

# 一种改进的镜像射线跟踪方法

袁正午, 杨青宏, 沐 维

(重庆邮电大学计算机科学与技术学院, 重庆 400065)

**摘 要:** 镜像法通常只能运用在简单的传播环境中, 为在复杂的环境中获得高精度的预测结果, 分析测试射线法和镜像法的特点, 提出一种新的射线跟踪方法。运用测试射线法快速地找出从源点到场点的粗略路径, 利用镜像技术进行路径修正。测试结果表明, 该方法具有较高的计算精度。

**关键词:** 射线跟踪; 镜像法; 测试射线法; 路径损耗

## Improved Image Ray Tracking Method

YUAN Zheng-wu, YANG Qing-hong, MU Wei

(College of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**【Abstract】** In order to get accurate predictions in the complex environment, for the image method is usually only used in simple communication environment, a new ray tracking method is obtained by analyzing the characteristics of test ray and image ray method. Test ray method is effectively and succinctly used to find out a rough path from the source to the scene point. The path is corrected by image ray method. This method has high accuracy and can be used in complex environments.

**【Key words】** ray tracking; method of image; method of test ray; path loss

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.03.021

### 1 概述

目前, 移动通信系统大多工作在甚高频(Very High Frequency, VHF)和超高频(Ultra High Frequency, UHF), 而且使用的频率有越来越高的趋势。微小区传播环境的建筑物尺寸已远大于电波波长, 这使基于几何光学<sup>[1]</sup>(Geometrical Optics, GO)和一致性绕射理论<sup>[2]</sup>(Uniform Theory of Diffraction, UTD)的射线跟踪法能够用来分析和处理电波传播和散射的问题。这种方法不同于传统的经验预测, 它能够充分考虑微小区的地理环境、建筑物特征和分布对信号传播的影响。

射线跟踪法首先确定出发射机和接收机的位置, 后根据地理环境的特征和分布, 寻找出从源点到场点射线的所有传播路径。然后结合天线的方向图、菲涅尔等式和一致性绕射理论等, 计算出反射和绕射系数, 在场点将所有到达的射线做相干叠加, 就得到每个接收点的场强大小、相位、极化和时延等。目前根据追踪射线路径方法的不同, 射线跟踪法可以分为以下2类: 测试射线法<sup>[3]</sup>和镜像法<sup>[4]</sup>。前者比后者的算法简单得多, 计算效率较高, 预测精度低, 只适用于场强的计算, 而计算相位、极化、时延时, 这种方法的误差较大, 但能用于任何复杂的传播环境中。后者计算效率较低, 预测精度较高, 可以很好地计算相位、极化、时延信息。由于寻找一切可能的镜像点, 并剔除所有无效的镜像点非常困难, 通常只能应用在简单的传播环境中, 因此要在复杂的传播环境中运用镜像法找出从源点到场的所有传播路径是不太容易实现的。本文根据这2种射线方法的特点, 将测试射线法与镜像法相结合, 提出一种新的射线跟踪方法。

### 2 基本理论

#### 2.1 测试射线法

发射射线时, 每两相邻的射线需按一定角度并保持不变的发射, 从而保证每条射线都是唯一、相等、形状规则的总

波前的一份。为了确定一条射线是否到达接收点, 需要引入接收球的概念。合理半径的接收球能有效地捕捉到源点散开的射线。如果接收半径过大, 将会有多于一条的射线被接收点错误接收。如果半径过小, 有些接收点将没有射线到达。考查在源点以角度间隔为 $\alpha$ 的2条相邻射线, 在离源点距离为 $d$ 处, 当 $\alpha$ 很小时, 它们之间的直线距离可以近似为 $L = \alpha d$ 。所以, 在二维的情况下, 可以取 $R = \alpha d / 2$ 为接收球的半径。而在三维的情况时, 通常取 $R = \alpha d / \sqrt{3}$ , 如图1所示。

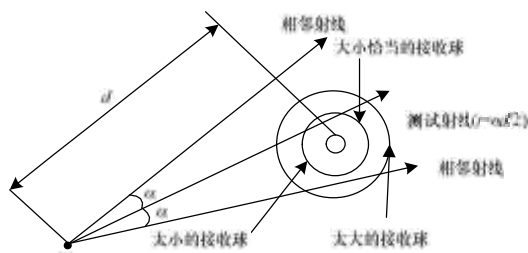


图1 接收球平面图

测试射线法的主要步骤:

- (1)从源点散射出的每条射线以相同角度 $A$ 与相邻射线相隔。
- (2)追踪每一条射线, 遇到平面阻挡产生反射, 遇到建筑物或障碍物产生绕射。在绕射点处又激发出无数条射线, 如

**基金项目:** 重庆市教委2011年科学技术研究基金资助项目“基于射线跟踪和Voronoi图的室内定位研究”(KJ110514); 重庆邮电大学计算机科学与技术学院“云计算”专项基金资助项目(JK-Y-2010001)

**作者简介:** 袁正午(1968—), 男, 教授、博士, 主研方向: 移动位置服务, 射线跟踪技术; 杨青宏、沐 维, 硕士研究生

**收稿日期:** 2011-08-19 **E-mail:** yuanzw@cqupt.edu.cn

此递归下去, 直到射线功率降到阈值以下或射出微小区。

(3)根据射线的轨迹确认接收球的半径大小。

(4)根据双计数误差, 识别出接收机是否接收到重复的射线。

(5)将所有到达接收机的射线做相干叠加, 计算出场强。

## 2.2 镜像法

基于反射定律、折射定律和解析几何理论的镜像法是点对点的跟踪技术。通过寻找镜像点来确定射线传播的路径。按照一般的镜像法所述, 首先源点对每个反射面各产生一个镜像, 统称为 1 级镜像。假设反射面为  $n$ , 则 1 级镜像有  $n$  个。1 级镜像又对所有反射面产生的 2 级镜像一共有  $n(n-1)$  个, 二级镜像又产生出三级镜像  $n(n-1)(n-1)$ 。随着级数的增长, 产生出的镜像数目将成几何数急剧增加, 往往多的惊人, 以至计算很困难。在找到所有镜像点后, 根据最后一级镜像和场点求出到达场点的最后一个反射点, 然后在根据该反射和上一级镜像求出前一个反射点, 直至找到源点。因此, 镜像法通常又称为反向射线跟踪, 从场点出发寻找源点。在一般情况下, 要追踪所有能从源点到场点的路径几乎不可能, 需要先前设定好反射或绕射的次数。通常取的是一次反射, 二次反射, 一次反射、一次绕射和一次绕射、一次反射。对于接收点而言, 对它有贡献的射线跟反射、绕射次数和实际地形紧密相关, 如果先确定了反射、绕射次数, 很有可能引起很大的误差和增加大量无用的计算。

## 2.3 2 种射线法的比较

从上述 2 种方法中可以看出, 测试射线法比镜像法的效率高得多。镜像法一次只能计算一个场点, 而测试射线法一次计算就可以得出所有需要计算的场点。测试射线法由源点处发出射线束, 经过多次反射和绕射后, 能量降到阈值以下停止追踪。算法流程简单, 易于实现。镜像法从场点出发, 寻找所有可能从源点到场点的路径, 算法流程复杂, 实现起来也有诸多困难。但从实用性来看, 测试射线法由于使用接收球带来的较大误差, 只适用于场点总场强的计算。而信道分析和蜂窝网络定位<sup>[5]</sup>所需要的相位、极化、时延等信息则需要点对点的镜像法才能提供。

## 2.4 场强计算

假设发射机天线是一个垂直放置的电偶极子, 接收天线是垂直极化的天线, 电磁波以球面波形式向外传播。在任一点  $Q_s$  的反射场或绕射场, 可以根据在反射点或绕射点  $Q_i$  的入射场表示出:

$$E^r(Q_s) = E^i(Q_i) \overline{RA}(s) e^{-jks} \quad (1)$$

$$E^d(Q_s) = E^i(Q_i) \overline{DA}(s) e^{-jks} \quad (2)$$

其中,  $E^r(Q_s)$  和  $E^d(Q_s)$  分别为点  $Q_s$  的反射场和绕射场;  $E^i(Q_i)$  为点  $Q_i$  的入射场;  $s$  为两点间的距离;  $A(s)$  为电波传播的衰减因子

$\overline{R}$  是非涅尔并矢反射系数:

$$\overline{R} = R_{\parallel} e_{\parallel}^i e_{\parallel}^r + R_{\perp} e_{\perp}^i e_{\perp}^r \quad (3)$$

其中,  $R_{\parallel}$  和  $R_{\perp}$  分别为平行极化和垂直极化的反射系数, 具体求解详见文献[6];  $e_{\parallel}^i$  为入射平行极化单位向量;  $e_{\parallel}^r$  反射平行极化单位向量;  $e_{\perp}^i$  入射垂直极化单位向量;  $e_{\perp}^r$  反射垂直极化单位向量。

$\overline{D}$  为并矢绕射系数, 具体计算详见文献[7]。相位常数  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长。

经过多次反射和绕射后到达场点的射线场强为:

$$E_i = E_0 \prod_m R_m \prod_n D_n \cdot A(s) \cdot e^{-jks} \quad (4)$$

其中,  $E_0$  为离发射机 1 m 远处的场强;  $d$  为射线从源点到场点的总路径。最后, 将到达场点的所有射线的电场做矢量叠加, 得到场点的总场强:

$$E_{total} = \sum_i E_i \quad (5)$$

求出总场强后, 根据文献[8]给出下式:

$$L = 20 \lg \left| \frac{\lambda E_{total}}{4 E_0} \right| \quad (6)$$

从而求得从发射机到接收机的路径损耗。

## 3 新的射线跟踪方法

该方法是利用测试射线法的高效、简洁, 快速地分析出射线从源点到场所有可能存在的粗略路径, 包括射线经过的反射面、绕射棱和反射、绕射的次数。然后对所得的路径信息结合镜像法进行修正, 从而达到点对点的精确预测。在对路径修正时可以分为以下情况:

直射射线, 即在经过测试射线法后, 没有经过反射或绕射达到场点的射线, 直接连接 2 点就可得到精确路径。

在射线跟踪过程中, 反射和多次反射射线存在的数量最多, 对场强的影响也至关重要。在这种情况下, 需要记录下每次反射时反射面所在的位置。然后根据反射面的顺序, 依次求出关于该面的镜像点。如图 2 所示(为了简化, 图中并未标出地面反射点, 但在实际计算时使用的是三维坐标, 可求出地面反射点)。

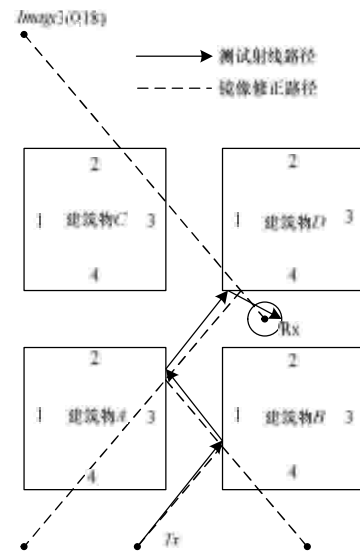


图2 镜像修正平面图

$T_x$  为发射机所在位置,  $R_x$  为接收机所在位置。首先使用测试射线法, 能够很快地计算出  $T_x$  到  $R_x$  的大致路径。在遇到反射时记录下反射面,  $T_x \rightarrow B.1 \rightarrow A.3 \rightarrow D.4 \rightarrow R_x$ 。然后从源点开始, 根据反射面所在的位置信息结合镜像理论, 采用如下方法表示射线经过的反射面:

$$T_x \xrightarrow{B.1} Image1(10,0) \xrightarrow{A.3} Image2(0,0) \xrightarrow{D.4} Image3(0,18) \rightarrow R_x \xrightarrow{B.1}$$

$T_x$  通过面 B.1 找到第 1 级镜像点  $Image1$ , 然后根据  $Image1$  和面 A.3 求出第 2 级镜像点  $Image2$ 。依次类推下去, 可以很快地计算出所有对场点有贡献的镜像点。找出所有镜像点后, 仍然不知道反射点的精确位置。为确定反射点, 首

先从  $R_x$  开始, 找到最后一个对场点有贡献的镜像点  $Image3$ , 然后根据最后一次经过的反射面  $D.4$  就能计算出到达场点的最后一个反射点位置。再从这个反射点和上一级镜像点  $Image2$  及反射面  $A.3$ , 可以计算出前一个反射点。继续此过程, 直到找出第一个反射点。最后从  $T_x$  开始顺序连接反射点直到  $R_x$  为止, 便求出了点对点的精确路径。

绕射及多次绕射射线, 这种情况和反射修正技术类似。唯一不同处在于镜像修正时, 是以第一阶绕射棱所在的平面坐标为源点  $P_0'$ , 进行平面镜像点修正的。把发射机的空间位置记为  $T$ , 平面位置点记为  $T'$ , 得到射线  $\overline{T'P_0'}$ 。把一阶绕射棱到接收机的平面距离记为  $d$ , 把  $T'$  向  $\overline{T'P_0'}$  方向延长  $d$  后得到的平面坐标与接收机高度坐标结合, 得到空间位置点  $P_1$ 。再将射线  $\overline{TP_1}$  与绕射棱求交, 得到精确的绕射点  $P_0$ 。若到达一阶绕射棱之前, 存在反射现象, 则还需求出到达绕射棱之前的最后一个镜像点  $I_1$ 。将  $I_1$  看作发射点, 结合上述方法, 可得射线的精确路径  $\overline{TP_1}$  或  $\overline{I_1P_1}$ 。同样的, 如果在绕射之后还存在反射, 则需从接收机开始, 找出到达绕射棱之前 0 的最后一个镜像点  $I_2$ 。对于二阶绕射, 需把前面的  $d$  值修改为  $d_1 + d_2$ , 其中  $d_1$  表示一阶绕射棱与二阶绕射棱的平面距离,  $d_2$  表示二阶绕射棱与接收机的平面距离。

在得到精确的反射点和绕射点之后, 可以计算出反射和绕射损耗。在得到所有射线的场强贡献后, 在接收点做相干叠加, 可以得到总场强。同样可根据该方法得到的相位、时延等高精度信息, 这有利于室内蜂窝网的定位参数需要。同样, 对当前校园 LBS<sup>[9]</sup>(Location Based Service)中的室内定位方法的研究及未来发展都提供了有效精确的数据采集方法。

#### 4 模拟结果

为验证本文射线跟踪方法的正确性, 对文献[10]中的雅典市某街区进行模拟计算(见图 3), 并将模拟结果与该文献的实测值做了对比。

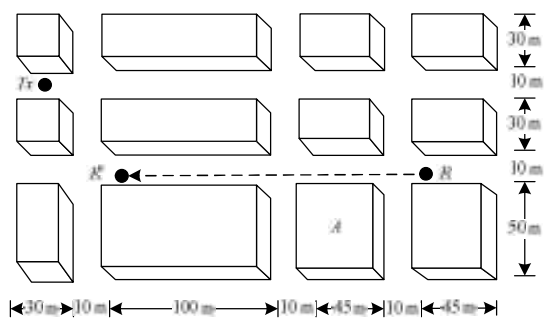


图 3 雅典市某街区示意图

发射机的位置在  $T_x$ , 接收机的位置从  $R$  移动到  $R'$ 。发射机和接收机的高度分别为 8.5 m、1.5 m, 发射频率为 1.8 GHz, 建筑物平均高度是 15 m~20 m。墙面的相对介电常数为  $\epsilon_r = 3$ , 电导率为  $\sigma = 0.005$  S/m, 地面的相对介电常数为  $\epsilon_r = 15$ , 电导率为  $\sigma = 7$  S/m。

图 4 为使用本文方法的路径损耗预测值与相关文献实测值的对比结果。可以看出, 两者在整体上吻合的较好。在路口处, 路径损耗有明显的变化。但在建筑物 A 附近的预测结果与实测结果有一些出入, 原因在于建筑物 A 是国家博物馆群, 它是由低于 3 m 的院子组成。由于该建筑物具有复杂的

几何特征, 而在本文的计算中, 是将建筑物的墙壁假设成街道的边缘。在计算时, 有很多射线能通过建筑 A 的反射达到接收机。而在现实环境中, 由于该建筑的特征, 只有少量的反射射线能达到接收机, 这是导致预测和实测的误差的主要原因。

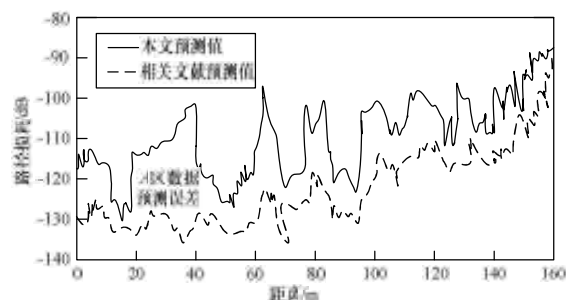


图 4 预测值与实测结果比较

#### 5 结束语

测试射线法高效、简洁, 而镜像法的预测精度较高。本文综合两者特点, 提出一种新的射线跟踪方法。该方法可以解决总场强偏差较大等问题, 追踪任何一条对接收点有贡献的射线, 找到发射机到接收机的所有电波传播路径, 从而得到点对点的精确路径。因此, 该方法具有较高的计算精度, 能够用于任何复杂的传播环境中。

#### 参考文献

- [1] Brown P G. Investigations on the Prediction of Radio Wave Propagation in Urban Microcell Environments Using Ray-tracing Methods[J]. IEEE Trans. on Microwaves, Antennas and Propagation, 1996, 143(1): 36-42.
- [2] Andersen J B. UTD Multiple-edge Transition Zone Diffraction[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1999, 47(8): 1344-1350.
- [3] Honcharrenko W. Mechanisms Governing UHF Propagation on Single Floors in Modern Office Buildings[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 1992, 41(4): 496-504.
- [4] Tan S Y, Tan H S. A Theory for Propagation Path-loss Characteristics in a City-street Grid[J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 1995, 37(3): 333-342.
- [5] 袁正午. 移动通信系统终端射线跟踪定位理论与方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [6] Moritz G, Jochen K. Agent-based Distributed Computing with JMessengers[C]//Proc. of Int'l Workshop on Innovative Internet Computing Systems. [S. l.]: IEEE Press, 2001.
- [7] Reed D A. Performance Analysis of Parallel Systems: Approaches and Open Problems[C]//Proc. of Int'l Conf. on Parallel Processing. [S. l.]: IEEE Press, 1998.
- [8] Jakes W C. Microwave Mobile Communications[M]. New York, USA: [s. n.], 1974.
- [9] 胡加艳, 陈秀万. 基于室内外定位的校园 LBS 研究[J]. 计算机工程, 2010, 36(8): 254-256.
- [10] Kanatas A G. A UTD Propagation Model in Urban Microcellular Environments[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 1997, 46(1): 185-193.

编辑 陈 文