

# 复杂目标雷达散射截面快速计算方法研究

叶 朋

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

**【摘要】**：电大复杂目标雷达散射截面快速计算是电磁散射特性分析与工程应用的重要内容，传统计算方法存在效率偏低、硬件适配性不足等问题。针对上述瓶颈，提出基于 Vulkan 架构的快速计算方法，利用硬件光线追踪优化射线追踪过程，通过双命令缓冲机制提升 CPU 与 GPU 协同工作效率，依托任务划分实现多 GPU 并行计算。该方法能够有效提升电大复杂目标电磁散射的计算速度与资源利用率，保证计算精度满足工程使用需求，为复杂目标雷达散射截面高效求解提供可靠技术支撑。

**【关键词】**：雷达散射截面；弹跳射线法；Vulkan；GPU 加速

DOI:10.12417/3041-0630.26.08.026

电大复杂目标的雷达散射截面计算在航空航天、国防军工等领域具有重要工程价值。随着目标结构日趋复杂、工作频率不断提升，传统数值方法与 CPU 并行方案面临计算量大、耗时过长、扩展性不足等局限。现有 GPU 加速方案多依赖专用平台，难以充分发挥硬件光线追踪性能。为突破上述瓶颈，本文基于跨平台低开销的 Vulkan 架构，结合弹跳射线法开展高效电磁散射计算研究，通过硬件加速与并行机制优化，提升复杂目标 RCS 计算效率，为高频电磁散射快速仿真提供可行技术路径。

## 1 复杂目标雷达散射截面计算面临效率瓶颈

电大尺寸复杂目标的雷达散射截面计算过程中，目标几何结构精细、网格单元数量庞大，高频电磁散射的射线追踪与场值积分运算量随频率与网格密度提升呈指数级增长，对计算资源、存储容量与算力水平均提出极为严苛的要求。传统数值方法在处理电大目标时，计算复杂度与存储需求随模型规模持续攀升，运算耗时急剧增加，难以满足工程应用中的快速仿真需求<sup>[1]</sup>。基于 CPU 的串行与多核并行计算模式，普遍存在线程资源竞争、计算负载不均衡、进程间通信同步开销大等突出问题，射线与复杂曲面的求交过程效率低下，成为制约整体计算速度的关键环节。

## 2 基于 Vulkan 与 GPU 加速实现快速计算

### 2.1 Vulkan 架构下射线追踪计算流程设计

Vulkan 架构依托低开销显式资源管理模式，搭建适配 SBR 算法运行逻辑的射线追踪全流程计算体系。以虚拟孔径面作为核心运算载体，完成复杂目标三维几何顶点向二维投影平面的精准坐标转换，射线管束划分步长严格控制为波长的 1/10，从参数层面保障电磁散射仿真的基础计算精度。整体流程依托 Vulkan 计算着色器实现多线程独立处理单组射线管束，线程分配数量与射线管束数量保持完全匹配，同时将射线最大反射次数统一设定为 10 次。借助命令缓冲显式录制与批量提交的运

行机制，把高频接口调用产生的性能开销降至最低，让 GPU 硬件计算资源始终维持较高利用水平，顺畅完成射线传播路径推演、反射状态判断、场值数据更新与远场积分求解的全流程连续执行，为电大尺寸复杂目标 RCS 快速求解构筑稳定可靠的底层执行框架。见图 1。

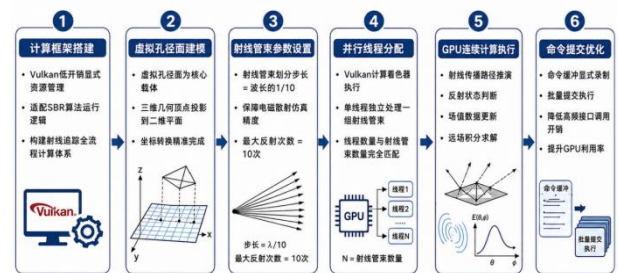


图 1 基于 Vulkan 的弹跳射线法 RCS 快速实现流程

### 2.2 硬件加速射线求交技术实现

依托 Vulkan 硬件光线追踪接口构建 BLAS 底层加速结构与 TLAS 顶层加速结构，实现复杂几何模型的层级化组织与高效封装。BLAS 用于存储模型三角面元顶点坐标与轴对齐包围盒信息，完成单模型几何数据的快速索引与定位，TLAS 负责完成多 BLAS 实例的空间变换与场景层级管理，大幅减少射线遍历过程中的无效计算，将整体射线遍历耗时降低一个数量级。

### 2.3 多 GPU 协同并行计算机制构建

以虚拟孔径面均等分割为依据，建立无耦合多 GPU 任务分配机制，将完整的电磁散射计算任务拆解为互不干扰的独立子任务模块，从任务源头消除设备间的数据竞争与同步等待<sup>[2]</sup>。双 GPU 并行模式下，各子任务独立完成射线生成、多次反射、射线分裂及远场 RCS 积分运算，全程不存在数据依赖与额外通信开销，保持计算过程的纯净并行状态。配合双命令缓冲机制，CPU 与 GPU 实现高效异步并行工作，显著提升多角度扫描执行效率。主机端负责完成所有子任务结果的统一汇聚与数

据整合,实测双GPU并行效率突破90%,可稳定支撑数万扫描角度、百万级网格规模的大电复杂目标高效计算,在工程化快速仿真场景中具备突出的可扩展应用价值。

### 3 快速计算方法的精度与性能验证

#### 3.1 仿真条件设置

为验证所提方法的计算精度与运行效率,选取直升机和战斗机两类具有代表性的电大复杂目标作为仿真对象,分别对应不同网格规模与几何结构特征,能够全面覆盖工程中典型的电磁散射计算场景。仿真过程严格遵循高频电磁散射计算规范,对核心参数进行统一设定,在保障计算精度的同时,确保各对比场景的参数一致性。射线管束划分依据波长进行合理设置,射线最大反射次数按工程常用标准确定,单站雷达散射截面扫描角度覆盖全空间范围,角度步长满足精细求解要求。计算频率选取多个典型频点,覆盖低频至高频区间,形成多频段、多角度的完整测试条件。通过标准化的仿真条件设置,保证实验结果具备可比性与说服力,可客观反映方法在不同场景下的实际性能与工程适用性。

#### 3.2 计算结果精度对比分析

将所提方法计算结果与主流电磁仿真商业软件进行定量比对,直升机模型在1GHz频率条件下,计算得到的单站雷达散射截面结果与FEKO RL-GO、HFSS SBR+两种方法保持高度一致的变化趋势,平均绝对误差稳定控制在1.8dB以内。战斗机模型在6GHz、12GHz、48GHz三个典型频率点下,与商用软件计算结果的平均绝对误差依次为1.5dB、2.5dB、2.1dB,整体误差水平平均满足工程实际计算的精度要求。不同频率、不同结构类型的复杂目标算例中,散射曲线走势与峰值分布均高

度吻合,充分表明基于Vulkan的SBR计算方法可准确复现复杂目标电磁散射分布特征,在各类高频仿真场景中具备可靠的数值计算稳定性与通用性。

#### 3.3 算法计算效率与资源占用测试

在不同频率下开展效率对比测试,6GHz时所提方法计算时间仅1.5秒,较FEKO RL-GO加速约84倍,较OMP SBR加速约16倍,在48GHz高频场景下依旧保持39倍以上的加速效果。双命令缓冲机制有效优化了CPU与GPU的协同工作模式,使多角度扫描计算耗时由115.59秒降至66.83秒,整体计算效率提升约42%<sup>[3]</sup>。双GPU并行计算时,12GHz与48GHz频率下耗时分别降至2.6秒与40.7秒,并行效率超过90%。战斗机模型峰值内存占用383MB、显存156MB,直升机模型峰值内存350MB、显存149MB,资源占用量仅随模型网格规模变化,不随计算频率提升而显著增加,整体呈现出稳定高效的资源利用特性,能够适配大规模电磁散射计算的工程应用需求。

### 4 结语

针对电大复杂目标雷达散射截面计算效率不足的问题,基于Vulkan架构搭建的SBR快速计算体系,可充分发挥硬件光线追踪与多GPU并行的算力优势,有效缓解传统方法在大规模模型与高频场景下的计算压力。双命令缓冲机制与多设备任务划分显著提升了计算资源利用率,使整体流程具备更强的稳定性与扩展性。该方法在保证工程计算精度的前提下大幅缩短仿真耗时,能够适配复杂结构电磁散射特性分析需求,为隐身设计、目标识别等相关领域提供高效可靠的仿真支撑,具备良好的理论参考价值与工程应用前景。

### 参考文献:

- [1] 李潜龙,吴语茂,窦玉莹.计算电大尺寸目标的新型多层快速物理光学高效算法[J].电波科学学报,2025,40(01):96-103.
- [2] 王攀,王仲根,孙玉发,等.新型压缩感知计算模型分析三维电大目标电磁散射特性[J].物理学报,2023,72(03):54-61.
- [3] 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(03):457-463.