

基于三维射线跟踪的城市微小区电波传播预测算法

周 力,毛钧杰,柴舜连

(国防科技大学四院,湖南长沙 410073)

摘 要: 射线跟踪算法是用于城市微小区电波传播预测的一种有效算法,但大多文献只对其正向算法进行了详细的探讨,而对于比较精确的反向算法却少有提及.本文对基于三维模型的射线跟踪反向算法进行了详细的讨论,并建立了城市微小区的三维的反向射线跟踪模型.

关键词: 射线跟踪;正向算法;反向算法

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 03-0434-03

A Method Based on 3-D Ray Tracing for Propagation Prediction in Microcellular Environment

ZHOU Li, MAO Jun-jie, CHAI Shun-lian

(National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Ray-tracing is an efficient method to analyze the propagation prediction in urban microcell. But most papers about this method only treat about the direct algorithms, only a few papers treat about the inverse algorithms. This paper discusses in detail the inverse algorithm based on ray-tracing method, and builds up a tracing model of municipal microcellular region.

Key words: ray-tracing; direct algorithms; inverse algorithms

1 引言

随着移动通信的发展,对系统容量的要求也越来越高.为此,微蜂窝、微微蜂窝系统开始被采用,这些系统的小区半径小于一千米.至此,微小区之间的统计相似的关系丢失,从而使传统的统计方法失效,需要有效的、精确的方法来研究微小区的信道特性.

这方面的研究很多.比较流行的方法是射线跟踪法结合几何光学理论(GO)、几何绕射理论/一致绕射理论(GID/UTD).也有用不变性测试方程法(MEI)^[1]和FDTD^[2]来进行分析.但是,FDTD方法的计算量太大,而MEI方法的计算量虽然较小,但目前只用于二维的预测计算.并且,这两种方法都偏重于计算微小区内各点的场强及路径损耗,对于微小区电磁波传播的信道特性缺乏具体的描述.同模拟信号系统相比,数字信号系统对信道的要求更高.因此,要使预测结果能用于分析微小区移动通信系统,例如分析其误码率,就要求预测结果能用于对其信道进行较全面的分析.通常,城市微小区的信道响应可用公式(1)表示,

$$h(t) = \sum_{n=1}^N A_n(t - \tau_n) \exp(-j\phi_n) \quad (1)$$

其中, $h(t)$ 为 N 个冲击响应之和, τ_n 为第 n 个冲击响应到达时间, ϕ_n 为第 n 个冲击响应的相位, A_n 为第 n 个冲击响应的幅度.由式(1)可知,要想对微小区的传播信道进行分析,必须

求出其内两点间的所有的传播路径.显然,对结构复杂的微小区,要求出其内两点之间的所有的传播路径是不现实的.然而,在一定的精度下,忽略到达时信号幅度很小的传播路径.求出两点之间的传播路径就可实现了.而要完成这项工作,只有射线跟踪法才能胜任.并且,尽管UTD是由导电劈推导的,但是对于有限导电率的情况,Raymond J Luebbers作了大量工作^[3,4].本文的计算采用的是文献[3]的公式.

射线跟踪的方法可分为正向算法和反向算法^[5].正向算法是从源点出发,向周围空间均匀发出若干波束,分别跟踪每根波束的路径,然后进行场的计算.这种算法有两个明显的缺点.首先,完全均匀的波束难以划分,基于文献[6]由波束之间夹角所求的接收球的大小难以确定.其次,由于跟踪的是波束,无法确定其与劈和顶点的散射,并且对射线具体的路径求解结果亦有所偏差.使得对同一个模型,计算用的波束大小不变,仅旋转一个小角度,用这样两组射线束组进行预测,两次预测的结果可能会有比较大的偏差.显然,用这样的预测结果来分析信道特性得出的结论是不可靠的.反向算法是先确定需要计算的场点位置,找出所有能从源点到达场点的射线,再进行场的计算.考虑到电磁波的衰减,三次以上的反射、两次以上的绕射可忽略不计.显然,反向算法的精度比正向算法要高.但是就目前可查的文献来看,还没有对反向算法的具体实现方法进行详细的讨论.本文对反向算法进行了详细的阐述,并建立了基于反向算法的三维射线跟踪模型.

2 反向算法

反向算法由场点出发,根据几何光学原理,反向追踪每一条能从源点到达场点的路径。本文模型是基于室外的,故不考虑透射射线,只考虑直射、反射和绕射。模型计算了直射、一次反射、两次反射、一次绕射、一次反射加一次绕射、一次绕射加一次反射及两次绕射。

要进行射线跟踪,必须先建立源点的可见面表和可见劈表,场点的可见面表和可见劈表,源点和场点共同可见的面表和劈表。具体求解可参照计算机图形学中的方法,计算时需注意,计算机图形学中的算法是基于象素的,而我们的计算是基于数据的。

2.1 直射、一次反射、两次反射

直射很简单,追踪场点和源点之间的连线,如无相交发生则存在,否则不存在。

对于一次反射,首先读出场点、源点共同可见的面的数据,依次对这些面进行判断。首先,求出场点在该面上的镜像点,连接镜像点与源点,求出其与平面的交点得到反射点。然后判断反射点是否有效。这包括两个条件:一、反射点要位于镜像点与源点之间;二、反射点要位于反射面片上。对第一个条件,很容易判断。对第二个条件,设定反射面片为凸多边形,因为任何多边形都可分割为凸多边形的组合,故这种假设对结果并无影响。对三维空间,一个平面 $Ax + By + Cz + D = 0$ 可将三维空间分为两部分: $Ax + By + Cz + D > 0$ 和 $Ax + By + Cz + D < 0$ 。对经过凸多边形一边且垂直于凸多边形的平面而言,凸多边形内的点必定完全位于该平面的一侧,即凸多边形上的点都满足 $Ax + By + Cz + D \geq 0$ 或 $Ax + By + Cz + D \leq 0$ 。这样,依次对经过凸多边形一边且垂直于凸多边形的平面进行判断,便可得到一组不等式,再加上凸多边形所在平面的解析式,凸多边形区域上的点都满足的条件便可由这么一组不等式表示了,将反射点带入这一组不等式进行判断便可。然后,对于有效的反射点,再分别追踪其与场点和源点的射线,若都无相交情况发生,则存在这么一条反射线,否则不存在这条反射线。

对于两次反射,分别读出对于场点可见的面表和对于源点可见的面表。首先求出场点关于其可见面的镜像点,再求出该镜像点关于源点可见面的镜像点。求出两镜像点与两平面的交点,得出两反射点。然后对两反射点进行有效判断,若都有效,再分别进行相交判断,若都不相交,则存在这条射线,否则不存在。

2.2 一次绕射、两次绕射

考虑到微小区内建筑多为面、劈和顶点的组合,而顶点的绕射比劈的绕射衰减要快,所以,这里的绕射仅考虑劈的边缘绕射射线。

进行绕射射线追踪,要作一个先决判断,确定源点与场点都位于劈外,避免绕射射线穿过劈的情况。对于空间中两个半平面 $Ax + By + Cz + D = 0$ 和 $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0$ 组成的劈,其将空间分为两部分,一部分区域是其夹角小于 θ 的区域,另一部分是其夹角大于 θ 的区域。首先小于 θ 的区域内的

点与 $Ax + By + Cz + D = 0$ 上组成劈的半平面都满足 $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 > 0$ 或 $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 < 0$;同理,可得小于 θ 的区域内的点都满足的另一不等式 $Ax + By + Cz + D > 0$ 或 $Ax + By + Cz + D < 0$ 。这样通过将源点和场点带入该不等式组,便可判断这两点是否位于同一区域,当它们都位于同一区域时才能进行绕射射线的追踪。

追踪一次绕射射线时,首先读出源点与场点共同可见的劈表,依次对每个劈求解。对于直边缘为空间任意方向的劈,可通过坐标变换使其垂直于新坐标系的 XOY 平面,然后参照文献[7]的展开方法,对于在新坐标系下入射点为 (x_1, y_1, z_1) 、绕射后场点为 (x_2, y_2, z_2) 及直边缘所在直线与平面 XOY 的交点坐标为 $(x_3, y_3, 0)$ 的情况,可求出绕射点如式(2)。

$$(x_3, y_3, z_1 + (z_2 - z_1) \cdot \frac{\sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2}}{\sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2} + \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}}) \quad (2)$$

再由坐标变换求出该绕射点在原坐标系下的坐标。同样,绕射点也需要进行有效性判断,判断其是否位于有限长的直边缘内。对有效的绕射点,再进行连线及相交判断。

追踪两次绕射时,只需分别读出源点可见劈表和场点可见劈表,再进行追踪即可。

2.3 一次反射加一次绕射、一次绕射加一次反射

对于一次反射加一次绕射,需分别读出源点可见面表和场点可见劈表。对于一个面和劈的组合,首先要求出源点关于面的镜像点。接着再求镜像点和场点关于劈的绕射点,判断其有效性。若有效,求镜像点与绕射点连线与面的交点即反射点,判断其有效性。有效则进行连线及相交判断即可。

对于一次绕射加一次反射,其求解类似于对一次反射加一次绕射的求解,不过是需分别读出源点可见劈表和场点可见面表。对于一个劈、面的组合,先求场点关于面的镜像,再求镜像与源点关于劈的绕射点。其余如判断有效性等同一次反射加一次绕射的求解。

3 射线跟踪结果及一般结论

本文对一简单模型(见图1、图5,其中图5是图1的俯视图)进行了正向射线跟踪(见图2),再根据如上讨论的模型,对该模型进行了反向射线跟踪(见图3、图4)。

本文对图5所示的情况作了射线跟踪并进行了路径衰减计算,其中建筑物的尺寸为 $15 \times 15 \times 20$ (m),街道宽为 10 (m),发射天线 T_x 高为 10 (m),接收点高为 2 (m)。设建筑物和地面有损耗($\alpha = 4, \sigma = 0.05$ S/m), $f_0 = 900$ MHz 计算结果同 FDID 的结果比较如图6。

由图2可看出,尽管正向算法也能求出射线轨迹,但它是基于射线束的,不能解决路径不精确及会遗漏与劈的绕射线的缺点。这使得它不能很好的描述电波传播的多径,并且结果中还会出现一些假盲点,其精度是不高的。而由图3、图4可看出,反向算法不仅能解决 MEI 方法和 FDID 方法所不能解

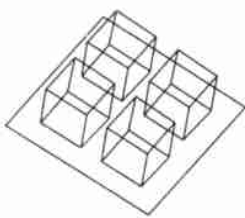


图 1 简单模型示意图

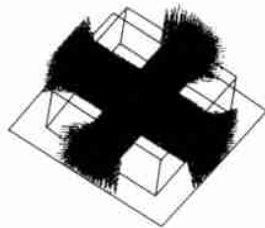


图 2 对简单模型的正向跟踪

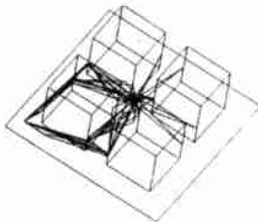


图 3 对正向跟踪中假盲点的反向跟踪

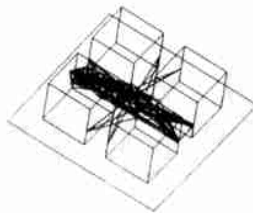


图 4 对正向跟踪中非假盲点的反向跟踪

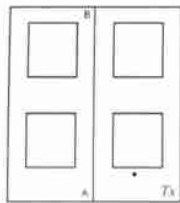


图 5 简单模型的俯视图示

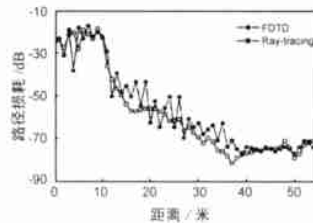


图 6 A-B 的路径损耗

决的问题,即能比较好的描述电波传播中的多径,并且由于其是基于一根根射线的,不会出现正向算法中的遗漏问题.由图 6 可看出,射线跟踪结果同 FDID 的结果是比较一致的.可以这样说,反向算法是精度比较高的算法,并且其计算结果对其后进行的信道特性分析有很大便利.其同 MEI 方法和 FDID 方法比较是有优势的,所以,反向算法是城市微小区电波传播预测的有效工具.

参考文献:

- [1] 宰昕宇,洪伟.迭代不变性测试方程法在城市微小区电波传播预测中的应用 [J].通信学报,1999 年 3 月,20(3):9-14.

- [2] Schuster J W,Luebbers R J. Comparison of GID and FDID predictions for UHF radio wave propagation in a simple outdoor urban environment [A]. IEEE AP-S [C],Montreal Jul. 1997:2022-2025.
- [3] Raymond J Luebbers. Finite conductivity uniform GID versus knife edge diffraction in prediction of propagation path loss [J]. IEEE Trans.on Antennas and Propagation Jan. 1984,AP-32(1):70-76.
- [4] Raymond J Luebbers. A heuristic UTD slope diffraction coefficient for lossy wedges [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Feb. 1989,37(2):206-211.
- [5] 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 [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, April 1998,40(2):15-27.
- [6] S Y Seidel, K R Scaubach. Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communication system design [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., Nov. 1994,43(4):879-891.
- [7] 阮颖铮.电磁射线理论基础 [M].成都电讯工程学院出版社.

作者简介:



周力男,1975 年生于云南.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.



毛钧杰男,1943 年生于湖南.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.

柴舜连男,1969 年生于湖北.副教授,主要从事无线制导、雷达、微波毫米波与天线方面的研究与教学工作.