

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106966

山地场景下射线跟踪法的加速技术研究

包银燕 王杭先

(南京信息工程大学 电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要:在用射线跟踪技术预测山地场景下无线电波传播特性的过程中,为了提高射线跟踪算法的计算效率,提出了一种改进的基于区域划分并考虑射线方向性的加速方法。该方法连接发射点与地形三角网模型的4个顶点将地形面划分为4个区域,然后求出发射点发出的各组射线与地形面4条边的交点并根据地形模型中的三角形索引求出发射点与各交点连线所经过的网格,最后根据垂直方向上的射线方向性进一步筛除掉射线不可能相交的三角网格以减少求交次数。选取同一山地地形,在发射点和接收点位置相同情况下,分别采用所提出的加速方法与传统的八叉树加速技术进行仿真并对分析仿真结果。数值结果表明,当发射射线条数设置为 120×181 时,该加速方法比传统的八叉树算法计算效率可提高50.302%,误差为9.547%。因此,相比于八叉树算法,所提方法的算法实现更简单,在提高仿真速度的同时可以保持较小的误差,具有一定的参考价值。

关键词:反向射线跟踪;地形建模;区域划分;八叉树算法

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Research on acceleration technique of ray tracing method in mountain scene

Bao Yinyan Wang Hangxian

(School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In the process of predicting radio wave propagation characteristics in mountain scenes by ray tracing technology, in order to improve the computational efficiency of ray tracing algorithm, an improved acceleration method based on region division and considering ray directivity is proposed. This method connects the emission point with the four vertices of the terrain triangulation model, divides the terrain surface into four regions, then calculates the intersection of each group of rays emitted by the emission point and the four edges of the terrain surface, and calculates the mesh passing through the connecting line between the starting point and each intersection according to the triangle index in the terrain model. Finally, according to the ray directivity in the vertical direction, the triangular meshes where the rays cannot intersect are further screened out to reduce the number of intersection. The same mountain terrain is selected, and the acceleration method proposed in this paper and the traditional octree acceleration technology are used to simulate and compare the simulation results. The numerical results show that when the number of emitted rays is set to 120×181 , compared with the traditional octree algorithm, the calculation speed of this acceleration method is improved by 50.302%, and the error is 9.547%. Therefore, compared with the octree algorithm, the algorithm implementation of the proposed method is simpler. It can improve the simulation speed and maintain small error, which has a certain reference value.

Keywords: backward ray tracing; terrain modeling; region division; octree algorithm

0 引言

无线电学中,射线跟踪技术通过射线追踪寻找出多径信道中发射点到接收点间所有可能的传播路径,从而计算接收点的无线电参数,对无线通信系统的信道特性预测、基站选址和网络优化等都起着重要作用^[1]。射线跟踪算法能

针对不同场景做准确地预测,但是当环境较为复杂时,射线与三角面间无效的求交次数将大幅度增加而大大降低射线跟踪算法的计算效率,因此寻找一种可以保证射线跟踪算法精确性的同时能提高计算效率的方法具有重要意义。

近年来,射线跟踪法用于城市建筑物的电波传播预测研究有很多,而针对山地场景下射线跟踪法的加速技术研

究成果较少。杨博^[2]提出了一种地形的双精度建模方法,该方法可以大幅提高仿真速度,但需要对 DEM 源文件中高程点进行筛选,对 DEM 数据进行采样,预处理较复杂。传统的八叉树算法避免了将所有三角形面元与射线进行测试计算,大大提高了反射路径追踪的计算效率,但定义场景的八叉树时需存储每一个八叉树节点性质的域以及它指向父节点和 8 个子节点地址的指针,占用了大量的存储空间^[3]。李朋朋等^[4]根据射线的方向特性减少需要判交的三角面数量,以达到射线跟踪加速的目的。但是该方法保留的三角面是以发射点和射线与射出边的交点为对角点所围成矩形区域里的所有三角面,实际上,还可以进一步筛选掉矩形区域内其他不相交的三角形;而且,当发射射线设置为全向天线时,还需判断每条射线的射出边的位置是在地形面的上边、下边、左边或右边才能进一步求射线可能经过的网格,加大了编程复杂度。

本研究在已有的算法思想基础上,提出了在考虑射线方向性的同时,将地形面划分为 4 个区域,即将发射点与矩形面的 4 个顶点相连,当发射射线的方位角范围为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 时,这种区域划分可以便于确定射线从地形面的哪一条边射出,且该方法相比于已有算法可进一步筛除掉不可能相交的三角网格以提高算法效率。同时本文对传统的八叉树加速技术进行仿真,对比分析了两种算法的运行效率。仿真结果表明,当发射射线数相同时,本文所提的加速方法可在提高射线跟踪算法效率的同时保持较小的误差,当射线数设置为 360×181 时,误差仅为 1.267%。

1 射线跟踪模型的建立

1.1 地形建模

利用射线跟踪技术预测场强,首先需对所选取的场景进行建模。数字高程模型(digital elevation model, DEM)是地理信息系统中作为研究地形地貌最主要的手段和工具,首先需要预处理所获取到的 DEM 数据信息,然后用 MATLAB 工具将处理后的数据点通过三角形的边相连接,构成规则的三角面片,从而建立真实地形的环境模型^[5]。本文选取云南省临沧市三岔河某区域进行射线跟踪加速技术研究,该地区全境群峰纵横,具有非常典型的山地场景地貌特征^[6],周边的地理场景如图 1 所示。

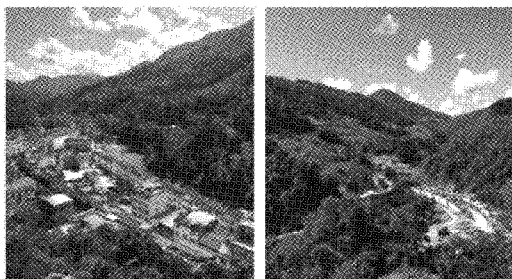


图 1 测试区域地理场景图

获取所测试区域地形的 DEM 文件,通过 Global Mapper、ArcMap 工具处理所获取的 DEM 数据,得到含有数据行数和列数、栅格宽高、每个点的高程值的高程信息。一般得到的高程信息的 x 、 y 方向上的值代表地形的经纬度信息,必须将经纬度换算成与地形中其他数据相匹配的 x 轴和 y 轴数值(将单位($^{\circ}$)转换为单位 m)^[7],处理后的高程信息如图 2 所示。

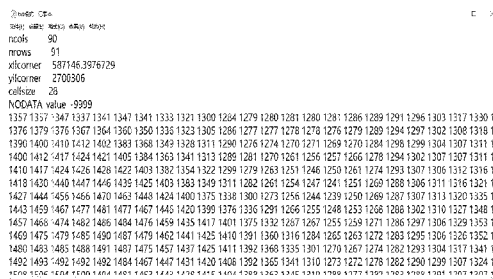


图 2 处理后的高程信息

然后计算出 DEM 数据中的每个高程点对应的三维坐标并保存,这些高程点将构成三角网每个三角形的顶点,为构建有序均匀的三角形面元网络,需要知道每个顶点的位置,以及顶点和顶点之间的关系。本文将每个三角形顶点的位置索引按顺时针排列,具体存储顺序如图 3 所示,并按从左到右从上到下的顺序先存储右上角的三角形再存储左下角的三角形,最终得到了每个三角形的顶点索引值,存入数组中,利用 MATLAB 工具读取存储顶点索引值的数组,构造出均匀的地形三角网面。由于处理后的 DEM 数据有 90 行,90 列,故包含 90×90 个控制点,则三角面划分后三角形的数目为 $(90-1) \times (90-1) \times 2$ 。在俯视图中,地形三角面都是成对出现,每两个三角面组成一个矩形,所有组成的各矩形尺寸也相同,在构造的地形三角网二维投影中截取某一部分区域,如图 4 所示。

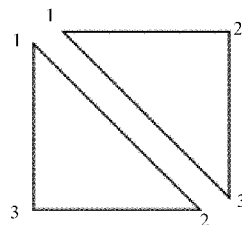


图 3 顶点存储顺序示意图

1.2 反向射线跟踪算法的实现

射线跟踪算法分为正向射线跟踪和反向射线跟踪。和正向射线跟踪相比,反向射线跟踪算法效率低,算法复杂,但是精确度高^[8]。本文选用反向射线跟踪算法展开研究,根据地形特点,为了尽量提高仿真效率,忽略电磁波的绕射问题,仅考虑射线的直射、一次反射、二次反射的情况。

1) 直射

直射的路径追踪,首先设置发射点和接收点的位置坐标,再连接两点,判断两点所确定的直线与三角面是否有交

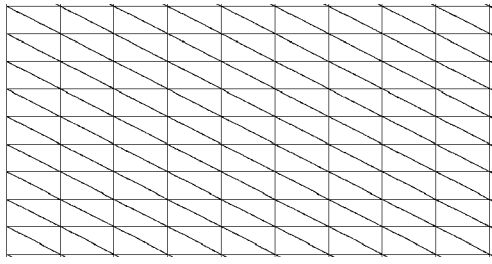


图 4 地形模型二维投影示意图

点,若无,则证明发射点和接收点之间没有遮挡,存在直射路径。如果有交点,还需要验证该交点坐标是否位于发射点坐标和接收点坐标之间,若是,则证明发射点和接收点之间存在障碍物,直射路径不存在,否则,该交点位于以发射点和接收点为两端点的线段之外,则他们之间没有障碍物,是可见的,这条直射路径存在。

仿真得到发射点 T_x 和接收点 R_x 之间的直射路径,如图 5 所示。

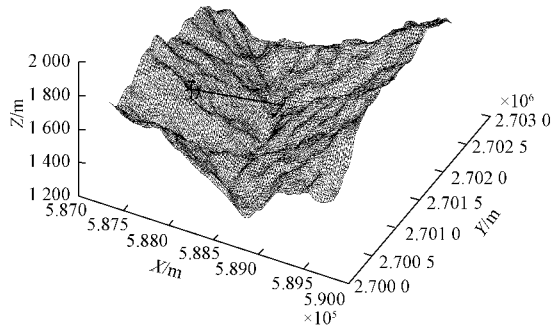


图 5 直射路径示意图

2) 反射

一次反射的路径追踪,首先建立发射点 T_x 和接收点 R_x 的可见面表,得到他们的共同可见面,然后选取一个共同可见面,求出发射点 T_x 的镜像点 T_x' , T_x' 与接收点 R_x 确定一条直线,求出该直线与共同可见面的交点,该交点即是反射点。再判断所求交点是否为有效的反射点:(1)反射点是否位于镜像点和接收点坐标之间;(2)反射点与接收点之间,反射点与发射点之间都无与任何三角面相交的情况。若满足以上两点,则存在一次反射路径^[9]。仿真得一次反射路径示意图,如图 6 所示。

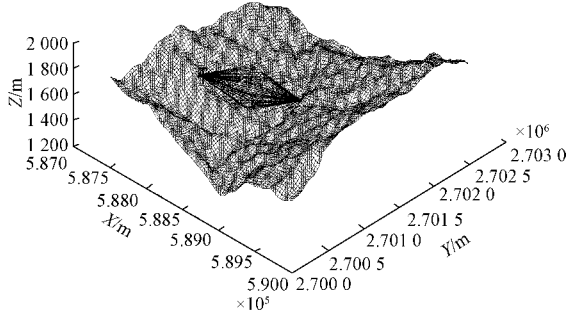


图 6 一次反射路径示意图

二次反射的路径追踪,分别读取关于发射点的可见面,接收点的可见面,首先求出发射点关于其可见面的镜像点,再求出接收点关于其可见面的镜像点。求出两镜像点的连线与两个面的交点,得到两个反射点,反射点有效性的判断与一次反射的验证方法一样。分别判断发射点与其可见面上的反射点之间,接收点与其可见面上的反射点之间,以及两个反射点之间是否与三角面相交,若都不与任何三角面相交,则二次反射路径存在^[10]。仿真得二次反射路径,如图 7 所示。

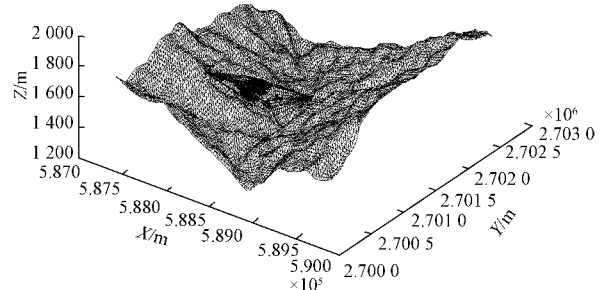


图 7 二次反射路径示意图

3) 接收功率计算

双射线模型^[11]如图 8 所示。在发射天线和接收天线之间存在两种路径,一种是直射路径,另一种是地面反射路径。其中 d 代表收发天线间的水平距离, h_t 代表发射点处高度, h_r 代表接收点处高度。对于窄带信号传输的双射线模型的接收功率为:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{\sqrt{G_t}}{l} + \frac{R \sqrt{G_r}}{r+r'} e^{j\Delta\phi} \right|^2 \quad (1)$$

式中: $\Delta\phi = \frac{2\pi(r'+r-l)}{\lambda}$ 是两个接收信号的相位差,由图 8 可得:

$$r'+r-l = \sqrt{(h_t+h_r)^2+d^2} - \sqrt{(h_t-h_r)^2+d^2} \quad (2)$$

考虑到 d 比较大的情况,则有 $r'+r \approx l \approx d, \theta \approx 0, G_t \approx G_r, R \approx -1$ 。将这些近似代入式(1),则有:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{\sqrt{G_t}}{d} (1 - e^{j\frac{2\pi(r-r')}{\lambda}}) \right|^2 \quad (3)$$

在找到收发两点间的有效路径的情况下,根据上述公式,分别求出直射路径和各条反射路径的接收功率,再将每条路径得到的接收功率进行叠加,便得到接收点处总的接收功率^[12]。

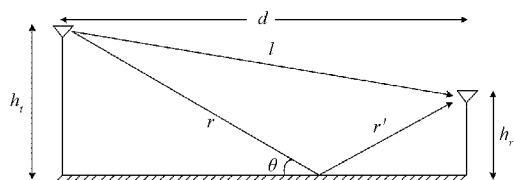


图 8 双射线模型

2 射线跟踪加速技术

在寻找反射射线路径以及求场点和源点的可视面时,射线与地形三角面的求交测试将花费大量时间,若地形面复杂,三角面数目更多,仿真速度会更慢^[13]。因此,研究射线跟踪加速技术提高运算速度很有必要。

2.1 八叉树加速算法

多年来,国内外学者为了提高射线跟踪的效率做了很多深入研究,并取得了一些成果,由前人的研究成果看,常用的射线跟踪加速算法有包围盒加速算法、角度分区算法、二叉树分区(BSP)算法、八叉树算法等^[14]。八叉树算法适用于室外三维大场景,本文将所提出的加速算法与传统的八叉树算法仿真结果进行对比分析,故下面仅仅叙述八叉树算法基本原理。

八叉树算法的实现首先需对地形的三角形面元进行空间划分,第 1 步设定阈值(本次仿真设置为包含三角形数 <20);再找出三维地形三角网面的最大尺寸,并以此尺寸建立整个地形面的包围盒,该包围盒为平行于坐标轴放置的立方体,可将该立方体用 3 个平面划分为 8 个小立方体,即叶子节点^[15]。对于节点中所包含的三角面数目小于 20 的叶子节点将舍弃不再继续划分,将所含三角面数目大于阈值的小立方体继续划分下去直到八叉树的每个叶子节点所含三角面数目都小于阈值^[16]。图 9 所示为仿真过程中经过三层划分的八叉树包围盒的示意图。

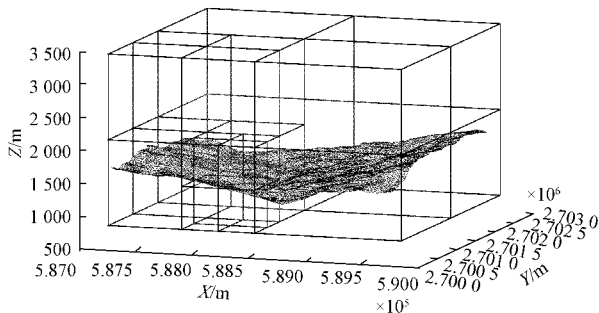


图 9 三层划分的八叉树包围盒示意图

利用八叉树中的编码性质,先根据射线起点各坐标分量取整得到单位立方体网格的前左下角坐标,再计算起点所在网格的八叉树编码;若起点位于包围盒边界上,则根据射线方向判断射线是否即将射出包围盒,若是,则算法结束;否则判断已知起点和射线前进方向的射线所相交的第一个小立方体,通过返回布尔值 0 或 1 判断射线与当前立方体(即当前叶子节点)所包含的三角面片是否相交,若是,则提取离射线起点最近的点便得到了可见点。否则,计算射线延伸方向上的下一个叶子节点,然后把射线与该节点中的三角面求交。这样沿射线方向一个叶子节点一个叶子节点地测试下去,直至找到第 1 个交点(即可见点),或射线射出场景(与所有面都无交点)^[17]。

这样处理避免了将所有三角形面元与射线进行测试计

算,不在射线路径上的叶子节点就不考虑,从而大大提高了反射路径追踪的计算效率。

2.2 改进的区域划分加速算法

已有文献中提出的加速算法所保留的三角面如图 10 所示,当发射射线设置为全向天线时,还需判断每条射线的射出边的位置是在地形面的哪一边才能进一步求射线可能经过的网格。

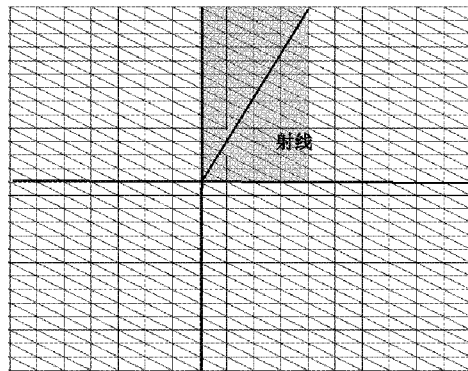


图 10 已有算法所保留的三角面示意图

本文研究在已有的算法思想基础上,提出了在考虑射线方向性的同时,将地形面划分为 4 个区域,即将发射点与矩形面的 4 个顶点相连,当发射射线的方位角范围为 $0^\circ\sim 360^\circ$ 时,这种区域划分射线的射出边是确定的,无需判断。该加速算法可用如下过程描述:

第 1 步:本文中,射线的生成可由发射点坐标,方位角 φ ,俯仰角 θ 确定。俯仰角 θ 的范围为 $0^\circ\sim 180^\circ$,方位角 φ 的范围为 $0^\circ\sim 359^\circ$,可通过设置不同的发射射线组之间的角度间隔以获得不同的发射射线条数。本次仿真中将地形面划分成 4 个区域,每个区域通过设置角度间隔在水平方向上产生不同数目的射线组,例如产生 11 组射线时,则 $0^\circ\sim 359^\circ$ 水平方向上共 44 组射线,每组射线的竖直方向上有 181 条射线,生成的射线存储在一个 44×181 的矩阵中,矩阵的每行表示某一确定的方位角和所有俯仰角组成的射线组,每一射线组中的所有射线在地形投影平面上的投影都相同。因此,可以只选择每一射线组中俯仰角为 90° 时的射线方向进行预处理,便可得到该射线组中所有俯仰角情况下可能相交的三角面。某一方位角下的一组射线沿其方向经过的三角面如图中阴影区域所示,如图 11 所示,因此该方向上的所有射线只需与这些三角面进行求交测试,大大减少了射线与三角面的求交次数。

第 2 步:求每组射线与射出边的交点。如图 11 所示,将地形划分为 4 个区域,由于发射点和地形 4 个顶点的坐标点已知,可分别求得 4 个夹角的度数,分别在每个区域中设置角度间隔确定一定条数的射线。例如,在区域 1 中,设置的 11 组射线射出边都在地形面的上边,求出这 11 条射线与地形上方两个点所确定的直线的 11 个交点。

第 3 步:计算发射点与射出边上的交点的连线所经过

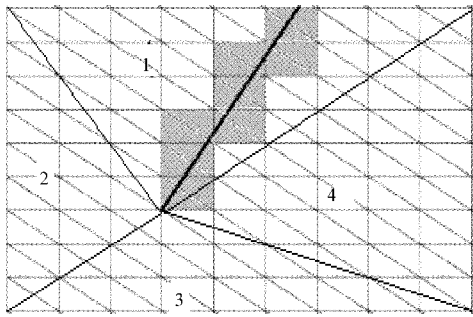


图 11 射线投影经过的三角面示意图

的网格区域。在地形建模中,已经将地形三角面采用有序的编号进行位置的区分,即将地形面中的矩形按照从左到右从上到下的顺序进行编号,每个矩形有两个三角面,这两个三角面对应同一个位置索引。要求取线段所经过的网格区域,首先需建立与地形模型的二维投影相对应的矩形网格面,矩形网格的大小、位置编号数目均与地形投影面中的一致;然后计算线段与网格线的交点,进而判断线段经过网格的序号;得到了经过矩形网格的位置索引,便可在建模过程中存储的三角面数组中提取出与之对应的三角形;最后重复操作以上步骤得到设置的 44 条射线可能相交的三角面。

第 4 步:对于每组射线,垂直方向上有 181 条射线,根据射线方向性,并不是每条射线都会与三角形相交,从这一角度也可剔除掉一些射线,在一定程度上缩短计算时间。选择某一方向上的射线组,当俯仰角为最大,即垂直向下时,该射线与第 3 步找到的三角面必有交点,然后将俯仰角度减小 1° ,再次判断与三角面是否有交点,依次减小俯仰角并进行求交判断直到找出与三角面无交点的射线,同时记录该射线的俯仰角,则剩余小于该俯仰角的所有射线与三角面均无交点,便可剔除。

经过筛选后,可大幅度去除掉不可能相交的三角面和射线,加速仿真速度。

3 加速算法结果与效率分析

本文使用的仿真平台为 AMD Ryzen 7 4800U 处理器, Global Mapper, ArcMap10.6, MATLAB。为了验证上述加速方法的有效性,通过改变射线间角度间隔以确定不同的射线条数进行仿真,分别使用八叉树加速算法和本文所提出的方法在不同射线条数情况下进行求交运算,比较两种方法进行射线跟踪过程中所要求交的面数和使用的的时间。最终得到了两种加速方法的仿真耗时结果如图 12、13 所示,将仿真结果记录于表 1 中。

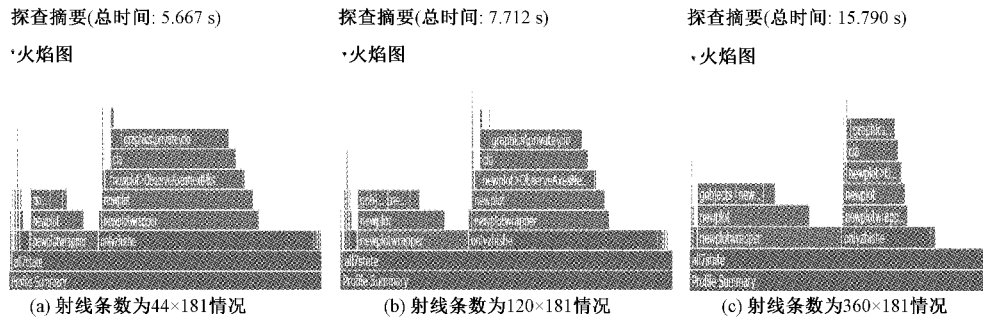


图 12 八叉树算法 3 种情况下的耗时结果示意图

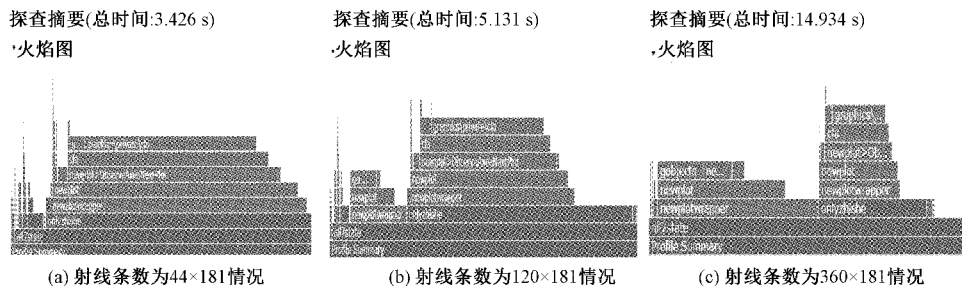


图 13 本文所提出算法 3 种情况下的耗时结果示意图

表 1 两种算法仿真所需求交面数与耗时比较

射线条数	八叉树算法		本文加速方法	
	三角面 个数	耗时/ s	三角面 个数	耗时/ s
44×181	3 225	5.667	1 720	3.426
120×181	4 508	7.712	3 635	5.131
360×181	9 356	15.790	8 968	14.934

当射线跟踪过程中未采用任何加速方法时,射线需要求交的三角面数目至少有 15 842 个。由表 1 可以看出,两种算法都明显减少了需要求交的三角面数目,从而减少了仿真时间。同时,仿真中通过设置不同的方位角间隔假设了 3 种不同情况,结果表明,当发射射线条数越多,两种算法的耗时都越长;在发射射线条数相同情况下,本文提出的加速方法所需要判交的三角面数目比传统方法所需要

的面数少,在耗时上本文中的加速方法所需时间更短。

另外,提高仿真速度的同时还要考虑仿真精度的因素。找到收发两点间所有射线路径后,利用文中所述公式分别计算出两种算法在 3 种情况下的参考信号接收功率。其中,具体的电参数设置如表 2 所示。然后以传统的八叉树算法的接收功率计算结果为参考标准,计算出本文加速方法的射线跟踪仿真误差,如表 3 所示。

表 2 接收功率计算中电参数设置

电参数	参数设置
发射天线功率 P_T /dBm	43
发射天线增益 G_T /dBi	15
接收天线增益 G_R /dBi	15
发射天线高度 h_t /m	7
接收天线高度 h_r /m	1.5
发射机频率 F_T /MHz	709

表 3 两种算法参考信号接收功率对比

射线条数	接收功率/dBm		误差/ %
	八叉树算法	本文加速方法	
44×181	-35.793 1	-36.659 2	18.251
120×181	-27.812 5	-28.247 9	9.547
360×181	-23.102 5	-23.158 0	1.267

由表 3 可以看出,以八叉树算法的接收功率计算结果作为参考标准,射线条数越少,误差越大;且在相同射线条数下,由八叉树算法追踪到的射线计算出的接收功率要高于本文方法计算出的接收功率。这是因为本文方法是地形面 4 个顶点和发射点相连,若发射点不在地形中心附近区域,而是设置在靠近地形边缘位置,4 个区域的夹角不相同,这样的情况通过记录射线二维投影经过的网格序号时会得到重复的网格序号,因没有意义将重复的序号删除后,与八叉树算法相比,最终得到的可视面更少,例如,在射线条数为 44×181 情况下,用本文方法寻找的收发两点的可视面中没有共同可视面,因此一次反射路径不存在,相比八叉树算法找到的射线路径更少,最终得到的接收功率更小。这也是本文所提方法的局限性所在。

结合表 1 和 3,同时考虑仿真时间和仿真精度的因素来分析两种算法的射线追踪效率,可以得出,当射线间的方位角间隔设置为 1°时,采取本文的加速方法能在保持较小的仿真误差的情况下减少仿真时间。

4 结 论

选取山地地形,以射线跟踪理论为基础,建立了反向射线跟踪传播预测模型,为了提高射线跟踪算法的计算效率,提出了一种改进的基于区域划分并考虑射线方向性的加速方法。该方法和已有的算法相比,能进一步剔除不可

能相交的三角形,且本文设计的区域划分方法是连接发射点与地形三角网模型的 4 个顶点将地形面划分成 4 个区域,这样可以更容易求得三维场景下所经过的三角网格。为验证该方法的加速效果,最后采用该加速方法与同样适用于山地地形场景的八叉树加速技术进行仿真并对分析仿真结果。数值结果表明,当发射射线条数设置为 120×181 时,本文加速方法比传统的八叉树算法计算效率可提高 50.302%,误差为 9.547%,当射线条数设置为 360×181 时,误差仅为 1.267%,加速效果良好。但是当射线条数较少时,本文所提方法的误差较大,精确性不高。下一步将针对这一不足,考虑源点和场点的位置的影响,对该方法作进一步的改进。

参 考 文 献

- [1] 张柔,郑国莘. 基于射线跟踪的 LTE1.8GHz 漏缆信道建模与 MIMO 性能分析[J]. 电子测量技术, 2018, 41(15):50-56.
- [2] 杨博. 基于射线跟踪的不规则地形场景下电波传播预测加速方法[J]. 电脑编程技巧与维护, 2020, 4(52): 145-147.
- [3] 马晓萌,孙红岩,孙晓鹏. 层次八叉的三维模型并行碰撞检测[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(4): 1077-1084.
- [4] 李朋朋,陈亚洲,石丹,等. 基于地形分区的射线跟踪法加速方法的研究[J]. 环境技术, 2014, 5(36):176-180.
- [5] 甘承萍. 数字高程模型在缺陷路段地质测绘中的应用[J]. 电子测量技术, 2019, 42(16):167-171.
- [6] 刘光轶,李锋,姚锐,等. 山地场景下 3D 射线跟踪的应用分析[J]. 新技术应用, 2021, 3(34):82-86.
- [7] 蒋帅,孙小凡,向茂生,等. 一种基于 DEM 的机载干涉相位生成算法[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(9): 56-61.
- [8] 杨晋生,董伯平,陈为刚,等. 基于三维射线跟踪的信道特性可视化研究[J]. 电子测量技术, 2011, 34(12):58-61.
- [9] 张月婷,丁赤彪,王宏琦,等. 基于射线理论的建筑物 SAR 图像仿真方法[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(5):44-48.
- [10] ZENG Y, WU Q Q, ZHANG R. Accessing from the sky: A tutorial on UAV communications for 5G and beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(12): 2327-2375.
- [11] 吴博,王黎明,赵越,等. 地声在不同岩体中的传播特性研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6):18-22.
- [12] 徐小辉,胡云鹏. 一种实现建筑物内应答器定位跟踪的新方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(4):111-118.
- [13] 张立鹏,方宁,渠慎丰. 基于 OpenMP 的射线跟踪并行计算方法[J]. 电子测量技术, 2012, 35(1):50-54.
- [14] 刘雨. 基于软件无线电技术的无线信道测量方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2020.

- [15] 莫丽莎, 马惠敏. 遮挡图像分析及完形检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(4): 10-18.
- [16] 郑义, 谢永华, 姬瑜, 等. 基于八叉树邻域分析光线跟踪的云三维模拟[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(5): 1489-1493.
- [17] 王睿, 陈春晓, 刘高, 等. 基于自适应包围盒划分的体绘制加速方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2560-2566.

作者简介

包银燕, 硕士研究生, 主要研究方向为移动通信电波传播、无线通信技术等。

E-mail: 1327752015@qq.com

王杭先(通信作者), 教授, 硕士生导师, 主要从事于卫星通信、卫星通信网络技术等领域的研究与教学工作。

E-mail: wanghangxian@126.com