,减少了误 差并提高了精度;同时,利用图形处理器 (graphics processing unit, GPU)并行计算加速了迭代过程,提 升了计算效率和模型性能。袁浩波等人^[3]提出了一 种并行自适应交叉近似压缩算法 (adaptive cross approximation algorithm, ACA), 通过非均匀有理样条 (non-uniform rational B-spline, NURBS)建模、ACA 压缩和预条件共轭梯度法,显著提升了高阶矩量法 在计算电磁学中的计算规模和效率。Zhu Q 等人 ^[4]提出了一种基于 Reverse-Cuthill-Mckee (RCM) 单 元重排序的改进时域间断伽辽金 (discontinuous Galerkin time domain, DGTD) 方法, 以提高单元局部 性,从而优化缓存命中率并提升计算效率。然而这 些传统数值方法在电大目标情形下,计算复杂度随 网格数量的增加呈非线性增长,依然难以满足实际 应用需求。相比之下,高频近似方法,如物理光学法 (physical optics, PO)^[5]、物理绕射理论 (physical theory of diffraction, PTD)⁶以及弹跳射线 (shooting and bouncing ray, SBR)法^[7]等,以较低的计算代价提供 了对复杂目标的快速求解能力。其中,SBR 方法因 兼具高频近似精度和计算效率,成为电大复杂目标 RCS 分析中的重要工具。

SBR 方法通过模拟射线在目标表面的多次反射 和传播行为,利用射线与面片的几何交点计算电磁 场的散射特性。然而,传统基于 CPU 的 SBR 法,即 使在多核并行的条件下,仍难以应对电大目标中巨 量射线和复杂几何面片带来的计算负载^[8]。在多线 程并行模式下,线程间的资源竞争和负载不均衡问 题会显著影响计算效率^[9];而在多进程并行模式下, 进程间的通信开销和同步机制同样会引入额外的性 能损耗,从而降低整体计算效率^[10]。在近年来的研 究中,随着 GPU 的快速发展,基于 CUDA 的 SBR 方 法通过充分利用 GPU 的高并行计算能力,显著提升 了射线追踪和电磁场计算的效率^[11]。Kirik 等人^[12] 实现了 PO、SBR 和 PTD 电磁求解器的并行计算,通 过多 CPU 和多 GPU 加速,显著提升了电大复杂目标 的电磁散射和 RCS 计算效率。Kasdorf 等人^[13]将 SBR 方法与 NVIDIA OptiX Prime 编程接口深度集 成,实现了基于 GPU 的大规模并行优化,显著提升 了射线追踪电磁传播建模的效率。但 CUDA 和 OptiX 作为 NVIDIA 的专有技术, 仅支持 NVIDIA GPU, 无法在其他 GPU 平台上运行,且 CUDA 实现需通过 软件模拟射线追踪,缺乏对现代 GPU 硬件光线追踪 能力的直接利用,导致计算性能未被完全挖掘。因 此,研究者开始探索利用 Vulkan 等跨平台图形接口, 研究直接调用硬件加速功能的可能性^[14]。Vulkan 是 一个跨平台、高性能的图形和计算接口,允许开发者 直接控制硬件以优化性能和资源管理。这一方向不 仅能够更高效地实现射线追踪,还为解决复杂电磁 散射问题提供了更广泛的硬件支持和优化空间。

本文基于 Vulkan 的光线追踪接口,提出了一种 SBR 法 RCS 计算方法,并结合双缓冲机制优化多角 度计算流程。该方法通过 GPU 的高并行计算能力 与 Vulkan 的资源管理特性,大幅提升了复杂目标 RCS 的计算效率。

1 理论分析

SBR 法通过模拟大量射线管从发射源出发,沿 直线传播,并在遇到目标表面时发生反射,再追踪这 些射线返回到接收器的路径,从而计算目标的 RCS。对于入射平面波,用一定密度的密集射线管模 拟入射波在场景中的传播情况,在遇到目标表面时 发生反射,再追踪这些射线返回到接收器的路径。 每组射线管包括一条中心射线和四个角点射线。如 图1所示,红色为中心射线,绿色为角点射线。





第3期

1.1 射线管的生成

射线管的生成主要分为两个部分:构造虚拟孔 径面和划分射线管束。

1.1.1 构造虚拟孔径面

对于虚拟孔径面的构造,取垂直入射电磁波方 向为 $k_i = -2\pi \left[\sin \theta \cos \phi \sin \theta \sin \phi \cos \theta \right]^T / \lambda$,并 且距离全局坐标系原点距离为d(一般取目标包围球 直径的 1.5 倍)的平面,遍历目标所有三角面元的所 有顶点,将这些点向该平面投影,从而将目标的所有 三维顶点坐标转换为入射面上的二维顶点坐标。转 换公式如下:

$$\begin{bmatrix} y_{\theta} \\ z_{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$
(1)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} d \\ y_{\theta} \\ z_{\phi} \end{bmatrix}$$
(2)

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} \sin\theta\cos\phi & \sin\theta\sin\phi & \cos\theta\\ \cos\theta\cos\phi & \cos\theta\sin\phi & -\sin\theta\\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \end{bmatrix}$$
(3)

遍历目标网格所有面元顶点,得到局部坐标系下的虚拟孔径面范围[y_{@min},y_{@max}]和[z_{@min},z_{@max}]。

1.1.2 划分射线管束

为保证 SBR 算法的计算精度,射线管束的划分 步长δ_r应不大于十分之一波长。射线管在局部坐标 系中的数量确定为

$$\begin{bmatrix} N_{\theta} \\ N_{\phi} \end{bmatrix} = \operatorname{ceil}\left(\frac{1}{\delta_{\mathrm{r}}}\begin{bmatrix} y_{\theta\max} - y_{\theta\min} \\ z_{\phi\max} - z_{\phi\min} \end{bmatrix}\right)$$
(4)

式中,函数 ceil 表示向上取值。

射线管束 $Ray_{i,j}$ 构成的射线集合为 $\{Ray_{i,jk} | i \in [0, N_{\theta} - 1], j \in [0, N_{\theta} - 1], k \in [0, 4]\}$ (当k = 0时为中心射线,当 $k \in [1, 4]$ 时为四条角点射线),射线总数为 $N_{ray} = N_{\theta} \times N_{\phi}$ 。对于任意射线 $Ray_{i,k}$,起点如下:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\sin\theta\cos\phi + d\cos\theta\cos\phi\hat{\theta} - \sin\phi\hat{\phi} \\ d\sin\theta\sin\phi + d\cos\theta\sin\phi\hat{\theta} - \cos\phi\hat{\phi} \\ d\cos\theta - \sin\theta\hat{\theta} \end{bmatrix} (5)$$

式中, $(\hat{\theta}, \hat{\phi})$ 为平面波入射方向,

$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= y_{\theta\min} + (i + P_{k,0})\delta_{r} \\ \hat{\phi} &= z_{\phi\min} + (j + P_{k,1})\delta_{r} \\ \boldsymbol{P}^{\mathrm{T}} &= \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

1.2 射线管的传播

在射线管的传播过程中,每次射线反射需要记录和更新射线的方向,若射线入射方向向量为*i*,射

线 交 点 面 元 法 向 量 为 n, 则 反 射 方 向 向 量 r = i - 2n(i · n)。此外, 中心射线在每次反射时还需要 更新整个射线管的电场强度。为计算中心射线电场 强度, 首先将入射平面波分为垂直极化分量和水平 极化分量:

$$\begin{cases} \boldsymbol{m} = (\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{i}) / |\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{i}| \\ \boldsymbol{E}_{\perp} = (\boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{m}) \boldsymbol{m} \\ \boldsymbol{E}_{\parallel} = \boldsymbol{E} - \boldsymbol{E}_{\perp} \end{cases}$$
(6)

假设与入射平面垂直的电场单位矢量为 $e_{\perp} = (i \times n)/|i \times n|$,与入射平面平行的电场单位矢量为 $e_{\parallel} = (i \times e_{\perp})/|i \times e_{\perp}|$,并设 $e_{\parallel} = (r \times e_{\perp})/|r \times e_{\perp}|$ 。则对于理 想导体平面,入射电场和反射电场的关系如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{E}_{i} = \boldsymbol{E}_{\perp} \boldsymbol{e}_{\perp} + \boldsymbol{E}_{\parallel} \boldsymbol{e}_{\parallel}^{i} \\ \boldsymbol{E}_{r} = \boldsymbol{R}_{\perp} \boldsymbol{E}_{\perp} \boldsymbol{e}_{\perp} + \boldsymbol{R}_{\parallel} \boldsymbol{E}_{\parallel} \boldsymbol{e}_{\parallel}^{r} \end{cases}$$
(7)

式中: R_{\perp} 为入射电场垂直极化分量在目标表面的反 射系数; R_{\parallel} 为入射电场水平化分量在目标表面的反 射系数。当表面为理想导电体 (perfect electric conductor, PEC) 时, $R_{\perp} = -1$, $R_{\parallel} = 1$ 。

1.3 PO 远场积分计算

远区观察点 P 处的散射场强为[15]

$$\boldsymbol{E}^{\mathrm{s}} = \frac{jk_{0}}{4\pi r} \iint_{\Omega} \boldsymbol{s} \times (Z_{0}\boldsymbol{s} \times \boldsymbol{J}_{\mathrm{e}} + \boldsymbol{J}_{\mathrm{m}}) \, \mathrm{e}^{\mathrm{i}k_{0}(i\,\boldsymbol{r}'-l)} \mathrm{d}\boldsymbol{s} \tag{8}$$

式中: i为射线最后一次反射前的传播方向; s为观察 点 P 的单位矢量; l为射线的总路程; r 为第n组射线 管中心射线与面元最后一次相交点位置矢量; Q为该 射线管最后一次出射时交点构成的四边形积分区 域;

$$\begin{cases} \boldsymbol{J}_{e} = \boldsymbol{n} \times \boldsymbol{H} \\ \boldsymbol{J}_{m} = \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{n} \\ \\ \boldsymbol{H} = \frac{1}{Z_{0}} \boldsymbol{i} \times \boldsymbol{E}^{i} + \frac{1}{Z_{0}} \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{E}^{r} \\ \\ \boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}^{i} + \boldsymbol{E}^{r} \end{cases}$$

2 基于 Vulkan 的 SBR 实现

Vulkan 是一种高性能、低开销的跨平台图形计 算架构,支持硬件光线追踪、灵活的多 GPU 调度以 及高效的资源管理。借助 Vulkan 的这些优势,可以 通过光线追踪接口加速 SBR 中的射线与几何体求交 计算,采用双命令缓冲机制优化 CPU 与 GPU 的协同 工作,并利用多 GPU 并行处理进一步提升计算效 率。目标是显著提升电大复杂目标 RCS 计算的性 能,同时降低资源消耗,为隐身设计和天线分析等领 域提供高效的解决方案。

2.1 程序整体计算流程

程序的整体流程图如图2所示。



Fig. 2 Overall calculation flowchart

首先,程序读取网格,生成适合 GPU 加速计算的 结构,分配并准备计算缓冲区,用于存储中间计算结 果和最终的 RCS 数据。

进入主计算循环后,程序会依次处理所有角度 的单站 RCS 计算。在每个循环迭代中,程序先在 CPU 端并行计算虚拟孔径面的范围,即确定当前角 度下的y_{emin}、y_{emax}、z_{emin}、z_{emax}值。

接着,程序会生成命令缓冲区并调用计算着色 器来进行射线追踪计算。Vulkan 允许开发者显式地 管理命令缓冲区的记录和提交,从而实现更高效的 GPU 命令传输。通过生成命令缓冲区,程序可以将 一系列 GPU 命令(如计算着色器的调用)记录下来, 并在适当的时候提交给 GPU 进行执行。这种方式 避免了频繁的 API 调用开销,显著提高了 GPU 的利 用率。计算着色器负责执行射线追踪算法,对定义 在虚拟孔径面上的射线进行追踪,并计算每个射线 与网格的交互情况,最终得到当前角度下的 RCS 值。由于计算着色器运行在 GPU 上,大量的并行计 算任务可以被高效地处理。

循环结束后,程序会等待所有命令缓冲区执行 完毕,确保所有的 GPU 计算都已经完成。然后,程 序从 GPU 端获取 RCS 计算结果,将其输出到指定的 文件,并释放所有分配的计算缓冲区资源。

2.2 射线快速求交

在 SBR 法中, 射线与目标几何体的碰撞检测是

最核心且最耗时的部分。为了加速这一过程, Vulkan提供了硬件支持的底层加速结构 (bottomlevel acceleration structure, BLAS)和顶层加速结构 (top-level acceleration structure, TLAS),它们能够显著 提高射线与几何体相交计算的效率。

BLAS 包含了场景中的三角形面元顶点信息和 包 围 盒 (axis-aligned bounding box, AABB), 而 TLAS 包含对一组 BLAS 的引用,每个引用包含了该 BLAS 的变换信息和属性。

2.3 计算着色器流程

计算着色器的程序流程如图 3 所示。



Fig. 3 Compute shader flowchart

1.1.2 节中,我们在虚拟孔径面上划分了射线管 束,射线管束总数即为 Vulkan 工作组的线程数,每个 线程计算一个射线管束,并根据线程自身的 ID 由公 式 (5) 生成中心射线和角点射线。之后,首先检查当 前弹跳次数是否超过预设的上限。如果超过,则线 程结束计算;否则,进入下一步。

在每次弹跳中,线程判断射线是否与几何体相 交。若无相交事件,则判定该射线不再有效并结束 当前线程的计算;若有相交事件,则需进一步计算反 射方向并更新中心射线的场值。与此同时,检查射 线管束是否需要进一步分裂,若需要,则按照分裂规 则重新生成子射线。

对于有效射线,在经过所有反弹并满足条件后, 进入 RCS 积分的计算阶段,并将当前射线的贡献累 加到结果中。

以上过程充分利用 Vulkan 的计算着色器性能, 每个线程独立负责一个射线管束,线程间无需同步 操作,实现了高效的并行计算流程。 第3期

2.4 双命令缓冲

在单站多角度扫描计算中,由于不同角度的计 算相互独立,如果程序每次都等待着色器命令执行 完毕再启动下一次计算,将导致效率下降。为了解 决这一问题,引入了双命令缓冲机制,使得程序可以 在当前命令执行的同时,准备下一个角度的计算,从 而显著提升 Vulkan 程序的计算效率。图4给出了该 方法的示意图,不同颜色表示使用不同的命令缓冲。



图 4 双命令缓存机制示意图

Fig. 4 Schematic of dual-command-buffer mechanism

双命令缓冲机制通过交替使用两个命令缓冲 区,使得一个命令缓冲区在被 GPU 执行时,另一个 命令缓冲区可以被 CPU 准备下一组计算命令。

1)缓冲区交替使用

在程序初始化时,创建两个命令缓冲区 (Buffer A 和 Buffer B)。在程序运行过程中:当命令缓冲区 A 被提交给 GPU 执行时, CPU 开始填充命令缓冲区 B;一旦命令缓冲区 A 的任务执行完成, GPU 立即切 换到执行命令缓冲区 B, 而 CPU 则清空并重新填充 命令缓冲区 A。

2)同步机制

为确保正确的指令执行顺序,需要使用 Vulkan 的同步机制:

①利用 VkFence 让 CPU 等待 GPU 完成一个命 令缓冲区的执行后再进行对应缓冲区的重置和填充;

②利用 VkQueueSubmit 提交命令缓冲区。

通过这种机制, CPU和 GPU的工作可以并行进行,提高了资源利用率和整体效率。

2.5 多 GPU 加速

程序在虚拟孔径面上划分任务,将不同虚拟孔径面分为面积均等的区域,分配给各 GPU 独立计算。每个 GPU 负责生成射线并完成反射、分裂等操作,任务互不干扰,最终将结果汇总到主机内存。由于任务独立性强,且无并行产生的通信开销,该方法能显著提升计算性能,适用于大规模任务。

3 仿真实验结果与分析

本章节分为两部分:第一部分对算法的准确性 进行测试,以验证其结果的可靠性;第二部分对算法 的计算效率进行测试,以评估其性能。测试使用的 硬件环境为: CPU为 AMD Ryzen 9 9950X 16-Core Processor, GPU 为 NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti。测 试中,射线管束的划分步长 $\delta_r = \lambda/10$,最大反射次数 均设置为 10。

3.1 准确性测试

选取直升机模型计算其单站 RCS,并与 FEKO的高频近似方法 RL-GO和 HFSS 的高频近似 方法 SBR+计算结果进行对比。

直升机模型大小约为 13 m×15.38 m×4.17 m, 总 共 253 798 个三角形面元, 设定频率为 1 GHz。单站 RCS 扫描角度设置为: $\theta \in [0^{\circ}, 360^{\circ}], \phi = 0^{\circ}, 步长为$ 1°, 总计 361 个扫描角度。计算结果如图 5 所示, Vulkan SBR 方法与 FEKO RL-GO 以及 HFSS SBR+ 计算结果趋势一致, 平均绝对误差约为 1.8 dB, 验证 了其准确性。







3.2 效率测试

为验证基于 Vulkan 的 SBR 求解器的计算效率, 测试卫星模型在不同频率下的 RCS 计算任务。

卫星模型大小约为 2.75 m×0.96 m×0.72 m, 总共 404 696 个三角形面元。单站 RCS 扫描角度设置为: $\theta \in [0^{\circ}, 360^{\circ}], \phi = 90^{\circ}, 步长为 1^{\circ}, 总计 361 个扫描角$ 度。设置计算频率为 6 GHz、12 GHz 与 48 GHz。图 6给出了 6 GHz 频率下 Vulkan 的 SBR 求解器与 FEKORL-GO 和 HFSS SBR+的 RCS 结果对比。计算频率 6GHz、12 GHz 和 48 GHz 的平均绝对误差分别为 1.5dB、2.5 dB 和 2.1 dB。

从表1不同频率下三种算法的计算时间可以看出,Vulkan SBR 求解器在所有测试场景中相对于商业软件 FEKO RL-GO 方法 (MPI 多进程并行)以及OMP SBR 方法 (OpenMP 多线程并行)均表现出显著的速度优势。在低频 (6 GHz)场景下,使用 GPU 加速的 Vulkan SBR 方法计算时间比 FEKO RL-GO 方法快约 84 倍,比 OMP SBR 方法快约 16 倍;在高频 (48 GHz)场景中,其速度比 FEKO RL-GO 方法快约

39倍,比OMP SBR 方法快约14倍。



Fig. 6 RCS calculation results of satellite

表1 计算时间对比

 Tab. 1
 Calculation time comparison

频率/GHz	FEKO RL-GO	OMP SBR	Vulkan SBR
6	126.8	24.5	1.5
12	318.2	70.3	5.1
48	3 087.7	1 148.8	77.1

表2展示了不同模型下Vulkan SBR 方法的峰值 内存和显存使用情况。卫星模型的峰值内存使用为 383 MB,显存使用为156 MB;直升机模型的峰值内 存使用为350 MB,显存使用为149 MB。计算频率的 提高会导致射线数量增加,但由于着色器在计算过 程中仅使用寄存器来处理每条射线的计算和存储任 务,内存和显存的占用量并不会随之上升。因此,程 序的内存和显存占用在不同计算频率下保持不变, 仅与模型本身的复杂度相关。

表 2 峰值内存使用情况

Tab. 2	Peak memory usage	MB
I (()) = A	I can memory usage	1110

模型	内存	显存
卫星	383	156
直升机	350	149

为验证双命令缓冲机制对于多角度快速扫描的 有效性,设置扫描角度为: *θ* ∈ [0°,360°],*φ* ∈ [0°,45°], 步长为1°,总计16 606 个扫描角度。有双命令缓冲 和无双命令缓冲的情况对比如表3 所示,引入双命 令缓冲机制后,计算时间显著减少,从115.59 s 降低 到 66.83 s,性能提升约42%。

最后使用两块 NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti 对 多 GPU 加速效果进行对比测试。通过表 4 中的数据 可以看出,使用两块 GPU(双 GPU)进行计算时,与 单 GPU 相比,计算时间显著缩短。双 GPU 的并行效 率均超过 90%,表明多 GPU 并行计算能够有效提升 计算效率。

表 3 双缓冲机制计算时间对比

 Tab. 3
 Comparison of calculation time of double

buffer mechanism			S
频率/GHz	无双缓冲	有双缓冲	
6	115.59	66.83	

表 4 多 GPU 计算时间对比

Tab. 4 Computation time comparison of multi-GPU s

频率/GHz	单GPU	双GPU
12	5.1	2.6
48	77.1	40.7

4 结 论

S

本文提出一种基于 Vulkan 的 SBR 算法,实现了 复杂目标的 RCS 高效计算。通过充分利用 Vulkan 的底层硬件控制能力、多线程并行计算特性,以及 BLAS 的支持,在复杂场景下以及多角度快速扫描任 务中展现了显著的性能优势。此外,本文引入的双 缓冲机制和优化的内存管理策略,进一步减少了数 据传输延迟和资源开销,保障了计算的连续性和稳 定性。本文的研究为高频电磁场计算提供了一种高 效、可扩展的解决方案,特别适用于需要处理大规模 复杂目标的实时仿真场景。

参考文献

- [1] 张杨,李庶中,张春阳,等. 基于 KD-Tree 的组合目标电磁散射快速算法[J]. 兵工学报, 2015, 36(S2): 173-177.
 ZHANG Y, LI S Z, ZHANG C Y, et al. Efficient computational method of coupled targets electromagnetic scattering based on KD-Tree[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S2): 173-177. (in Chinese)
- [2] ZYGIRIDIS T T, KANTARTZIS N V, TSIBOUKIS T D. GPU-accelerated efficient implementation of FDTD methods with optimum time-step selection[J]. IEEE transactions on magnetics, 2014, 50(2); 477-480.
- [3] 袁浩波,何力,党晓杰,等. 自适应交叉近似压缩的高阶矩 量法的并行实现[J]. 电波科学学报, 2016, 31(1): 138-142.

YUAN H B, HE L, DANG X J, et al. A parallelized higher order moment method combined with the ACA compressing[J]. Chinese journal of radio science, 2016, 31(1): 138-142. (in Chinese)

[4] ZHU Q, WANG S, WU Y, et al. Enhanced DGTD method using RCM unit reorder technique[C]//2024 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China), IEEE, 2024.

- [5] 张楠,吴语茂. 计算电大尺寸目标物理光学散射场的快速 算法[J]. 电波科学学报, 2018, 33(6): 635-641.
 ZHANG N, WU Y M. A fast algorithm for calculating the physical optics scattered fields from electrically large scatterers[J]. Chinese journal of radio science, 2018, 33(6): 635-641. (in Chinese)
- [6] WEINMANN F. Ray tracing with PO/PTD for RCS modeling of large complex objects[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2006, 54(6): 1797-1806.
- [7] LING H, CHOU R C, LEE S W. Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity[J].
 IEEE transactions on antennas and propagation, 1989, 37(2): 194-205.
- [8] KEE C Y, WANG C F. Efficient GPU implementation of the high-frequency SBR-PO method[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2013, 12: 941-944.
- [9] GAO P C, TAO Y B, BAI Z H, et al. Mapping the SBR and TW-ILDCs to heterogeneous CPU-GPU architecture for fast computation of electromagnetic scattering[J]. Progress in electromagnetics research, 2012, 122: 137-154.
- [10] WU Y, ZHU Q, WANG S, et al. Accelerated SBR method based on MPI for electromagnetic scattering problems[C]//2024 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China).
- [11] WEI P B, ZHANG M, NIU W, et al. GPU-based combination of GO and PO for electromagnetic scattering of satellite[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2012, 60(11): 5278-5285.
- [12] KIRIK Ö, ÖZDEMİR C. Accelerating the shooting and bouncing ray based electromagnetic scattering calculations via CPU and GPU implementations: application to PRED-

ICS tool[J]. Advances in engineering software, 2024, 193: 103649.

- [13] 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.
- YIN X, ZHANG R, DING C, et al. Fast physical optics integrated based on Vulkan ray tracing [C]//2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), IEEE, 2024.
- [15] TAO Y, LIN H, BAO H. GPU-based shooting and bouncing ray method for fast RCS prediction[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2009, 58(2): 494-502.

作者简介

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。E-mail: sfwang@cumt. edu.cn

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

贾浩文 (1998—),中国矿业大学博士研究生, 研究方向为电磁散射建模及合成孔径雷达成像技 术。E-mail: jhwxx@foxmail.com

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