

复杂场景下快速射线追踪电波传播 技术研究

开题论证报告



北京邮电大学电磁环境测试评估实验室

二零一九年二月

目录

第一章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 研究现状	1
1.3 研究工作小结	2
第二章 项目内容	3
2.1 项目主要技术	3
2.2 技术路线	3
2.2.1 基于射线追踪的不规则地形电波传播精确预测技术	3
2.2.2 基于射线追踪的复杂大气环境电波传播精确预测技术	3
2.2.3 基于辐射源分割优化及地形剖分优化的射线追踪加速技术	4
2.2.4 基于快速判交算法的射线追踪加速技术	4
2.2.5 基于 GPU/CPU 的射线追踪并行加速技术	4
第三章 研究目标	6
3.1 功能目标	6
3.2 性能目标	6
第四章 研究成果	7
4.1 云雾衰减	7
4.1.1 背景	7
4.1.2 理论基础	7
4.1.3 计算衰减模型	8
4.1.4 模型验证	10
4.1.5 总结	11
4.2 树冠衰减	11
4.2.1 背景	11
4.2.2 理论基础	12
4.2.3 结果分析	13
4.3 电离层衰减	14
4.3.1 背景	14

4.3.2 内部分层	15
4.3.3 电离层模型	17
4.3.4 射线追踪	19
4.3.5 衰减	21
4.3.6 总结	22
4.4 快速判交算法	22
4.4.1 层次包围盒	22
4.4.2 包围盒算法 (BVH)	23
4.4.3 分割边界包围层次结构 (SBVH)	25
4.4.4 射线与包围盒的相交算法	27
4.5 GPU 加速	28
4.5.1 GPU 加速原理	28
4.5.2 CUDA 介绍	29
4.5.3 OPTIX 引擎	30
4.5.4 场景管理	32
第五章 研究计划	35

第一章 绪论

1.1 研究意义

当今世界，随着无线传输技术的迅速发展以及电子设备的大规模运用，大量电磁信号在空间、时间和频域上混叠，互相影响，构成了复杂的电磁环境。目前，不论是在军事领域，还是在民用领域，对复杂电磁环境的预测和分析都是研究的热点问题，而利用电磁仿真方法预测分析复杂电磁环境是目前采用的主要手段之一。

但由于实际的需要，复杂电磁环境的应用及分析场景通常是在多种空间下，如高楼林立及街道纵横的城市场景；或者是在几公里甚至几十公里的野外场景。在高频条件下，这种大场景的模拟就成为了超大尺度的仿真计算，这对目前已有的数值仿真算法及计算机软件提出了巨大的挑战，利用时域有限差分法（FDTD）、有限元法（FEM）等基于网格剖分的常用数值方法已经不能得到收敛的结果，更谈不上快速实时地预测分析。因此寻求快速准确的复杂电磁环境预测计算方法具有非常重要的研究意义。

1.2 研究现状

目前的复杂电磁环境仿真面临着许多问题，其中由于仿真环境的复杂性导致的实时仿真耗时长、速度慢的问题最受人关注。针对这一现状，国外军事部门及研究机构对复杂电磁环境的预测进行了大量的研究，实现了显示功能强大的战场推演系统，开发了融建模、仿真及显示功能为一体的商业软件 Wireless InSite，还利用各种数值方法研究了不同场景下的电磁环境。其中具有强大显示功能的战场推演系统包括美国开发的 SIMNET 虚拟战场环境系统和分布式的 NPSNET-V 系统，以及英国开发的 AVIARY 系统，这些系统能够根据已知的电磁场分布数据进行虚拟战场的构建及显示，为战略部署提供指导，但它们自身并不具备电磁仿真的能力。为了解决这个问题，美国 RECOM 公司开发了集建模、仿真及显示为

一体的商业软件 Wireless InSite，该软件在 3D 模型下利用射线弹跳法为内核进行计算，在普通场景下具有很快的计算速度，但对于数十公里甚至上百公里的场景计算速度很慢，并且它不支持并行和数据库操作。此外，国外有的专家学者还利用时域有限差分法、有限积分法等数值方法研究了汽车和飞机机舱内的电磁环境，以及室内环境下的电波传播；并采用射线追踪、等效原理及格林函数等方法计算了城市环境的无线电波传播。

在国内，目前还没有融建模、计算及显示为一体的完整仿真系统。显示方面，具有代表性的有北京航空航天大学研发的 DVNET 系统和国防科技大学开发的 SIM2000 空军战役推演系统。建模和计算方面，上海交通大学利用空间分区的方法对射线追踪法进行了加速，并对数据存储结构进行了改进，以射线分割的思想设计了基本的并行系统进一步提高速度，但他们的算法目前主要应用在 2D 和 2.5D 的仿真计算中，并未在 3D 场景中进行验证，而 3D 场景下射线数量会大大增加，这对算法的效率提出了挑战。国防科技大学研究了空间分区算法，对射线追踪的数据存贮进行了改进，提出了射线跟踪八叉树法，但该方法只能节省一半的时间，并且主要应用于城区小区环境，如果应用于几十公里的计算区域，运算速度仍然有限。除此以外，他们还提出了用三维抛物方程预测城市电波传播特性，但由于采用了步进迭代的方法，因此主要适用于城市微蜂窝这样的场景，不能用于几十公里超大尺寸的电磁仿真。北京工业大学基于理论公式计算了空间电磁场分布，采用了简化的计算模型，在复杂环境下具有一定的局限性。

1.3 研究工作小结

针对上述问题，本项目提出适应不规则地形、非均匀大气环境条件下的射线追踪精确预测技术，基于辐射源分割优化、地形剖分优化、快速判交的射线追踪加速技术，及以 GPU 架构为基础的射线追踪并行加速技术。在我国，复杂电磁环境预测作为一个新兴的研究方向，正处于发展阶段。建立快速准确的复杂电磁环境预测方法既能使我国研究与国际先进技术接轨，提高我国的军事作战能力，为战略部署提供参考；又能使国家无线电管理局、环保局等管理部门预先了解电磁环境分布情况，为治理电磁污染、保障公众健康安全、提高社会和谐提供有效手段。因此本项目的研究既具有一定的理论意义，又具有很强的实际应用价值。

第二章 项目内容

2.1 项目主要技术

为了适应复杂电磁环境及各种空间场景下的电磁环境，本项目提出以下几点技术：

1. 基于射线追踪的不规则地形电波传播精确预测技术；
2. 基于射线追踪的非均匀大气环境电波传播精确预测技术；
3. 基于辐射源分割优化及地形剖分优化的射线追踪加速技术；
4. 基于快速判交算法的射线追踪加速技术；
5. 基于 GPU/CPU 的射线追踪并行加速技术。

2.2 技术路线

2.2.1 基于射线追踪的不规则地形电波传播精确预测技术

研究在非规则地形环境（包括城市、山川、河流、沙漠等）中的电波传播精确预测技术，基于自适应射线加密，同时考虑直射、反射、绕射及散射等各种传播效应，不仅考虑射线追踪的路径，而且还须考虑射线穿过一定的自然环境时所要发生特定的能量损失，从而更精确地追踪射线经过的所有路径，提高复杂地形条件下的电波传播预测精度。

2.2.2 基于射线追踪的复杂大气环境电波传播精确预测技术

研究复杂大气结构中的电波传播精确预测技术，考虑大气环境中云、雨、雾及电离层等媒质对射线传播过程中的各种影响，提高大气环境中射线追踪的计算精度。

为了精确计算电磁波传播产生的衰减，在电磁波传播的整个路径中，通过空气区域与通过云雾区域的路径分开计算，采用不同的计算衰减公式。对射线传播的衰减进行精确计算，有助于分析射线传播的能量衰减情况，对复杂大气环境中一定距离下是否能够接收到射线进行精确判断。

复杂大气环境除了云雾，还包括电离层。通过对射线追踪算法和电离层模型的研究，提出更加优化的追踪方法，有利于提高算法的准确性和效率。

2.2.3 基于辐射源分割优化及地形剖分优化的射线追踪加速技术

1. 基于辐射源分割优化的电磁环境计算加速技术

为解决大场景下辐射源数量多，逐一计算耗时长的问题，根据一定的准则，结合收、发天线方向图特点对各辐射源发射的射线进行优化分割，在保证精度的同时减少计算量。

2. 基于地形剖分优化的电磁环境计算加速技术

通常所采用的地理模型是由大量三角面组成的不规则地形，并且建筑物也通常以三角面的形式进行剖分，三角面的个数决定了射线与地形及建筑物求交运算的次数，从而决定了算法的运算时间。为解决大场景下射线追踪方法三角面元数量大、追踪过程计算量大的问题，结合多尺度网格剖分预处理技术减少三角面元数。在选定地形区域后，结合地形特点，根据一定的准则，自适应地对区域内的地形进行多尺度剖分预处理，生成多尺度剖分网格，达到降低后续计算量的效果。

2.2.4 基于快速判交算法的射线追踪加速技术

利用层次包围盒等新型射线追踪加速技术，减少无效判交次数，加速射线追踪计算。为了实现这一目标，以构建场景层次二叉树为方法，优化数据结构模型。其中我们采用了新型的层次包围盒算法，极大地减少了重复引用次数和重叠率，将射线追踪时场景遍历次数降至最低，以达到提高计算效率的目的。

2.2.5 基于 GPU/CPU 的射线追踪并行加速技术

为解决大场景下地形网格数量多、辐射源数量多造成的计算量剧增的问题，研究基于 GPU 的并行计算方法。由于电磁仿真计算过程中需要面对大量的数据，根据电磁波传播特性，可将需计算内容视为相互独立个体，充分利用 GPU 适合于大规模并行运算、可以平行处理大量琐碎信息的特点。通过对发射射线并行分

配到 GPU 中的各个线程,同时对线程内的数据进行计算,并平衡计算单元负载,优化并行效率,减少计算时间,达到最终刷新时间的指标要求。

第三章 研究目标

3.1 功能目标

1. 模型组件能支持实际地形地貌、大气环境（对流层、电离层）下的射线追踪电磁计算（需考虑直射、反射、绕射、散射机理贡献），能输出各射线单独的路径损耗及考虑收发天线方向图特性后的总的传输损耗,能够求解辐射源信号在空间的功率分布和接收端的信号强度、时延、多普勒频偏等参数；
2. 模型组件需适用于动态场景下的陆陆、陆空、海空、空天电波传播预测；
3. 仿真结果能从时空频能多维度进行展示；
4. 模型组件具备与基础仿真平台联动的能力，具备接收外部的实时场景数据进行动态计算的能力；
5. 支持完成算法集成；
6. 模型组件采用 C/C++/C#语言开发；
7. 具备形象场景展示的能力。

3.2 性能目标

1. 工作频段：20MHz~60GHz；
2. 场景区域：不小于 150km（长） 150km（宽） 1000km（高）；
3. 辐射源数目大于 1000，仿真模拟精度优于 6 dB；
4. 在指标（1）至（3）给定的限制条件下，电磁环境仿真生成时间小于 180 秒，刷新时间 10 秒。

第四章 研究成果

4.1 云雾衰减研究

4.1.1 背景

大气衰减是指电磁波在大气中传播时发生的能量衰减现象。各种波长的电磁波在大气中传播时，受大气中气体分子、水汽凝结物及悬浮微粒的吸收和散射作用，形成了电磁波辐射能量被衰减的吸收带。对流层传播问题是科学规划和设计地空通信系统的必要因素。为了精确计算电磁波传播的衰减，必须分析电磁波在对流层大气中传播路径上主要因素的影响。在电磁波在空气传播的正常衰减外，在云雾、雨区中传播会产生更大的衰减。因此为了准确计算电磁波在传播衰减的精确值，需要对电磁波在云雾、雨区中传播产生的衰减进行单独计算。

4.1.2 理论基础

1. 粒子散射

在复杂环境下，由于粒子含量与大气不完全一致，这是电磁波在传播的过程中产生更大衰减的最主要原因。粒子的散射计算方面的研究最早可以追溯到1908年 Mie 提出的、Trantton 总结的均匀球体散射粒子的散射计算。瑞利散射理论与米氏散射理论可以计算包括“大”、“小”球形粒子在内的球形粒子散射。通过以上理论可以进而求出在复杂环境下的衰减。

云层液滴与雨滴等多种颗粒是引起电磁波传播产生衰减的主要原因。这些颗粒的光学参数由气象数据和相关文献确定。对流层中的气溶胶具有不同的起源和不同的形状以及大范围的分布，簇的小半径为 $100\ \mu\text{m}$ 。半径小于的粒子 $0.1\ \mu\text{m}$ 通常被称为 Aitken 核，那些半径为 $0.1\text{-}1\ \mu\text{m}$ 的粒子为大颗粒，大颗粒的粒子都被认为是阴霾。由于颗粒较大，会使得云层透光性差。雾是大气中最常见的自然现象，主要由极细粉尘，小盐晶粒和一些由分散在空气中的细颗粒组成的燃烧产物组成。潮湿的水蒸气凝结在雾状颗粒上，自然吸收水分，扩大蒸汽并形成凝结的核。当团聚核心的半径逐渐增加到 $1\ \mu\text{m}$ 时形成雾。雾发生在靠近地面的大气

中，它是一个胶体系统，由微小的水滴或冰晶组成，慢慢沉淀在地面附近的空气中，是水蒸气在空气中凝结的产物。不同粒子的直径是不一样的，所以应当根据不同粒子的直径采用不同的散射方法。当粒子直径远远小于电磁波波长时则视为瑞利散射；当粒子直径约等于电磁波波长时则视为米氏散射。

2. 云层基础

云层通常是指成层的云，它是由水汽蒸发遇高空冷空气凝结累积而成。云层主要分两大类——积云、层云，积云包括卷积云、高积云、积雨云、积云，层云包括卷层云、高层云、雨层云、层积云、层云。

云的组成成分，随温度变化而变化。温度在摄氏零度以上，完全由水滴组成。温度在零到零下十五度之间时，则由过冷水滴及小部分的冰晶所组成；过冷水滴是温度在零度以下仍未冻结的水滴，纯净的水常有这个现象。温度低于零下十五度，则几乎全由冰晶组成，有时也有少量的过冷水滴。

云层出现的高度可从 500 米到达 2 万米，不同高度的云含水量也不一样。积云的含水量一般较其它云的含水量大，平均为 $2\text{ g} / \text{m}^3$ ，最大可达到 $25 \sim 30\text{ g} / \text{m}^3$ ，云滴谱随云型和所处云中高度都有很大变化，晴天积云的云滴半径为 $3 \sim 33\text{ }\mu\text{m}$ ，而浓积云和积雨云的云滴半径为 $3 \sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 。

4.1.3 计算衰减模型

1. ITU-R 模型

ITU（国际电信联盟）是联合国的一个重要专门机构，ITU 的组织结构主要分为电信标准化部门（ITU-T）、无线电通信部门（ITU-R）和电信发展部门（ITU-D）。

根据 ITU-R.840-7 建议书，提供了预测地对空路径上云雾引起的衰减的方法。该建议书提供了 10GHz 以上频率地对空无线通信系统的设计指导。云层衰减对于 10GHz 以上微波系统而言尤为重要。

对完全由小于 0.01 cm 的小水滴组成的云或雾而言，瑞利近似计算对最高达 200 GHz 的频率均适用，特定的云或雾中的具体衰减量可表示为：

$$\gamma_c(f,T)=K_1(f,T)M \quad (\text{dB/km})$$

其中：

γ_c ：云中比衰减量（dB/km）

K_l ：云中液态水比衰减系数（(dB/km)/(g/m³)）

M：云或雾中的液态水密度（g/m³）。

f：频率（GHz）

T：云中液态水温度（K）。

在约 100 GHz 或以上频率，雾衰减可能非常显著。对中等雾而言，雾中液态水密度通常为约 0.05 g/m³（能见度约为 300 m），浓雾则为 0.5 g/m³（能见度约为 50 m）。

（一）云中液态水比衰减系数

基于瑞利散射原理，将双德拜模型求出的水滴的介电常数 $\epsilon(f)$ ，代入到下面公式中，可以计算 K_l 的值：

$$K_l(f, T) = \frac{0.819f}{\epsilon''(1 + h^2)} (\text{dB/km})/(\text{g/m}^3)$$

其中 f 是频率（GHz），以及：

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''}$$

水的复介电常数可表示为：

$$\begin{aligned}\epsilon''(f) &= \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s[1 + (f/f_s)^2]} \\ \epsilon'(f) &= \frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{[1 + (f/f_s)^2]} + \epsilon_2\end{aligned}$$

其中：

$$\epsilon_0 = 77.66 + 103.3(\theta - 1)$$

$$\epsilon_1 = 0.0671\epsilon_0$$

$$\epsilon_2 = 3.52$$

$$\theta = 300 / T$$

其中 T 是液态水温度（K）。

主要弛豫频率 f_p 和次要弛豫频率 f_s 为:

$$f_p = 20.20 - 146(\theta - 1) + 316(\theta - 1)^2 \text{ (GHz)}$$

$$f_s = 39.8f_p \text{ (GHz)}$$

2. 基于 ITU-R 模型的化简模型

云或雾中的具体衰减量可表示为:

$$A_w(f) = a_w(f)W \text{ (dB/km)}$$

其中:

$$a_w(f) = \frac{0.819(a f^b + c f^{d+e})}{\varepsilon''(1+\eta^2)} \text{ (dB/km)/(g/m}^3\text{)}$$

其中:

ε' , ε'' 的计算均与 ITU-R 模型相同, 且在 0°C 时取值。

$a=0.0155$, $b=1.668$, $c=14.8523$, $d=0.3885$, $e=-27.4863$

4.1.4 模型验证

根据论文《Cloud Attenuation for Satellite Applications Over Equatorial Climate》测量出的云衰减量将多种模型预测衰减进行对比, 其误差如表 I 所示:

表 I 误差分析

Model	ITU-R	Dintelmann and Ortgies 模型	Altshuler and Marr 模型	ITU-R 改进模 型
Error(dB)	0.06	0.32	0.44	0.5

根据表 I 的误差分析结果, ITU-R 模型的误差仅有 0.06dB, 而基于 ITU-R 改进的模型却有 0.5dB 的误差, 这充分说明 ITU-R 在计算云雾衰减时, 结果更准确, 但是改进模型可以减少输入参数。当不能准确知道云层温度时, 可以采用改进模型计算。通过图 1, 可以进一步比较各种模型的准确性。

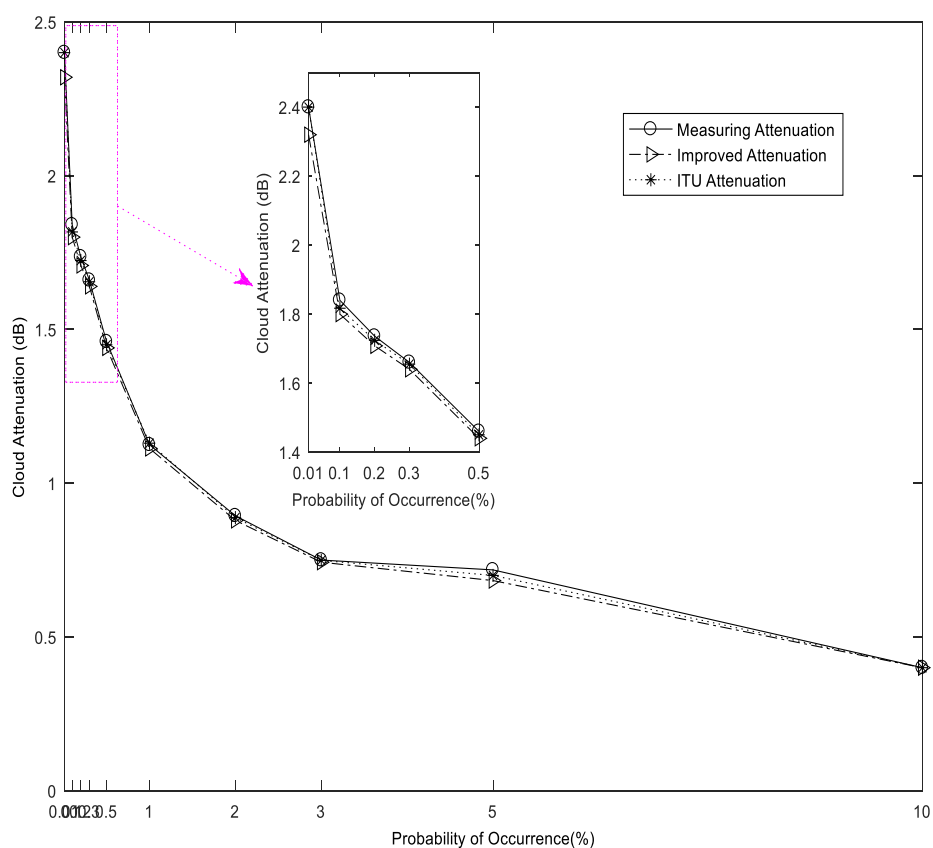


图 1.各模型与测量云衰减值的对比

4.1.5 总结

ITU-R 模型是基于大量观测所得数据而制定的修订公式。在长达一年的观测中，记录了大量的数据，将全球一年的气候、风、温度等多种因素全部考虑其中，经过拟合得出了 ITU-R 模型。ITU-R 模型计算结果误差小，适用范围广，可以在高达 1000GHz 条件下使用。基于上述原因，在本项目射线追踪过程中，拟采用 ITU-R 模型进行云雾衰减的计算。

4.2 树冠衰减

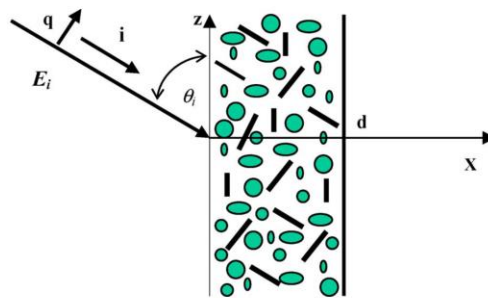
4.2.1 背景

在目前射线追踪的研究中，大部分的射线只针对在真空或者大气中的追踪，

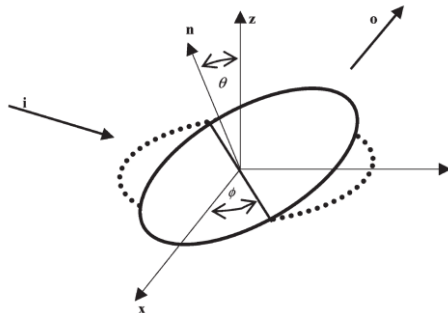
从而忽略了在很多情况下射线能量的损失。在许多情况下，这种忽略确实满足要求。但是如果需要更高的精确度，在射线追踪过程中，不仅需要考虑射线追踪的路径，而且还需考虑射线穿过一定的自然环境时所发生的能量损失，从而更精确地追踪射线经过的所有路径。本研究主要考虑树木所导致的能量损耗。

4.2.2 理论基础

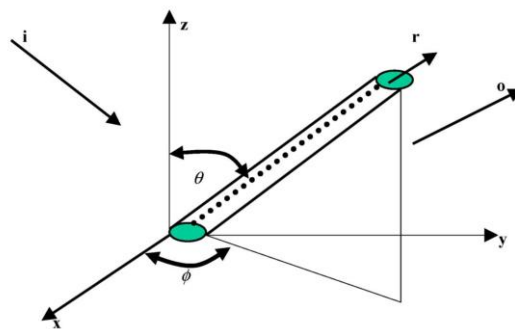
将树木冠层近似等效为厚度为 d 的一个面板，射线入射方向为 i ，与面板的夹角为 θ_i



将冠层叶子等效为圆盘，厚度为 t ，半径为 a_d ，圆盘法线与 z 轴的夹角为 θ



将树冠树枝等效为圆柱，长度为 l ，半径为 a_c ，与 z 轴的夹角为 θ



经推导可得最终衰减公式为:

(1) 树叶衰减公式:

$$\alpha_{vv}^d = 8.686 \chi_r'' k_0 \rho_d \frac{\pi}{2} \frac{t a_d^2}{\sin \theta_i} \left[1 - \left(\frac{1}{2} \cos^2(\theta_i) I_1^d + \sin^2(\theta_i) I_2^d \right) \right]$$

$$\alpha_{hh}^d = 8.686 \chi_r'' k_0 \rho_d \frac{\pi}{2} \frac{t a_d^2}{\sin \theta_i} \left[1 - \frac{1}{2} I_1^d \right]$$

其中:

$$I_1^d = \int_{\theta_1^{(d)}}^{\theta_2^{(d)}} \sin^2(\theta) p^{(d)}(\theta) d\theta$$

$$I_2^d = \int_{\theta_1^{(d)}}^{\theta_2^{(d)}} \cos^2(\theta) p^{(d)}(\theta) d\theta$$

(2) 树枝衰减计算公式:

$$\alpha_{vv}^c = 8.686 \chi_r'' k_0 \rho_c \frac{\pi}{2} \frac{l a_c^2}{\sin \theta_i} \left[\frac{1}{2} \cos^2(\theta_i) I_1^c + \sin^2(\theta_i) I_2^c \right]$$

$$\alpha_{hh}^c = 8.686 \chi_r'' k_0 \rho_c \frac{\pi}{2} \frac{l a_c^2}{\sin \theta_i} \frac{1}{2} I_1^c$$

其中:

$$I_1^c = \int_{\theta_1^{(c)}}^{\theta_2^{(c)}} \sin^2(\theta) p^{(c)}(\theta) d\theta$$

$$I_2^c = \int_{\theta_1^{(c)}}^{\theta_2^{(c)}} \cos^2(\theta) p^{(c)}(\theta) d\theta$$

其中 χ_r'' 是 χ_r 的虚部, $\chi_r = \epsilon_r - 1$

$$\alpha_{hh} = \alpha_{hh}^d + \alpha_{hh}^c$$

$$\alpha_{vv} = \alpha_{vv}^d + \alpha_{vv}^c$$

4.2.3 结果分析

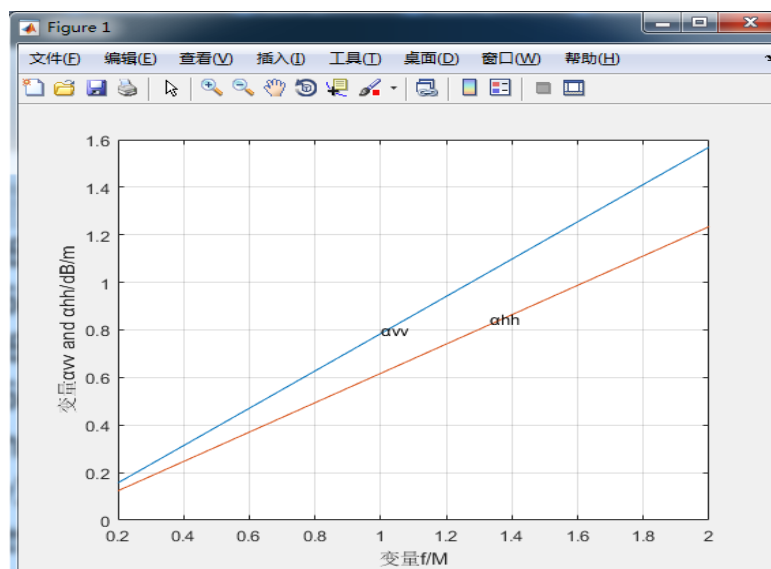
首先假设相对介电常数与频率独立 (在 800M~2000M 树叶与树干的相对介电常数变化很小)。对于树叶参数, 假设 $a = 5cm$, $t = 0.5mm$,

$\epsilon_r = 26 + 7i$, $\rho_d = 350/m^3$; 对于树枝参数, 假设 $a = 1.6cm$, $l = 50cm$,

$\epsilon_r = 20 + 7i$, $\rho_c = 2/m^3$, 设 $p(\theta) = \frac{1}{\theta_2 - \theta_1}$ 。

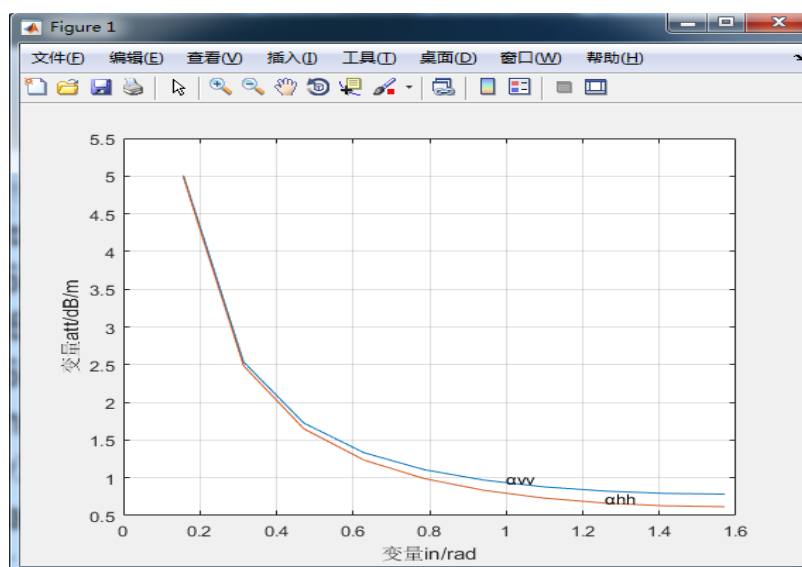
取 $\theta_1^{(d)} = 0^\circ$, $\theta_2^{(d)} = 180^\circ$, $\theta_1^{(c)} = 0^\circ$, $\theta_2^{(c)} = 60^\circ$ 。

(1) 当 $\theta_i = 90^\circ$ 时, 衰减随着频率的变化如下所示



从图中可以看出，入射波垂直极化比水平极化衰减更大，其原因在于叶子和分枝的统计分布与平面波的入射角有关。

(2) 当频率为 1000MHz 时，衰减随着入射角 θ_i 的变化如下所示



从绘制的曲线可以看出，不管入射波是水平极化还是垂直极化，衰减随着入射角的增大都是递减的，接近 1.4rad~1.6rad 时，衰减趋于稳定。

4.3 电离层衰减

4.3.1 背景

电离层是地球大气的一个电离区域，从 60km 起一直延伸到 1000 km 的高

度。（IRI 官网查到：白天：65-2000km，夜间：80-2000km）

电离层内电离度主要由获得的太阳辐射所影响，因此电离层随昼夜和季节而变化，而且太阳黑子等太阳活动也会对电离层产生影响。电离层是一种随机、色散及各向异性的媒质，电波在其中传播时会产生各种效应，如多径传输、衰减、极化面旋转等现象。不考虑地磁场有影响时，电离层即为各向同性媒质。通常用动态平衡下的电子密度 N （电子数/ m^3 ）来描述电离程度。

由于大量等离子体的存在，电离层能够反射和传送高频无线电信号。

电离层的测量一般通过垂测或者斜测。

1) 垂测电离图

电离层垂直探测是电离层研究中历史最悠久、至今仍然广泛使用的电离层地面常规探测方法。这种方法通过垂直向上发射频无线电脉冲，频率 f 在 1~30MHz 范围内变化（频率扫描），接收在不同频率上由电离层反射的回波（Echo），测量回波的传播时间 τ （Time of Flight），绘制出虚高（ $h' = c \tau / 2$ ）随频率变化的频高图（Ionogram），频高图一般为散点图。根据对频高图的度量分析，可以获得电离层特征参数，如 F 层临界频率 f_oF_2 ，最大电子密度 N_mF_2 ，以及探测点上空峰值高度；通过对物理模型的反演，也可获得电子密度随高度的一维分布，即电子密度剖面。

2) 斜测电离图

斜测方法是在地面向上斜投射高频无线电波信号，并在一定距离外接收电离层反射信号的探测方法。可以由斜测电离图计算出发射点与接收点的中间点的临界频率等电离层特征参数。

4.3.2 内部分层

太阳辐射对不同高度不同成分的空气分子电离造成电离层不同的分层，电离层分层在昼夜会有不同。

1. 分层

电离层自下而上主要分为 E、F1 层和 F2 层，以及偶尔出现的突发 E 层。

E 层高度位于 90~150km，最大电子密度 $N_{max} = 2 \times 10^{11}$ ，且稳定在 110km 处，E 层可反射几兆赫兹的无线电波。夜间电子密度降低一个数量级。偶尔出现 Es

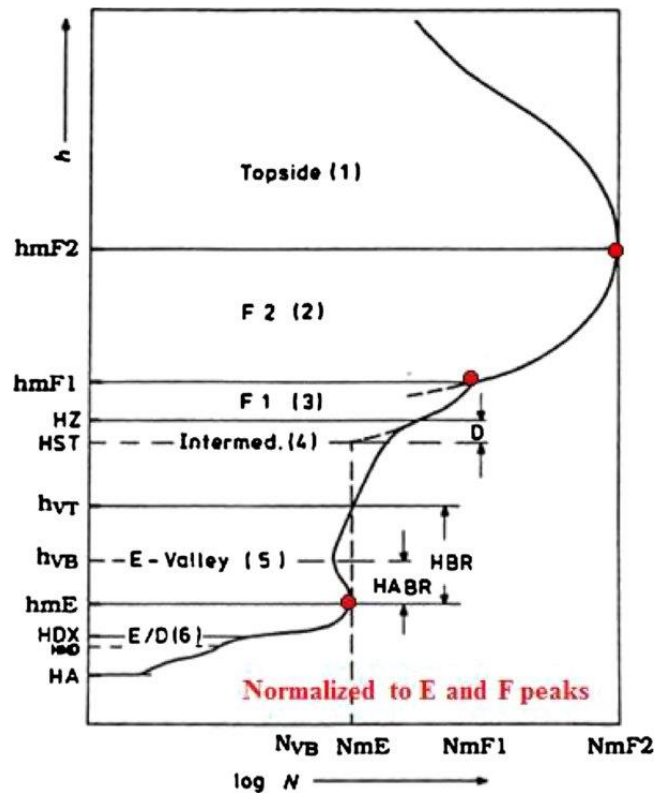
层。

Es 层即突发 E 层，有时在 E 层 120km 高度处会出现一大片不正常的电离层，其电子密度大大超过 E 层，有时比 E 层高出几个数量级，有时可反射 50~80MHz 的电波。但它通常仅存在几小时，研究中一般不考虑。

F1 层高度位于 170~220km，最大电子密度 $N_{\max}=2 \times 10^{11} \sim 4 \times 10^{11}$ ，冬季及夜间常消失。

F2 层高度位于 225~450km，最大电子密度 $N_{\max}=8 \times 10^{11} \sim 20 \times 10^{11}$ ，最大密度出现在 250~300km 处。F2 层电子密度最大，可反射电波的频率范围最宽，成为远距离电波通信最有效的反射层。F2 层变化不规律，与太阳活动有关，电子密度白天大，夜间小，冬季大，夏季小。

如图所示，以较为明显的 F2 层为例，电离层电子密度分布在 F2 峰值高度 $h_m F2$ 处达到其最高密度 $N_m F2$ 。



上图为 IRI 模型相关论文中图片，其中较为常用的计算参数为：

$N_m F2$ 、 $N_m F1$ 、 $N_m E$ 分别是 F2 层、F1 层、E 层的最大电子浓度值；

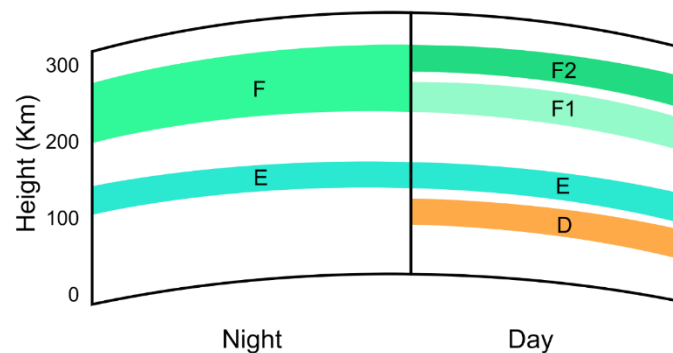
$h_m F2$ 、 $h_m F1$ 、 $h_m E$ 分别是 F2 层、F1 层、E 层最大电子浓度所在的高度；

NVB 是连接层的最小电子浓度值；

hVB 是连接层最小电子浓度值所在的高度。

2. 昼夜区别

电离层受太阳活动影响，所以有昼夜变化的特征。如下图所示，F1 层通常在夜间消失，而且 F2 层的最大电子浓度通常是白天较大，夜间较小。



4.3.3 电离层模型

为了更好的研究电离层，需要对电离层进行建模。电离层模型指的是对电波传播路径变化有直接影响的电子浓度高度剖面的数学描述。现阶段，被广泛使用的电离层模型主要包含以下两种：一种是在观测数据的长期积累中，经统计分析得到的经验模型，如国际参考电离层模型(IRI)，中国参考电离层模型(CRI)。另一种则是在分析电离层形成机制的基础上推导出的理论模型，如准抛物段模型(QPS)及修正 Bradley/Dundeney 模型。

1. 国际参考电离层模型 (IRI)

IRI 模型基于对电离层相关参数的可靠观测数据，观测数据来自地面站和卫星，通过统计学方法，获得电子密度的月平均值、电子温度、离子温度、离子成分以及海拔高度范围从 60 公里到 2000 公里的几个附加参数，是一种统计预报模式。IRI 模型是由空间研究委员会 (COSPAR) 和国际无线电科学联合会 (URSI) 于 60 年代末联合建立的，每四年更新一次，目前最新版本为 IRI 2016。可以通过 IRI 网站在线界面获得 IRI 模型的相关服务，IRI 模型的网址为：https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php。

它描述的是电离层平静期的平均状态，在全球范围内具有普遍适用性，输入

数据为地理经纬度、月份、本地时间，输出数据为电离层相关参量的垂直分布，其垂直步长可调。

作为经验模型，IRI 的优势在于它不依赖于电离层形成发展的理论基础，而是单纯基于对观测数据的统计分析。

IRI 的缺点是对底层数据库的强烈依赖。数据库未充分覆盖的区域和时间段将导致这些区域中模型的可靠性降低。例如在 IRI 模型建立早期，中国地区的数据并未被覆盖，导致采用 IRI 模型获得的数据可靠性较低，与实际测试的数据差距较大。IRI 模型没有对电离层电子浓度分布给出较为明确的公式，不便于进行电离层射线追踪的解析计算，并且由于其复杂性使得计算速度受到限制。

2. 准抛物段（QPS）模型

QPS 模型是一种电离层电子浓度垂直分布模型。该模型基于电离层的几个关键参数以及对电离层垂直分布的公式描述，得到电离层不同高度的电子浓度值。

该模型是从抛物模型演变而来，最初的抛物模型是较为简单的抛物函数，其数学表达较为简单，但是准确程度不高。后来增加了修正因子，改进为准抛物模型，模型变得更加准确，公式如下所示。

$$N_e = \begin{cases} N_m \left[1 - \left(\frac{r - r_m}{y_m} \right)^2 \left(\frac{r_b}{r} \right)^2 \right], & r_b < r < r_m \left(\frac{r_b}{r_b - y_m} \right) \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

在准抛物模型的基础上，考虑电离层垂直分布中的峰和谷以及不同的分层提出了准抛物段模型，针对电离层的不同分层进行研究，能够较为准确的描述出垂直分布的峰和谷，如下所示。

$$\begin{aligned} N_E &= a_E - b_E \left(1 - \frac{r_E}{r} \right)^2 \\ N_j &= a_j + b_j \left(1 - \frac{r_j}{r} \right)^2 \\ N_F &= a_F - b_F \left(1 - \frac{r_F}{r} \right)^2 \end{aligned}$$

其中，

$$\begin{aligned} a &= N_m \\ b &= N_m \left(\frac{r_b}{y_m} \right)^2 \\ a_j &= a_E \end{aligned}$$

$$r_j = \frac{r_F b_F (\frac{r_E}{r_E} - 1)}{a_F - a_E + b_F (\frac{r_E}{r_E} - 1)}$$

$$b_j = -r_F b_F \frac{(1 - \frac{r_E}{r_c})}{r_E (1 - \frac{r_E}{r_c})}$$

QPS 模型能够提供对电离层中电子浓度分布的表达式，可以用于射线追踪的解析计算，而且仅需要简单的输入即可进行快速的计算。

4.3.4 射线追踪

(1) 数值法

数值法是通过将 Haselgrove 方程组转化为如下所示的含有六个未知量的一阶偏微分方程组进行求解，获得电波传输路径上的各点，来表征轨迹的各个参量，连接各点就能获得电波的传输轨迹。

Haselgrove.J 射线微分方程组在球坐标系下化简后的形式如下：

$$\begin{cases} \frac{dr}{dP'} = \frac{c}{\omega} k_r \\ \frac{d\theta}{dP'} = \frac{c}{r\omega} k_\theta \\ \frac{d\varphi}{dP'} = \frac{c}{r\omega \sin\theta} k_\varphi \\ \frac{dk_r}{dP'} = -\frac{\omega}{2c} \frac{\partial X}{\partial r} + \frac{c}{r\omega} k_\theta^2 + \frac{c}{r\omega} k_\varphi^2 \\ \frac{dk_\theta}{dP'} = \frac{1}{r} \left(-\frac{\omega}{2c} \frac{\partial X}{\partial \theta} - \frac{c}{\omega} k_r k_\varphi + \frac{c}{\omega \tan \theta} k_\varphi^2 \right) \\ \frac{dk_\varphi}{dP'} = \frac{1}{r \sin \theta} \left(-\frac{\omega}{2c} \frac{\partial X}{\partial \varphi} - \frac{c}{\omega} k_r k_\varphi \sin \theta + \frac{c}{\omega} k_\theta k_\varphi \cos \theta \right) \end{cases}$$

其中 r, θ, φ 分别为电波在电离层中传输轨迹在球坐标的坐标； k_r, k_θ, k_φ 分别表示电波波矢的三个分量； P' 为群路径； ω 表示电波频率； X 为等离子体参量，其表达式为 $X=(fN/f)^2$ ； f_N 为等离子体频率。

该方程的初始条件如下：

$$\begin{cases} r = r_0 \\ \theta = \frac{\pi}{2} - \lambda_0 \\ \varphi = \varphi_0 \\ k_r = |\vec{k}| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) = \frac{\omega}{c} \cos \beta \\ k_\theta = -|\vec{k}| \cos \beta \cos \alpha = -\frac{\omega}{c} \cos \beta \cos \alpha \\ k_\varphi = |\vec{k}| \cos \beta \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \frac{\omega}{c} \cos \beta \cos \alpha \end{cases}$$

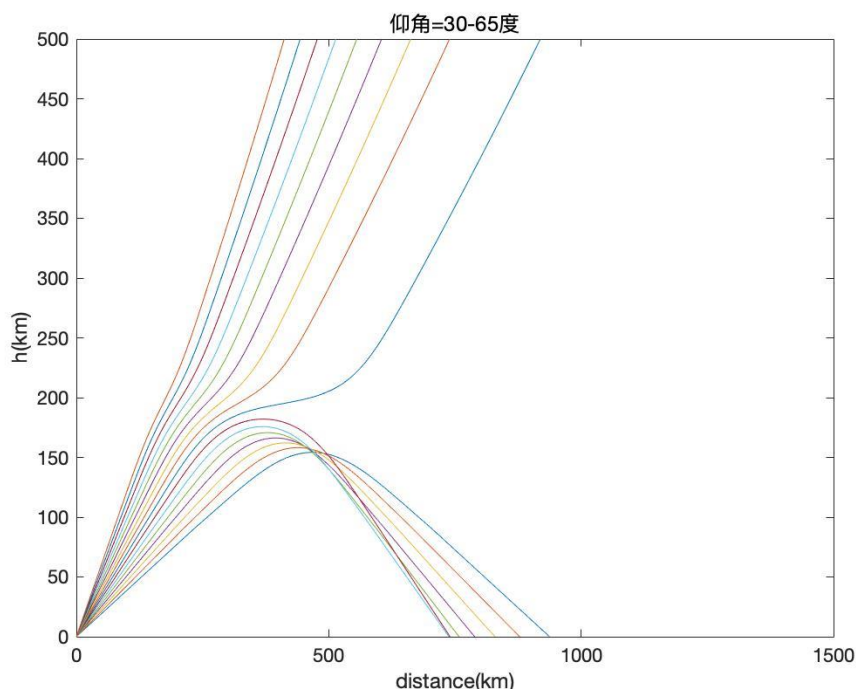
发射点经纬度分别是 λ_0 和 φ_0 。

其中 α 为发射方位角，从地面正北方向开始，顺时针旋转； β 为发射仰角。

在给定初始条件的情况下，使用龙格-库塔法求解，群路径每变化一个步长，便可通过计算得到射线路径的不同点的坐标矢量及波矢量，经过不断的迭代及射线描迹法，获得完整的传播路径及相关电波传播参数。

(2) 简单效果展示

固定方位角 α 时，三维路径的切面在考虑地球曲率之后可简化成二维图形，效果图如下：横轴为地面的水平距离，纵轴为垂直高度。具体参数为：频率 10MHz；方位角：正北，即 0° ；仰角： $30^\circ \sim 65^\circ$ ，间隔 2° ；经纬度：北京（ 40° ， 116° ）。



4.3.5 衰减

电磁波穿过电离层传播时，会引起电子运动，电子同其他粒子发生碰撞，部分能量转移到中性分子，最终变成热能，从而引起电磁波的吸收衰减。

电磁波在电离层传播的损耗计算可以采用经验公式进行，但是这种方法精度不高。还可以先对电磁波在电离层中的传播轨迹进行计算，通过轨迹上每一点的电子碰撞频率、电子密度和无线电波频率计算得到该点处的电离层吸收值，再沿电磁波传播轨迹对各点的电离层吸收值进行积分，从而得到整条射线的衰减值。

电磁波在介质中的吸收系数为

$$\beta = k_0 \chi = \frac{\omega}{c} \chi$$

其中 χ 是复折射指数的虚部，所以有

$$n^2 = (\mu - j\chi)^2 = 1 - \frac{X}{1 - jZ}$$

可以得到

$$\chi = \text{Im} \sqrt{1 - \frac{X}{1 - jZ}}$$

吸收系数为

$$\beta = \frac{\omega}{c} \text{Im} \sqrt{1 - \frac{X}{1 - jZ}}$$

其中

$$X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad Z = \frac{\omega_c}{\omega}$$

Im 是取虚部的运算， ω 是电磁波的角频率， ω_p 是等离子体角频率， ω_c 是电子碰撞角频率。

得到每一点的吸收系数之后，沿着路径进行积分，就可以得到电波在电离层中的衰减为

$$L = 8.68 \int_S \beta ds$$

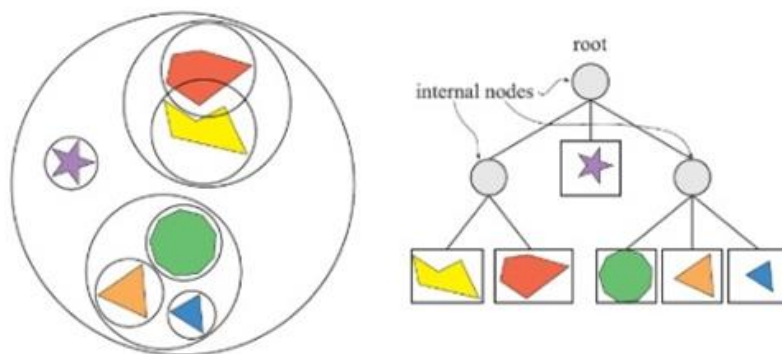
4.3.6 总结

实际应用中，可使用 QPS 模型与射线追踪方程组结合，使用龙格库塔法求解一阶微分方程组，可以计算得到射线路径的不同点的坐标矢量及波矢量，连接这些点就能够获得射线在电离层中传播的路径。在逐点计算路径时，可以同时计算出该点的衰减系数，在完成路径的计算后，对衰减系数沿路径进行积分，得到射线在电离层中的衰减。

4.4 快速判交算法

4.4.1 层次包围盒

层次包围盒是一种基于物体的场景管理技术，广泛用于碰撞检测，光线追踪，视锥体物体剔除等场合。对于三维场景的实时渲染来说，层次包围盒是最常用的数据结构。场景以层次树形结构进行组织，树中的每个节点，包括叶子节点都有一个包围体，可以将其子树的所有几何体包围起来，这就是层次包围盒名字的由来。如图所示：



场景构建工作考虑的是如何构造一棵可以有效描述当前场景信息的二叉树。其中的关键在于如何对（假定）毫无规律地散落在场景中的众物体进行划分。因此划分策略在构建树形结构过程中起到了至关重要的作用。

划分策略基本分为三种 `SPLIT_MIDDLE`，`SPLIT_EQUAL_COUNT`，`SPLIT_SAH`。

SPLIT_MIDDLE: 取中点划分的意思就是在先前选取的轴上找到最靠两侧的物体的包围盒，连接二者包围盒的重心得得到一条线段，取其中点作为划分点，中

点以左划分到左子树，中点以右划分到右子树；

SPLIT_EQUAL_COUNT: 按数量平分两棵子树，即左子树拥有的物体数量与右子树拥有的物体数量相等；

SPLIT_SAH: 表面积启发式算法，是目前应付于各种情况下最好的算法，同时也是性能最高、成本最低的算法。该算法基于的理论是复杂度成本分析和概率论。以下研究拟采用 **SPLIT_SAH** 方法。

4.4.2 包围盒算法 (BVH)

1. 基本原理

在划分完场景，得到二叉树后，需要做的工作便是将二叉树子节点上的基本几何体做包围盒算法，以加速各种射线追踪和碰撞检测方法。

包围盒算法是一种求解离散点集最优包围空间的方法。基本思想是用体积稍大且特性简单的几何体（称为包围盒）来近似地代替复杂的几何对象。

在碰撞检测中，为了加快碰撞检测的效率，减少不必要的碰撞检测，会使用基本几何体作为物体的包围体(Bounding Volume, BV)进行测试。基本包围体的碰撞检测相对来说简单很多，所以如果在基本包围体的碰撞检测中都没有通过的话，那么就没有必要进行更加复杂的碰撞检测了。

包围盒有两个属性：简单性和紧密性。

简单性是指包围盒间进行相交测试时需要的计算量，这不但要求几何形状简单容易计算，而且要求相交测试算法简单快速。

紧密性要求包围盒尽可能的贴近被包围的对象，这一属性直接关系到需要进行相交测试的包围盒的数目，紧密性越好，参与相交测试的包围盒数目就越少。

2. BVH 对比 kD-trees

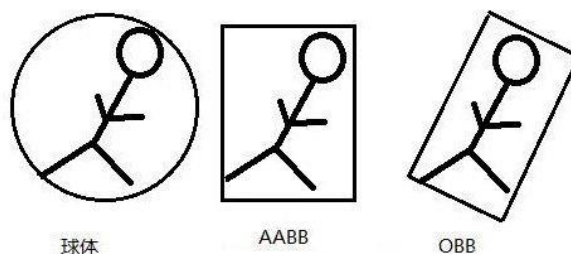
通常，使用 **kD-trees** 和包围盒 (BVH) 可实现最高的渲染性能。特别是 BVH 最近引起了越来越多的关注，原因有以下几点：**BVH** 构造简单，内存占用少，允许动画重新安装，并且能够很好地处理数据包跟踪问题。另外 **BVH** 在 GPU 架构上的表现往往优于 **kD-trees**，最突出的优点是 **BVH** 内存消耗少。

3. 各种包围体算法

对于不同性质，不同形状模型，需要根据情况选择不同的包围体，一般来

说，包围体分为如下常见的几种：Sphere， AABB， OBB， 8-DOP， Convex Hull。

主要介绍一下 Sphere， AABB， OBB 三种算法。



1) Sphere

又称包围球算法，首先需分别计算组成对象的基本几何元素集合中所有元素的顶点的(x, y, z)坐标的均值以确定包围球的球心，再由球心与三个最大值坐标所确定的点间的距离确定半径 r。包围球的碰撞检测主要是比较两球间半径和与球心距离的大小。

2) AABB

AABB 盒，一个 3D 的 AABB 就是一个简单的六面体，每一边都平行于一个坐标平面，矩形边界框不一定是立方体，它的长、宽、高可以彼此不同。

AABB 的重要性质：

$$X_{min} \leq X \leq X_{max}$$

$$Y_{min} \leq Y \leq Y_{max}$$

$$Z_{min} \leq Z \leq Z_{max}$$

特别重要的两个顶点为：(X_{min}, Y_{min}, Z_{min}), (X_{max}, Y_{max}, Z_{max})

中心点是两个顶点的中点，代表了包装盒的质点：

$$(\frac{X_{min}+X_{max}}{2}, \frac{Y_{min}+Y_{max}}{2}, \frac{Z_{min}+Z_{max}}{2})$$

AABB 的静态检测比较简单，检测两个静止包装盒是否相交，它是一种布尔测试，测试结果只有相交或者不相交。

3) OBB

OBB 这种方法是根据物体本身的几何形状来决定盒子的大小和方向，包围盒无须与坐标轴垂直。这样就可以选择最合适的最紧凑的包容盒子。OBB

盒子的生成比较复杂。一般是考虑物体所有的顶点在空间的分布，通过一定的算法找到最好的方向(OBB 盒子的几个轴)。

这种技术比 AABB 技术更精确而且更健壮，但 OBB 实现起来比较困难，执行速度慢，并且不太适合动态的或柔性的物体。特别注意的是，当把一个物体分得越来越小的时候，事实上是在创建一棵有层次的树。

4.4.3 分割边界包围层次结构 (SBVH)

BVH 作为现代射线追踪系统中加速结构的一种选择，和 kD-trees 都得到了广泛应用。然而，BVH 对非均匀镶嵌场景的适应能力较差，导致光线拍摄成本增加。因此我们采用了一种新的实用的 BVH 构造算法 SBVH，该算法利用类似于 kD-trees 的空间分割来解决这一问题。实际上该算法会产生比其他技术更有效的层次结构。

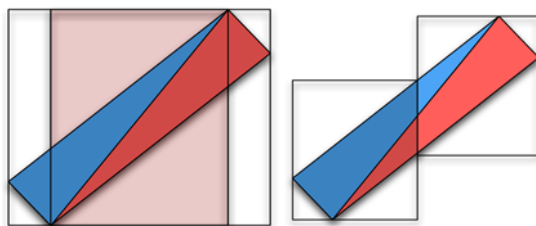
射线追踪数据加速结构分为两类：空间分割 (spatial partitioning) 和对象分割 (object partitioning)。kD-trees 使用前者，BVH 使用后者。

kD-trees 将每个基元都插入到它重叠的所有分区中，可能导致基元的多个引用，因此虽然能够适应高度变化的任意场景，但由于深树和高重复的引用，使得内存消耗极高。而在 BVH 中，每个基元恰好被引用一次，因此几乎对于所有场景，它的层次结构是由比 kD-trees 更少的节点组成，但会增加遍历次数，造成该方法效率也偏低。SBVH 通过综合上述两种分割方式，得到更加合理有效的数据层次结构。

1. SBVH 算法

- 1) 找到一个对象分割候选者。该步骤相当于 BVH 节点的传统拆分搜索；
- 2) 找到一个空间分割候选者。该步骤相当于于 kD 树构造算法中的分区过程；
- 3) 选择获胜候选者。根据成本开销，选择上述分割候选人的较低成本作为获胜者。如果不满足创建叶子的标准，则根据该候选者对节点进行分区。

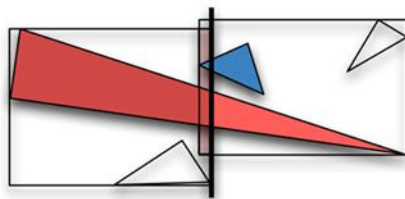
2. SBVH 对比 BVH 分割效果



左图是 BVH 效果，右图是 SBVH 效果，可以看到 SBVH 极大地减少了重叠面积。

3. SBVH 对比 kD-trees

总的来说，与通常用于 kD-trees 的方法相比，SBVH 的空间分割搜索较为简单。对于某些复杂场景 kD-trees 会简单将其归为一个引用，但这会严重影响判交及遍历运算。在这种情况下简单地创建一个叶子可能会导致树效率低下，并且往往难以找到好的替代方案。在 SBVH 构建中不需要这样的方法。如果最佳空间分割候选者太昂贵，则将简单地选择对象分割候选者。



对红色三角形的引用被拆分并插入到两个子节点中。蓝色三角形的引用仅插入到右边的子节点中，即使它也跨越了分割平面。这会引入略微重叠的边界框，但可能会提高分割的 SAH 成本。

4. SBVH 性能提升

下表显示了使用的场景的各种统计数据。可以看出，SBVH 几乎在每次比较中都优于常规 BVH 和其他方法。在 Sponza 场景中实现了最高的性能提升，SBVH 减少了近一半遍历次数和重叠率。



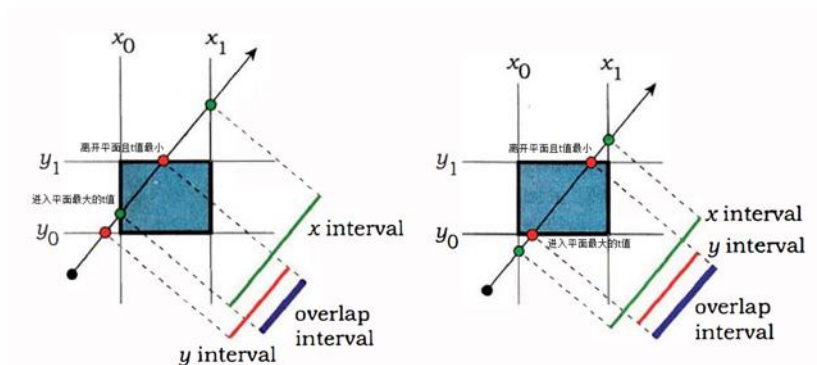
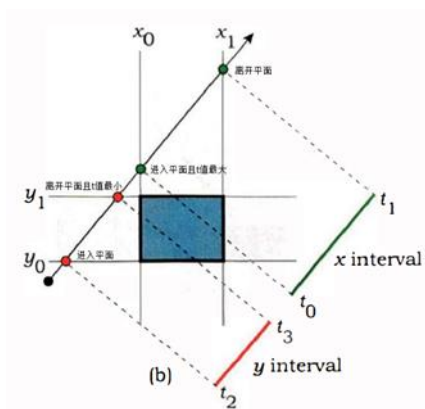
Build Method	References	Nodes	SAH Cost	Intersections (Avg/Max)	Traversals (Avg/Max)	Overlap
Conference, 283K tris						
SBVH	125%	124805	60.6	43.2 / 309	98.7 / 402	73%
ESC	125%	124633	97.6	35.7 / 649	126.0 / 530	97%
EVH	125%	124129	67.3	48.5 / 690	109.5 / 458	101%
BVH	100%	98703	73.2	63.0 / 935	117.1 / 488	100%
Rotated Sponza, 66K tris						
SBVH	203%	50197	86.9	102.6 / 429	176.2 / 426	57%
ESC	203%	49041	172.3	150.3 / 678	247.4 / 594	116%
EVH	203%	49187	130.4	92.8 / 632	254.2 / 672	114%
BVH	100%	24291	123.5	224.1 / 969	321.9 / 797	100%
City, 879K tris						
SBVH	117%	363859	57.1	34.6 / 245	120.8 / 336	74%
ESC	117%	363421	81.5	36.0 / 356	136.9 / 451	113%
EVH	117%	362701	71.3	37.4 / 331	149.9 / 599	118%
BVH	100%	308643	67.1	42.3 / 366	139.9 / 443	100%
Sibenik Cathedral, 80K tris						
SBVH	128%	35079	75.4	38.9 / 267	109.0 / 280	76%
ESC	128%	35125	94.1	40.9 / 249	127.1 / 330	103%
EVH	128%	35369	93.7	39.9 / 341	126.9 / 459	125%
BVH	100%	26993	86.1	42.3 / 321	122.6 / 311	100%
Bubs, 1888K tris						
SBVH	103%	669113	29.8	33.2 / 374	97.9 / 476	47%
ESC	103%	669771	53.4	28.3 / 458	135.6 / 509	70%
EVH	103%	668321	42.7	34.6 / 435	143.5 / 545	117%
BVH	100%	646783	44.6	92.2 / 465	126.7 / 501	100%
Soda Hall, 2169K tris						
SBVH	112%	812509	106.7	31.7 / 619	108.5 / 390	76%
ESC	112%	810869	142.2	29.2 / 616	127.2 / 390	105%
EVH	112%	807029	127.5	33.5 / 756	122.4 / 534	107%
BVH	100%	713499	124.2	34.1 / 636	119.9 / 443	100%
Bar, 234K tris						
SBVH	122%	97053	62.1	39.7 / 289	123.5 / 381	79%
ESC	122%	96143	86.6	34.7 / 321	145.3 / 379	108%
EVH	122%	97145	69.9	34.9 / 358	154.4 / 465	117%
BVH	100%	77697	67.4	41.1 / 373	152.7 / 414	100%

5. 结论

SBVH 提供了比传统 BVH 显著提高的剔除效率，并且在实验中明显优于其他的优化技术。同时 SBVH 还保留了 BVH 内存占用少且层次结构浅的优势。

4.4.4 射线与包围盒的相交算法

目前使用的是重叠交叉检测算法。



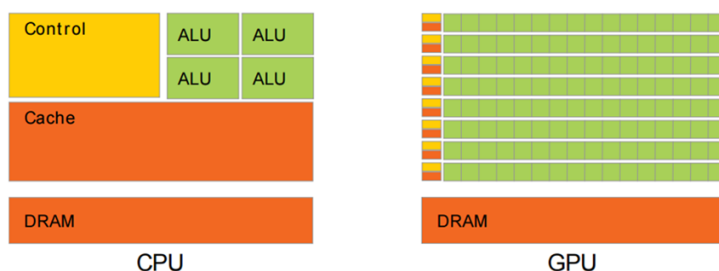
观察上述三幅图可以得出，只要发生区间交叠，光线与平面就能相交。

那么区间交叠出现的条件便是：光线进入平面处的最大 t 值小于光线离开平面处的最小 t 值。(光线的参数方程为 $R(t) = O + t \cdot \text{Dir}$)

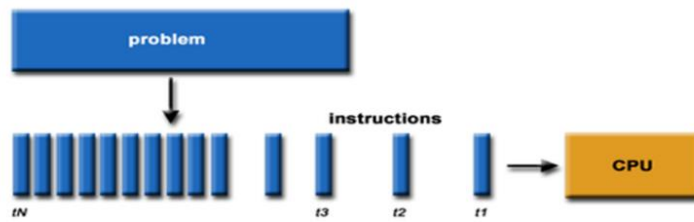
4.5 GPU 加速

4.5.1 GPU 加速原理

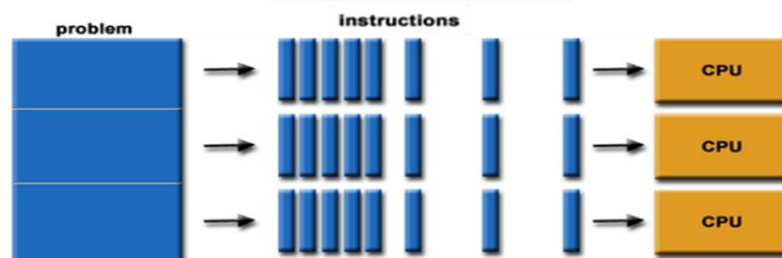
CPU 与 GPU 中的逻辑架构完全不同，其中 Control 为控制器、ALU 为算术逻辑单元、Cache 为 CPU 内部缓存、DRAM 为内存。GPU 设计者将更多的晶体管用作执行单元，而不是像 CPU 那样用作复杂的控制单元和缓存。从实际来看，CPU 芯片空间的 5% 是 ALU，而 GPU 空间的 40% 是 ALU。这也是导致 GPU 计算能力超强的原因。



串行运算示意图



并行运算示意图



由于 CPU 需要同时支持并行和串行操作，需要很强的通用性来处理各种不同的数据类型，还要支持复杂通用的逻辑判断，这样会引入大量的分支跳转和中断的处理。这些都使得 CPU 的内部结构异常复杂，计算单元的比重被降低了。而 GPU 面对的则是类型高度统一的、相互无依赖的大规模数据和不需要被打断的纯净的计算环境。因此 GPU 的芯片比 CPU 芯片简单很多。由于 GPU 具有这样的属性，为使用 GPU 进行加速计算提供了先决条件，其结构适合对密集型数据进行并行处理。CPU 执行计算任务时，一个时刻只处理一个数据，不存在真正意义上的并行；而 GPU 具有多个处理器核，在一个时刻可以并行处理多个数据。

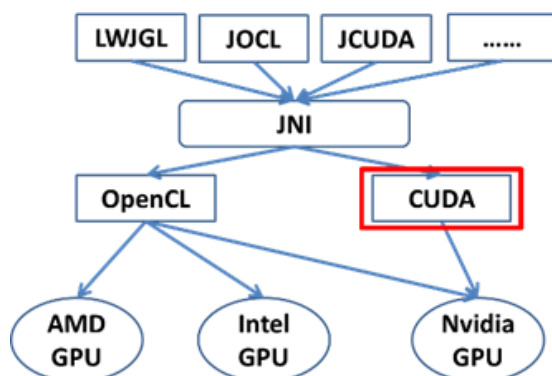
4.5.2 CUDA 介绍

Nvidia、AMD、Intel 都推出了自己的 GPU，其中最为流行的就是 Nvidia 的 GPU，其还推出了 CUDA 并行编程库。用户可利用 NVIDIA 的 GeForce 8 以后的 GPU 和较新的 QuadroGPU 进行计算。从 CUDA 体系结构的组成来说，包含了三个部分：开发库、运行期环境和驱动。

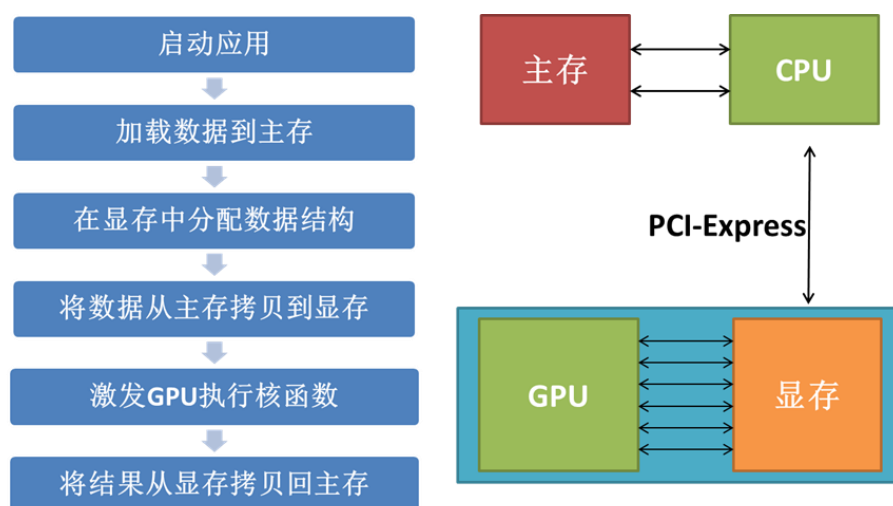
开发库主要包括两个标准的数学库 CUFFT（离散快速傅立叶变换）和 CUBLAS（离散基本线性计算）。这两个数学运算库所解决的是典型的大规模的并行计算问题，也是在密集数据计算中非常常见的计算类型。

运行期环境提供了应用开发接口和运行期组件，包括基本数据类型的定义和各类计算、类型转换、内存管理、设备访问和执行调度等函数。一种是运行于 CPU 上的宿主代码（Host Code），一种是运行于 GPU 端的设备代码(Device Code)。由

于位置不同，访问资源不同，使得整体易于分辨和管理，可以对资源分配进行优化。



CUDA 程序流程



4.5.3 OPTIX 引擎

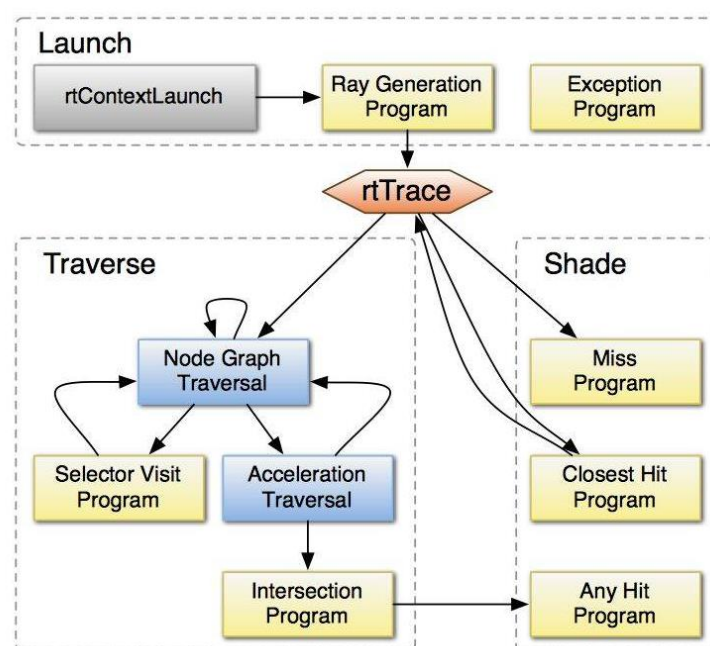
NVIDIA OptiX 光线追踪引擎利用 NVIDIA CUDA GPU 计算架构，可在 NVIDIA GPU 上大幅提升光线追踪的速度，从而将应用程序的互动逼真度上升到全新高度。凭借 OptiX 引擎，从前需要耗费数分钟的软件操作现在只需几毫秒即可完成，从而让设计师能够在行业标准硬件上交互地检查真实场景中的光照、反射、折射以及阴影的播放效果。NVIDIA Quadro 和 Tesla 产品拥有业内超级大容量的显存，能够处理超级大的数据集，可打造出高可靠性的解决方案，非常适合用于 GPU 光线追踪。

光线跟踪是一种真实地显示物体的方法，光线跟踪（光迹追踪）是计算机图形学的核心算法之一。在算法中，光线从光源抛射出来，当它们经过物体表面的

时候，对它们应用种种符合物理光学定律的变换。最终，光线进入虚拟的摄像机底片中生成图片。同样可将该引擎应用于电磁领域中。在大规模复杂场景计算中，根据电磁波的特性可使用光线追踪方法找到可靠路径，并对于路径损耗进行计算，从而进行仿真模拟。

下图为 OPTIX 引擎的渲染流水线框架图：

黄色框图部分是用于编写的自定义程序，而蓝色部分则不能更改，其由 OptiX 编写。Ray Generation program 用于初始化光线，最终生成图像的坐标设置其主光线的起点与方向。Ray Generation program 在 cuda 程序中调用 rtTrace 函数。rtTrace 一方面与场景树打交道，用于场景的遍历和加速结构的设置；另一方面与着色程序打交道，着色程序必然会与三维场景中物体的材质发生关联，得到最终的颜色。在电磁计算应用中，将颜色信息转换为每条射线的场强信息从而得到计算结果。



在 OPTIX 引擎中，Context 用于控制光线追迹引擎设置和启动的接口。Context 对象囊括了 OptiX 的所有资源，包括纹理，几何，用户定义程序等等。程序 Launch 有 1 维~3 维的函数。Launch 函数需要一个 Entry Point 参数。维度会建立一个计算网格。Launch 的输出结果通过 OptiX 缓冲传递回来，并需要和计算格的维度保持一致。Entry Point 为对应的光线产生程序入口，Ray payload 是承载光线用户定义信息的结构，用来存颜色、深度、阴影衰减因子等信息。可以

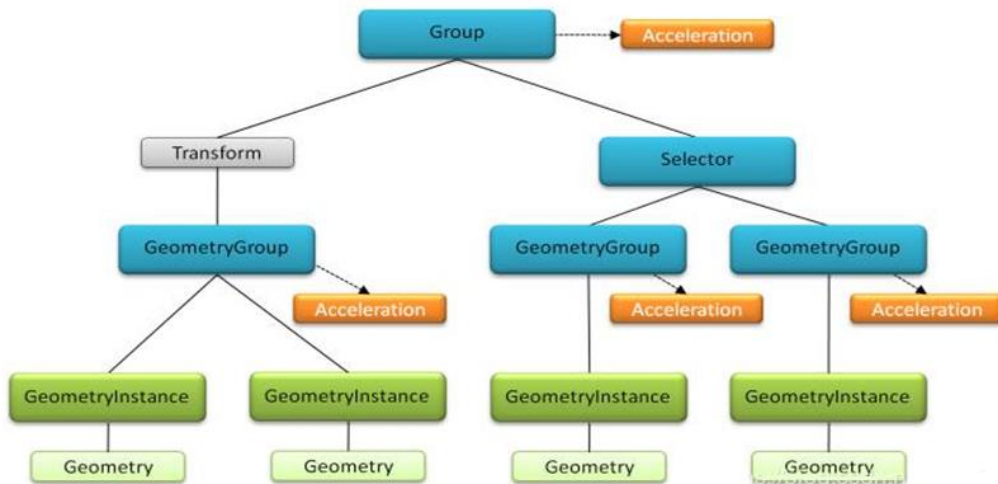
使结果在递归追迹的过程中，不断传递和更新。

材料的 Closesthit 和 Anyhit 程序就像是传统渲染系统里的着色器，它们在光线和实体相遇时调用。由于这些着色程序是和光线类型一起绑定到材料的，因此不是所有的光线类型，都需要定义两者。

OptiX 使用 Buffer 在 host 和 device 之间大量传递数据。CreateBuffer 能设置类型。类型包括只读、只写、读写等等。Buffer 在使用前需要设置元素大小、元素数（1D~3D）和元素格式。Host 访问 Buffer 通过 map ()取得数据区指针。

4.5.4 场景管理

在每条射线进行计算时，需要对当前场景进行判交计算，而对于场景的管理需要达到清晰简洁，并适用于加速算法。使用 rtTrace 函数追迹一条光线时，节点指向树的根节点。Host 应用组装不同类型的节点到结构图形中。这张图形表示为层次结构，其中几何物体点集在底部，物体的集合在上部：

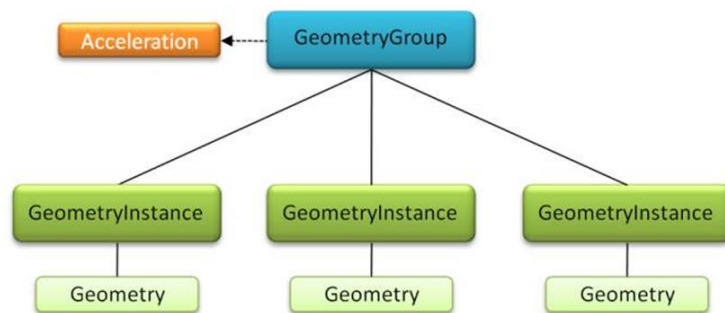


图形结构提供了一种不同程序和动作绑定在一起的方式。既然每次 rtTrace 都会制定一个根节点，使用不同的树或者子树都可以。阴影和反射物体会使用不同的表示方式。

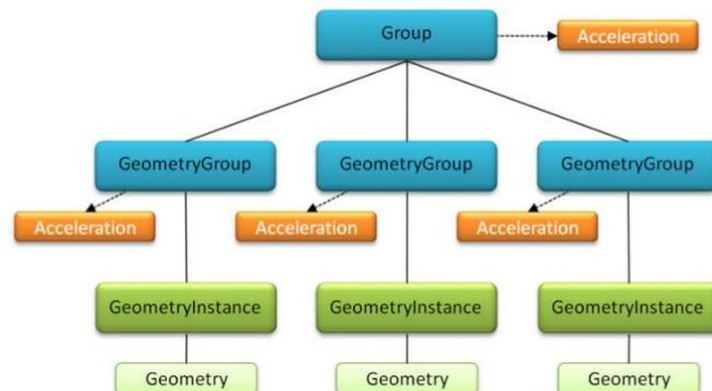
对于大场景来说，加速结构是加快光线追迹遍历的相交查询的重要工具。大多数加速结构代表场景几何的分层结构。该结构可以用于快速剔除不被光线相交的区域。不同加速结构有其各自优缺点，在使用时需要权衡构造速度、光线追踪效率、内存占用需要等进行考虑。

加速结构建立后会绑定给 Group 或者 Geometrygroup，用于遍历节点。通过使用 Group 或者 Geometrygroup，应用在更高层次上控制整个场景几何的加速。如果是几个几何实例加速，根据需求有许多方法置入 Group 或者 Geometrygroup。

下图是把很多几何实例放到同一个 Geometrygroup 里面，由 Geometrygroup 针对大量的几何实例收集的独立实体构造加速结构。OptiX 可以建立一种加速结构，使这些分属于不同几何实例的几何体，就像合并到一个物体一样迅速。



同样是三个实体，另一种方式是每个实例构建一个 Geometrygroup，最后再归并到 Group 使用。每个实例选择各自的加速结构。组加速结构在子节点的边界上构造。因此高层的加速结构更容易更新。该方法的好处是，当其中一个几何实例改变时，不需要修改其他实例的加速结构。然而，多一层就会降低效率，运行起来没有第一种快。



在 Acceleration 中，根据面对的几何实体不同，基于包围盒理论，选取适合的场景分割方式。由于场景分割不同，在构建的场景树中结点数量不会有明显区别，但进行判交遍历过程中，对适用的几何图形会有明显的加速效果。

加速结构需要一个 builder 来收集输入的几何，并产生一个用于加速光线-场景相交查询的数据结构。

Builder	描述
Trbvh	非常快的基于 GPU 的 BVH 编译，光线追迹表现只有 SBVH 的几个点，但是编译时间非常快。所有的数据集都适合用这种 builder。Trbvh 适中数量的额外内存。如果 GPU 内存不够，Trbvh 退到 CPU 来执行。全能中庸的方法。
Sbvh	Split-BVH 是一种高质量的边界层次。尽管建立时间久，在静态几何上因高追迹效率成为首选。相比简单 BVH 方法，对于不规则几何表现效果很好。比较适合三角形实体，需要属性的设置。
Bvh	传统的包围体层次结构。不错的遍历效率，并不专注于快的构造表现，支持重调整。Bvh 往往是 Group 之间最好的加速结构。
NoAccel	不做加速。在所有元件之间测试相交，大部分时间非常慢。对于子节点很少的情形，可能效率优于加速结构。

第五章 研究计划

序号	重要节点	研究结果	时间进度
1	开题论证	[1] 完成《开题论证报告》	2019.02
2	节点检查	[1] 完成《基于射线追踪的网格多尺度剖分预处理技术报告》 [2] 完成《基于不规则地形和非均匀大气环境的电波传播精确预测技术报告》	2019.06
3	中期检查	[1] 完成算法源代码（含详细注释） [2] 完成《源代码说明文档》 [3] 完成射线追踪传播预测模型组件 [4] 完成《模型组件测试报告》，其中包括对各功能性能指标的测试说明。 [5] 配合完成模型组件到基础仿真平台的集成 [6] 完成《基于辐射源分割优化、地形剖分优化的电磁环境计算加速技术报告》 [7] 完成《基于快速判交算法的射线追踪加速技术研究报告》 [8] 完成《基于 GPU/CPU 并行计算的射线追踪加速技术研究报告》	2019.09

		[9] 完成《中期技术总结报告》	
4	结题验收	[1] 完成《技术总结报告》 [2] 完成《项目结题报告》	2020.05