

小区覆盖预测中一种有效的射线跟踪技术¹

周 力 柴舜连 毛钧杰

(国防科技大学四院 长沙 410073)

摘 要 射线跟踪法是近年来常用于城市微小区和室内环境无线电波传播信道特性预测的方法,但在其具体实现方面仍有许多问题需要进一步的研究。本文将计算机图形学中的八叉树方法用于射线跟踪法,得到了一种提高射线跟踪效率的方法。

关键词 射线跟踪,微小区,八叉树方法

中图分类号 TN911.22

1 引言

传统的小区覆盖预测使用的是基于数据测量的统计方法,要求不同小区之间具有统计相似性。然而,随着移动通信技术及通信业务的发展、个人通信需求的增加,加上信道频率的限制,使得小区的划分越来越小,出现了微小区,且导致了微小区之间统计相似性关系的丢失,从而使传统的统计方法失效。需要一种确定的方法来分析微小区中的电磁环境及其信道特性,基于几何光学原理的射线跟踪结合几何绕射、一致性绕射理论的方法正是能满足这个要求的算法。

显然,这种算法的关键在于射线跟踪。只有获得了满足一定精度的射线跟踪结果,才能得到准确的预测结果。然而,这种算法的关键也正是其计算上的瓶颈。因为在建筑密集的城区,微小区内面、劈、顶点的数目巨大。直接进行射线跟踪,计算量难于承受,所以必须采用有效的技术来降低计算量。这种有效的技术便是分区^[1]。

分区的技术就目前而言有两种,一是直接空间分区,一是角分区。直接空间分区直接将微小区划分为许多更小的区域,对这些区域分别进行标注,记下每个区域内所包含面、劈的编号。这样,进入某个区域的射线就只需要同这个区域内的面、劈进行求交运算,大大降低了运算量。角分区是以射线的出发点为中心,按照一定角度从中心发出若干射线将小区分为若干区域进行标注,再分别对各个区域内的面、劈按照其与中心的距离远近进行排序。对进入某个区域的射线按顺序与其所含的面、劈进行求交计算,一旦有相交情况发生,就不需同排在相交面(或劈)之后的面、劈进行求交计算了。但是,在编程实现区域的自动划分及对区域内所含面、劈进行标定时,这两种方法都比较复杂并且计算量都比较大。而且具体实施射线跟踪时,使用直接分区法,判断射线所到达的网格编号计算复杂,使用角分区法,每当有反射或绕射发生时就必须重建分区。总之,这两种方法都不能很好地提高跟踪速度。本文介绍的基于八叉树分区法的射线跟踪八叉树算法,能很好地克服上述两种方法的缺点,自动、快速地完成射线跟踪。

2 射线跟踪八叉树算法

下面将分别对八叉树分区的方法及性质和射线跟踪八叉树算法的具体过程加以介绍。

2.1 八叉树分区法及其性质 八叉树分区法最先是用于计算机图形学的^[2],它表示的是一种层次数据结构。首先,在空间中定义一个能够包含所需计算模型的立方体。立方体的三条棱边分别与 x, y, z 轴重合,边长为 2^n 。图 1 表示了将立方体空间分割成 8 个子立方体空间网格的情形,其中,每一个子立方体空间网格的边长为原立方体空间网格边长的 $1/2$,并且每一个空间网格唯一地对应着一个八进制编码。若某一个空间网格中所含面、劈的数目超过给定值,则空间网格将被继续分割成更小的立方体空间网格单元。

设八叉树的最大深度为 $N, N \leq n$ 则任一最终分割成的空间网格对应的编码是 $q_1 q_2 \cdots q_N, q_1, q_2, \cdots, q_N \in \{0, 1, \cdots, 7\}$ 。这样,我们可以用 $q_1 q_2 \cdots q_N$ 这种形式的编码唯一地表示任意一个最小尺寸的空间网格单元。并且,这种空间编码具有一种很好的性质,对空间任意一个已知

¹ 2001-03-16 收到, 2001-10-10 定稿

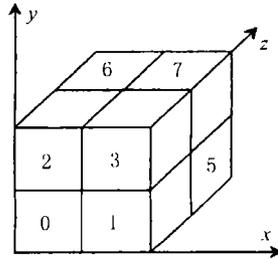


图 1 八叉树空间分区示意图

坐标的点, 可以直接求出其所在网格的编码, 同时, 如果知道任意一个空间网格的编码, 也可以直接求出其前左下角坐标。例如, 对于空间一点 $p(x, y, z)$, 先对 x, y, z 取整数, 得到相应的二进制表示:

$$\begin{aligned} x &= i_1 i_2 \cdots i_n, \\ y &= j_1 j_2 \cdots j_n, \\ z &= k_1 k_2 \cdots k_n \end{aligned} \quad i_l, j_l, k_l \in \{0, 1\}, \quad l = 1, 2, \cdots, n$$

则 p 所在立方体网格编码为 q_1, q_2, \cdots, q_N , 其中

$$q_l = i_l + 2j_l + 4k_l, \quad l = 1, 2, \cdots, N \quad (1)$$

若已知一空间网格编码为 q_1, q_2, \cdots, q_N , 则该空间网格的前左下角坐标为

$$\begin{aligned} x' &= i_1 i_2 \cdots i_N 0 \cdots 0, \quad \text{后面补的 } 0 \text{ 的个数为 } (n - N) \\ y' &= j_1 j_2 \cdots j_N 0 \cdots 0, \quad \text{后面补的 } 0 \text{ 的个数为 } (n - N) \\ z' &= k_1 k_2 \cdots k_N 0 \cdots 0, \quad \text{后面补的 } 0 \text{ 的个数为 } (n - N) \end{aligned} \quad (2)$$

这一性质使得网格的自动划分以及面、劈的定位变得很容易实现而且快速。射线跟踪八叉树算法的快速及高效正是源于此。

2.2 射线跟踪 对于一给定城市小区的模型, 首先经过坐标平移使得模型中的最小坐标值点位于原点, 然后进行空间网格划分, 接着再对模型中所含面、劈及顶点进行定位, 确定各个网格所含的面、劈及顶点。由于八叉树分区法具有上面所讨论的性质, 所以可以很方便、快捷地完成这些工作。

设源点为 P_0 , 射线方向为 R 。先由 (1) 式求出 P_0 所在立方体网格的八叉树编码, 读取其所在网格的面、劈信息, 用射线和网格中所含的面、劈进行求交计算。若存在相交点 (注意, 要求交点位于计算所在的网格内, 否则视为没有相交), 则取与原点最近的交点。设交点为新的源点, 反射或绕射方向为新的射线方向, 继续进行射线跟踪, 直至射线射出整个的立方体空间。

若没有交点, 则应跨过当前立方体继续向前搜索。跨越一空间网格后, 射线进入相邻的下一空间网格。将出口点作为新的源点, 射线方向不变, 继续进行射线跟踪, 直到射线射出整个的立方体空间为止。

当射线穿越网格时, 需要求解射线将进入的下一个网格的编码。最直接的方法是将射线与当前空间网格的 6 个边界表面求交, 再由交点求网格编码。显然这样做计算量是比较大的, 而且也体现不出射线跟踪八叉树算法的优势。实际上, 根据八叉树分区的性质, 由 (2) 式, 可求出该空间网格的前左下角坐标, 由射线方向求出射线在对应于 3 个坐标平面的空间网格边界面上的截距, 便可快速的求出口点坐标。在求解射线进入的新空间网格八叉树编码时需注意。当

射线前进的方向对应于 3 个坐标轴的分量都为正时, 可直接由出口点坐标值求出新的空间网格八叉树编码。若对应有一分量为负时, 需将出口点相应的坐标值减 1, 再用相减后的坐标值来求解新空间网格的八叉树编码。

综上所述, 可得出射线跟踪八叉树算法的流程为: (1) 进行坐标平移, 使待计算模型的最小坐标为 $(0, 0, 0)$; (2) 对模型进行区域划分和对面、劈进行标记 (称为建模); (3) 由射线出发点求解当前射线所处网格编码, 读取该网格内面、劈信息, 进行求交计算; (4) 若存在交点, 将交点置为新的射线出发点, 转到 (3) 继续计算; 若不存在交点, 求解出口点坐标, 判断出口点是否位于模型的边界, 是, 则跟踪结束, 否, 将出口点置为新的射线出发点, 转到 (3) 继续计算。

3 结果比较与讨论

根据如上的算法流程, 用本文算法和一般直接分区算法两种方法对两个模型进行了射线跟踪, 以验证本文算法的快速、有效。考虑到实际情况中射线能量的衰减, 计算模型中最多只进行了两层计算 (即计算到两次反射、两次绕射、一次反射加一次绕射和一次绕射加一次反射)。

3.1 算例 1 图 2 是包括 4 个建筑的简单结构, 区域范围 $70\text{m} \times 70\text{m}$, 建筑物尺寸 $20\text{m} \times 20\text{m} \times 20\text{m}$, 街道宽度 10m 。基站放置于图 2 所示 A 点 $(35, 35, 10)$ 。射线方向从 $\theta = 0^\circ, \Phi = 0^\circ$ 开始, 每间隔两度跟踪一条射线, 共跟踪 16022 根射线。跟踪结果见图 3 图 4, 时间比较见表 1。

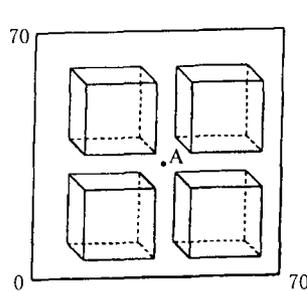


图 2 算例 1 的微小模型

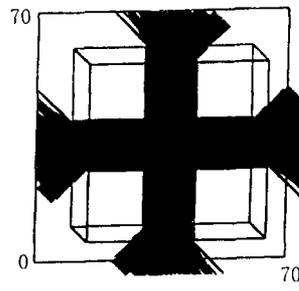


图 3 射线跟踪八叉树算法的射线跟踪结果

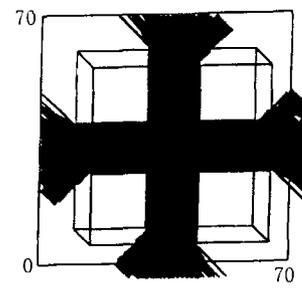


图 4 直接分区算法的射线跟踪结果

表 1 算例 1 计算时间比较

	建模时间 (s)	射线跟踪时间 (s)
八叉树分区法	0.2	11.8
直接分区法	0.4	15.2

3.2 算例 2 图 5 是一个微小区的模型, 建筑物形状和街道走向比较简单, 区域范围 $509\text{m} \times 242\text{m}$, 建筑物尺寸约为 $64\text{m} \times 64\text{m} \times 20\text{m}$, 街道宽度约 25m , 基站放置于图 5 所示 A 点 $(120, 157, 10)$ 。

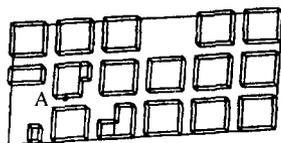


图 5 算例 2 的微小模型

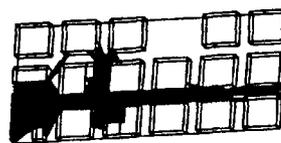


图 6 射线跟踪八叉树算法的射线跟踪结果

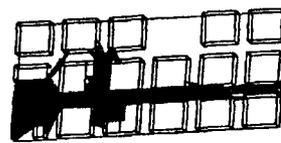


图 7 直接分区算法的射线跟踪结果

表 2 算例 2 计算时间比较

	建模时间 (s)	射线跟踪时间 (s)
八叉树分区法	5.2	12.8
直接分区法	14.8	21.2

同样, 射线方向从 $\theta = 0^\circ$, $\Phi = 0^\circ$ 开始, 每间隔两度追踪一条射线, 共跟踪 16022 根射线。跟踪结果见图 6 图 7, 时间比较见表 2。

由计算结果可看出, 八叉树分区法的跟踪结果与一般直接分区法的结果一样, 不一样的是两种方法所用的时间。由于直接分区法是比较成熟的方法, 是经过预测与实测比较验证过的方法。所以, 跟踪结果的一致, 验证了本算法的正确性。同时, 本算法比一般直接分区法所用的时间少, 而且, 计算模型越大、越复杂就越能体现这种算法的优势。

综上, 我们得出, 射线跟踪八叉树算法是一种快速、有效的射线跟踪算法。使用该算法对小区进行覆盖预测时, 能迅速并且简便地实现小区的自动网格划分、其内部面和劈的自动定位以及射线的自动跟踪。并且, 在开发研究有关于城市小区覆盖预测的应用软件时, 这种算法不仅编程实现简单, 而且能实现计算全过程的自动化。

参 考 文 献

- [1] M. F. Catedra, J. Perez, F. Saez de Adana, O. Gutierrez, Efficient ray-tracing techniques for three-dimensional analyses of propagation in mobile communications: application to picocell and microcell scenarios, IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1998, 40(2), 15-27.
- [2] 唐荣锡, 汪嘉业, 彭群生等编著, 计算机图形学教程, 北京, 科学出版社出版, 1994, 第 10 章第 4 节。

AN EFFICIENT RAY-TRACING METHOD FOR PROPAGATION PREDICTION IN MICROCELLULAR ENVIRONMENT

Zhou Li Chai Shunlian Mao Junjie

(National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Ray-tracing technique is an efficient method to analyse the propagation in urban and indoor environment, but there are still many questions which need to be studied while realizing. In this paper, octatree technique which was first used in computer graphics is used in ray-tracing, and the ray-tracing efficiency is improved.

Key words Ray-tracing, Microcellular, Octatree technique

周 力: 男, 1975 年生, 博士生, 主要对宽带天线、微波电路 CAD、神经网络用于微波电路设计、城市小区预测及计算电磁学感兴趣。

柴舜连: 男, 1969 年生, 副教授, 主要从事无线制导、雷达、微波毫米波技术与天线方面的研究与教学工作。

毛钧杰: 男, 1943 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达、微波毫米波技术与天线方面的研究与教学工作。