

基于三维的射线跟踪八叉树算法的 城市微区电波传播预测算法模型

周 力, 柴舜连, 毛钧杰

(国防科学技术大学四院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 本文建立了一种有效的基于射线跟踪技术的三维城市微区电波传播预测的计算模型. 该模型将计算机图形学中的八叉树分区技术扩展至射线跟踪技术, 并由此提出了一种新的有效的射线跟踪算法, 射线跟踪八叉树算法. 并基于几何光学、一致性绕射(UTD)对场强进行计算, 所得结果与实测值及 FDTD 的结果进行了比较.

关键词: 微区; 射线跟踪; 八叉树技术; 一致性绕射; 路径损耗

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12-1776-03

An Algorithmic Model Based Three-Dimensional Octree Ray-Tracing Techniques for Electromagnetic Wave Propagation Prediction in Urban Microcell

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

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

Abstract: This paper presents a three-dimensional propagation model for path-loss prediction in an urban microcell, based on ray-tracing techniques. A new efficient ray-tracing technique based octree technique, which was used in computer graphics before, is presented. Numerical results based GO/UTD for received power are in agreement with the measured data and that predicted by FDTD.

Key words: microcell; ray-tracing; octree techniques; UTD, path-loss

1 引言

随着移动通信技术及通信业务的发展、个人通信需求的增长,使得对系统容量的要求不断提高.而信道的频率是有限的,这就使得小区的划分越来越小,出现了微小区、微微小区.一个发射系统的设计,首先要进行覆盖预测.传统的小区覆盖预测方法是基于数据测量的统计方法,这要求不同小区之间具有统计相似性.然而,微小区、微微小区的出现导致了这种统计相似的关系丢失,从而使传统的统计方法失效.事实上,现在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.

目前这方面的研究方法有 MEI、FDTD 及用射线跟踪技术结合几何绕射、一致性绕射理论等方法.这些算法中, FDTD 算法计算量太大,仅能对一些小的、简单的模型进行计算,实用性不大. MEI 算法的计算量虽较小,但目前仅能进行二维预测,无法考虑地形、地貌的影响.只能计算场强大小,无法模拟其多径的传播路径.对数字移动通信影响重大的数字信道特征参数为:多径传播路径损耗(可用信号幅度表示)、多径传播的时间延迟扩展和多普勒频谱扩展.数字通信的研究表明,数字信号系统对多径效应的影响最敏感,因为多径效应使得码

间干扰,造成误码,而误码有时是不可修复的.并且,数字信号系统对噪声影响本身有一定的抵御能力.而多普勒频谱扩展在系统设备中是已经考虑了的,所以,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分析.射线跟踪技术结合几何绕射、一致性绕射理论方法,计算量相对较小,且能进行三维预测,并可模拟出电波的传播路径.故本计算模块采用了这种方法.

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,才能保证后面计算的正确.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市,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.直接空间分区直接对微小区划分,并对划分后区域分别进行标注,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

收稿日期:2001-07-09;修回日期:2002-03-26

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同其所含的面、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的提高跟踪速度.本文介绍的基于八叉树分区法的射线跟踪八叉树算法,能很好的克服上述两种方法的缺点,自动、快速的完成射线跟踪.

2 射线跟踪八叉树算法

八叉树分区法最先是用于计算机图形学^[2]的,它的表示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 表示了将世界立方体空间分割成八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的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.

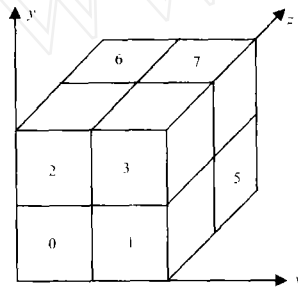


图 1 八叉树空间分区示意图

设八叉树的最大深度为 $N, N \leq n$ 则最终分割成的空间网格对应的编码是 $q_1 q_2 \dots q_N, q_1, q_2, \dots, q_N \in \{0, 1, \dots, 7\}$.这样,我们可以用 $q_1 q_2 \dots q_N$ 这种形式的编码唯一的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,对空间中任意一个已知坐标的点,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,对于空间中一点 $p(x, y, z)$,先对 x, y, z 取整数,得到相应的二进制表示

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

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

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

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

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

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.例如,同直接分区比较.对于判断一个点是否位于某个区域,直接分区法需进行六次判断,而射线跟踪八叉树算法只需进行一次判断,所用时间将近为直接分区法的 $1/6$,大大加快了射线跟踪的速度.射线跟踪八叉树算法的快速及高效正是源于此.

射线跟踪八叉树算法进行射线跟踪时的流程为

- a 进行坐标平移,使待计算模型的最小坐标为 $(0, 0, 0)$;
- b 对模型进行区域划分和对面、劈进行标记;(称为建模)
- c 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;
- d 若存在交点,将交点置为新的射线出发点,转到 c 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 c 继续计算.

得到射线轨迹后,便可利用 GO/UTD 进行场的计算了.

3 场强计算

为模拟电波传播,使用几何光学结合一致性绕射理论.基于该理论,若已知 Q_i 点电场值,则可得到另一点 Q_s 的电场值

$$E(Q_s) = E(Q_i) A(s) e^{-jks}, \quad (3)$$

其中 s 为两点间距离, $A(s)$ 为电波传播时的衰减因子.若 Q_s 为发射天线所在的位置,则式(3)为

$$E(Q_s) = K_0 \frac{e^{-jks}}{s} \quad (4)$$

E_0 为发射天线特征因子.若 Q_s 为反射面上一点则可得透射波和反射波场强为

$$\begin{aligned} E(Q_s)_T &= K_0 \bar{T} \frac{e^{-jks}}{s} \\ E(Q_s)_R &= K_0 \bar{R} \frac{e^{-jks}}{s} \end{aligned} \quad (5)$$

$E(Q_s)_T, E(Q_s)_R$ 分别为透射波和反射波场强, \bar{T}, \bar{R} 都是 2×2 矩阵,分别为透射波系数和反射波系数,对于射线基坐标系为

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} T_{\perp} & 0 \\ 0 & T_{\parallel} \end{bmatrix}, \quad \bar{R} = \begin{bmatrix} R_{\perp} & 0 \\ 0 & R_{\parallel} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$T_{\perp, \parallel}, R_{\perp, \parallel}$ 分别为垂直、平行极化的透射及反射系数,其具体表达式可参考[3].

对于 Q_s 为劈上一点的情况,可得其绕射场强为

$$E(Q_s)_D = K_0 \bar{D} \frac{e^{-jks}}{s}, \quad (7)$$

其中 \bar{D} 为并矢绕射系数,在射线坐标系下可表示为

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} D_s & 0 \\ 0 & D_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$D_{s, n}$ 的具体求解可参考文献[4].

4 计算结果与比较

根据如上模型,本文对两个简单模型进行了计算,并与实测值和其它方法的结果进行了比较.

文献[5]用对一个墙角(见图 2)进行了实测.频率 $f_0 =$

1823MHz,发射天线高 2 米,置于 T_x 处,接收天线高 1.5 米,沿 AB 测量.墙面电参数为 $\epsilon_r = 3.4, \sigma = 0.001S/M$.用本文的计算模型进行了计算,计算结果与实测值的比较如图 3.

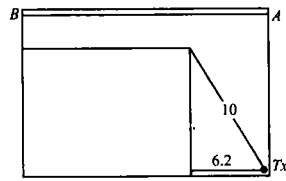


图 2 墙角模型

我们还对一个假想小区

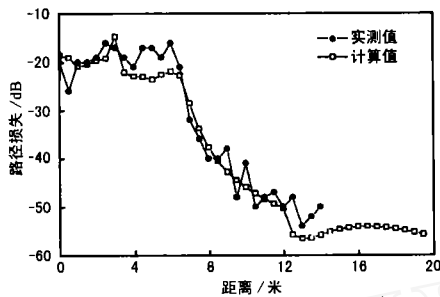


图 3 墙角计算结果

(见图 4)用本文的计算模型同 FDTD 的结果进行了比较.计算区域为 50×55 ,建筑物尺寸为 15×15 ,街道宽 10 米.计算使用频率 $f_0 = 900MHz$,发射天线高 3 米,置于 T_x 处,接收天线高 2 米,沿 AB 进行计算.墙面电参数为 $\epsilon_r = 4, \sigma = 0.05S/M$.比较结果如图 5.

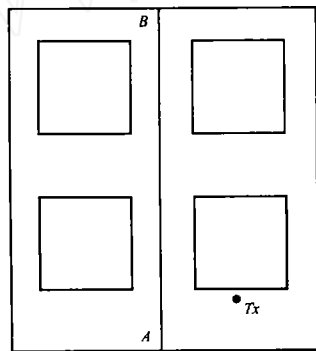


图 4 模拟小区模型

由图 3、图 5 可看出,本文的方法得出的传播预测结果无论是同实测值比,还是同 FDTD 比,都是比较吻合的.这说明了本文算法得出的结果是有效的.证实了采用新的射线跟踪法得出的结果的有效性.

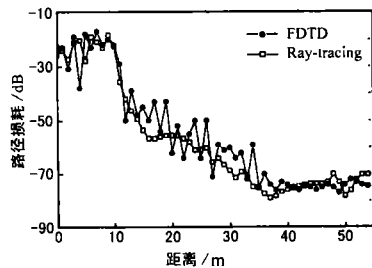


图 5 模拟小区计算结果

综上,我们得出结论,使用本文的算法模型对小区进行

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,得到比较有效的预测结果.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 [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, April 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 [M].北京:科学出版社出版,1994.

[3] 阮颖铮编著.电磁射线理论基础 [M].成都:成都电讯工程学院出版社,1989.

[4] Peter D Holm. A new heuristic UTD diffraction coefficient for nonperfectly conducting wedges [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, August 2000, 48(8): 1211 - 1219.

[5] Harry R. Anderson. Building corner diffraction measurements and predictions using UTD [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, February 1998, 46(2): 292 - 293.

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.



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

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.