

一种基于射线跟踪的射线管分裂新方法

刘芑健 张业荣 曹伟

(南京邮电大学无线通信与电磁兼容实验室 南京 210003)

摘要: 该文提出了一种基于射线跟踪方法的射线管分裂新技术——确定性射线管分裂法,同时给出该方法的解析分裂格式和完备性说明。仿真计算证明,在相同预测精度条件下,与两种已知的射线管方法相比,该方法具有花费CPU时间较少、计算效率较高的优点。用该方法在室内环境中进行接收功率预测,仿真结果与公开发表的文献结果相比,一致性良好。

关键词: 电波传播; 射线跟踪; 确定性射线管分裂法; 接收功率

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0999-05

A Novel Splitting Technique of Ray Tubes Based on Ray Tracing

Liu Yuan-jian Zhang Ye-rong Cao Wei

(Lab. on Wireless Communication and EMC, Nanjing University of Posts and Telecom., Nanjing 210003, China)

Abstract: In this paper, a novel splitting technique of ray tubes based on ray tracing method is put forward, which is called the deterministic splitting method of ray tubes. At the same time, the analytic splitting format and the demonstration of self-contained characteristic is provided. The simulation results prove that the proposed method possesses the merits of less CPU time and higher computing efficiency, compared with two known methods of ray tubes on the condition of same prediction precision. The prediction of received power has been done with this method in indoor environment. A good agreement is achieved between the simulated results and the published results.

Key words: Radio propagation; Ray tracing; Deterministic splitting of ray tubes; Received power

1 引言

电波传播特性的研究对无线网络的规划、设计和优化具有十分重要的意义,因而成为现代移动通信技术的热点研究课题之一。电波传播预测方法大体上可分为两大类:一类为确定性方法,另一类为实测统计方法。实测统计方法所得结果直接来自于实测,直观可靠,但用该方法所得出的电波传播模型对环境的依赖性较大,对实测设备的要求也较高,使得该方法的应用有一定的局限性。然而确定性方法应用电磁波传播理论来建立预测模型,基础牢固,结果更具有普遍性,获得人们越来越多的关注。目前,射线跟踪方法因具有预测精度较高、计算工作量较小、易于程序化等优点而获得了广泛重视。

在场强预测中,传统的镜像法^[1]是一种常用的射线跟踪方法,这种方法计算效率较高,但是它一般只能应用在简单的传播环境中。测试射线法^[2]能用于任何复杂的传播环境中,但该方法在发射测试射线时要遍历所有可能的传播方向,计算工作量大。同时,在接收点还需要取一个接收球来进

行接收检测,预测的精度对接收球的半径和发射射线之间的角度间隔依赖很大。许多学者作了大量研究对上述方法进行改进,例如入射及反弹射线法^[3],多镜像方法^[4],确定性射线管的射线跟踪方法^[5]等等,但这些方法并没有从根本上克服测试射线法的缺点。为了提高预测精度,文献[6,7]分别提出不同方式的射线管分裂法,它们的优点是可以避免使用接受球,提高预测精度。不足之处是在处理射线管与障碍物(墙、家具等)相交时,由于采用的方法是当射线管面积达到一定阈值时,就进行射线管分裂,使分辨率基本保持恒定值,这些射线管分裂法总不可避免地出现某些射线管横截面同时与不同的障碍物平面相交,并且这种现象会发生在每一次的反射中,包括对接受点的场强贡献起重要作用的前几次反射中,通常文献[6,7]等针对这种现象都会忽略或放弃追踪这类射线管。这样一来导致的直接结果是预测精度下降甚至准确性不高。基于这种事实,为了保持射线管法的优点并克服上述射线管分裂法的缺点,本文提出一种射线管分裂法的新技术,称其为确定性射线管分裂法,所谓确定性是指只要室内几何环境参数确定下来,在射线追踪过程中射线管的分裂格式就可以唯一确定。同时给出该方法的解析分裂格式和完备性说明,表明该方法在理论上可以不放弃追踪任何一个对接收点有贡献的射线管。通过仿真计算证明,在相同预测精

2006-09-26 收到, 2007-03-21 改回

国家自然科学基金项目(60671065), 高等学校博士学科重点专项科研基金(20060293002)和国家重点基础研究发展计划(2007CB310603)资助课题

度条件下,与两种已知的射线管方法相比,确定性射线管分裂法具有花费CPU时间较少、计算效率较高的优点。通过仿真结果与文献[8]的测量结果对比,一致性良好,证明确定性射线管分裂法是一种场强预测的有效且正确的新技术。

2 确定性射线管分裂法的分裂格式

(1)定义和创建射线管 为了更好说明该方法,本文选择在文献[3]的矩形空房间的室内环境中讨论分裂格式。首先建立直角坐标系,室内有某固定点源 $T(x_0, y_0, z_0)$ 发射球面波,首先将单位波前球剖分成等立体角的三角锥管,设其中任一射线管 $T-A_1A_2A_3$,构成射线管的3条射线 $\mathbf{TA}_i(i=1,2,3)$ 的方向矢量分别为 (m_i, n_i, l_i) ,所在直线的直角坐标系方程为分别 $\frac{x-x_0}{m_i} = \frac{y-y_0}{n_i} = \frac{z-z_0}{l_i} (i=1,2,3)$,发射三角锥射线管如图1所示。

(2)随着传播距离的增加,射线管的横截面面积也会不断增大,在与墙面相交时可能会发生下列3种结果,相交示意图如图1所示。

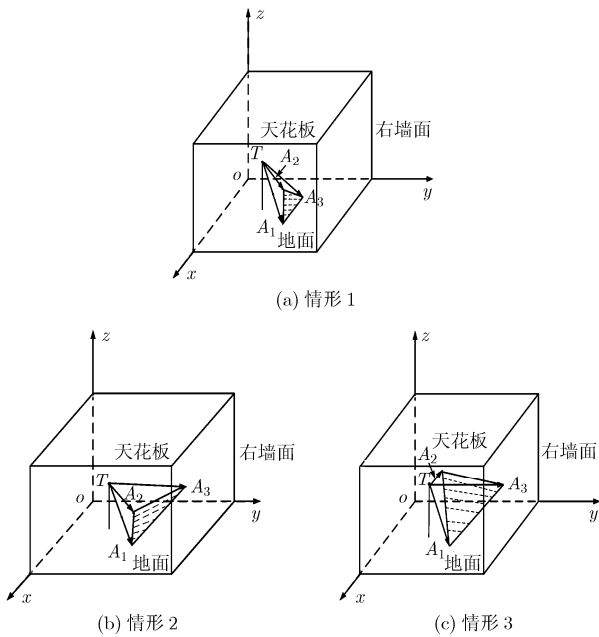


图1 室内环境发射三角锥射线管、射线管与墙面相交示意图

(a)情形1 射线管3条射线和墙面的3个交点同在一个墙面;

(b)情形2 射线管3条射线和墙面的3个交点中,两个同在一个墙面,另一个交点在其它墙面;

(c)情形3 射线管3条射线和墙面的3个交点中,两两不同在一个墙面;

(3)对于上述3种情形分3种方案来讨论射线管的分裂格式:

(a)情形1 如果某射线管3条射线和墙面的3个交点同

在一个墙面,就不需进行射线管分裂,继续追踪下一次反射管的传播。

(b)情形2 如果某射线管 $T-A_1A_2A_3$ 3条射线和墙面的3个交点中两个交点 A_1, A_2 同在一个墙面,而另一个交点 A_3 在另一墙面上,此时需要进行射线管分裂。如图2所示,不妨设两个交点 A_1, A_2 同在地面上,而另一个交点 A_3 在右墙面上,此时射线管的分裂格式为:作 \mathbf{TA}_3 的延长线交地面于点 R ,在地面上连接线段 A_1R 和 A_2R ,分别交连接射线 \mathbf{TP}, \mathbf{TQ} ,同时连接线段 A_2Q, A_3P, A_3Q ,这样母管 $T-A_1A_2A_3$ 就分裂成3个子管 $T-A_1A_2Q, T-A_2PQ, T-A_3PQ$,能确保构成每个子管的3条射线交在相同墙面上。子管中的射线 \mathbf{TP}, \mathbf{TQ} 的方向矢量可以通过母管的3条射线 $\mathbf{TA}_i(i=1,2,3)$ 的方程来计算:先设地面方程为 $z=0$,而右墙面的方程为 $y=h$,根据平面几何知识,马上就可得到

$$\mathbf{TP} = \left\{ \left[(y_0 - h) \begin{vmatrix} l_2 & m_2 \\ l_3 & m_3 \end{vmatrix} + z_0 \begin{vmatrix} m_2 & n_2 \\ m_3 & n_3 \end{vmatrix} \right] \right. \\ \left. \left/ \begin{vmatrix} n_2 & l_2 \\ n_3 & l_3 \end{vmatrix}, h - y_0, -z_0 \right\} \right. \quad (1)$$

$$\mathbf{TQ} = \left\{ \left[(y_0 - h) \begin{vmatrix} l_1 & m_1 \\ l_3 & m_3 \end{vmatrix} + z_0 \begin{vmatrix} m_1 & n_1 \\ m_3 & n_3 \end{vmatrix} \right] \right. \\ \left. \left/ \begin{vmatrix} n_1 & l_1 \\ n_3 & l_3 \end{vmatrix}, h - y_0, -z_0 \right\} \right. \quad (2)$$

3个子管中的其它射线 $\mathbf{TA}_i(i=1,2,3)$ 的方向矢量都为已知。

(c)情形3 某射线管 $T-A_1A_2A_3$ 3条射线和墙面的3个交点中两两不共面,此时需要进行射线管分裂。如图3所示,不妨设一个交点 A_1 在地面上,而另一个交点 A_2 在右墙面上,最后一个交点 A_3 在里墙面上,具体分裂方法如图3:先设地面的方程为 $z=0$,而右墙面方程为 $y=h$,里墙面的方程是 $x=0$,地面与右墙面相交的棱边记为 L_1 ,地面与里墙面相交的棱边记为 L_2 ,右墙面与里墙面相交的棱边记为 L_3 。下面进行射线管分裂:作 \mathbf{TA}_2 的延长线交地面于点 U ,再作 \mathbf{TA}_3 的延长线交地面于点 V ,连接线段 A_1U, A_1V ,分别交棱边 L_1, L_2 于点 W_1, W_2 。再连接线段 UV ,则平面 TUV 交棱边 L_3 于点 W_3 ,连接射线 \mathbf{TW}_3 ,并延长交线段 UV 于点 S 。这样一来母管 $T-A_1A_2A_3$ 就分裂成3个子管 $T-A_1W_1W_2, T-A_2W_1W_3, T-A_3W_2W_3$,能确保构成每个射线管的3条射线交在相同墙面上,子管中的射线 $\mathbf{TW}_1, \mathbf{TW}_2, \mathbf{TW}_3$ 的方向矢量可以通过母管的方向矢量来计算。同理和(b)情形2一样,根据平面几何知识可以求

$$\mathbf{TW}_1 = \left\{ \left[(y_0 - h) \begin{vmatrix} l_2 & m_2 \\ l_3 & m_3 \end{vmatrix} + z_0 \begin{vmatrix} m_2 & n_2 \\ m_3 & n_3 \end{vmatrix} \right] \right. \\ \left. \left/ \begin{vmatrix} n_2 & l_2 \\ n_3 & l_3 \end{vmatrix}, h - y_0, -z_0 \right\} \right. \quad (3)$$

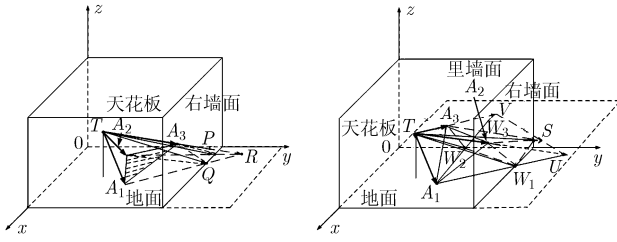


图 2 情形 2 的分裂格式示意图 图 3 情形 3 的分裂格式示意图

$$TW_2 = \left\{ \begin{matrix} -x_0, x_0 \\ n_1 \\ n_2 \end{matrix} \begin{vmatrix} l_1 \\ l_2 \end{vmatrix} + z_0 \begin{vmatrix} m_1 \\ m_2 \\ n_1 \\ n_2 \end{vmatrix} \right\} \quad (4)$$

$$TW_3 = \left\{ \begin{matrix} -x_0, h - y_0, x_0 \\ n_2 \\ n_3 \end{matrix} \begin{vmatrix} l_2 \\ l_3 \end{vmatrix} + (y_0 - h) \begin{vmatrix} l_2 \\ l_3 \\ m_2 \\ m_3 \end{vmatrix} \right\} \quad (5)$$

这样 3 个子管 $T - A_1W_1W_2$, $T - A_2W_1W_3$, $T - A_3W_2W_3$ 中的所有射线的方向矢量都可求得。

经过以上的射线管分裂格式以后，不仅能得到分裂后的子管的方向矢量，而且能确保构成每个射线管(包含不需要分裂的母管与需要分裂而得到的子管)的 3 条射线只与一个相同墙面相交，通过反射定律就可以求得相应下一代反射管的方向矢量，从而保证不放弃追踪任何一个对接受点有贡献的射线管，从而在理论上确保提高场强预测的精度。

3 “确定性射线管分裂法”算法的完备性说明

(1)发射 从点源 T_x 发射球面波开始，该算法首先将单位波前球用内接正多面体镶嵌，即构成一个正二十面体(图 4)，它由 20 个完全相同的等边三角形组成，三角形的 3 个顶点在球面上。然后，把正二十面体的三角形再等分成更小的等边三角形。最后，从点源 T_x 向内接正多面体的每一个等分成更小的等边三角形发射射线管并投影到波前球上，就可以保证无缝隙地覆盖波前球(图 5)，遍历所有的方向。这样就能保证在发射时不放弃追踪任何一个立体角方向发射的射线管，所以能确保在发射时该算法的完备性。

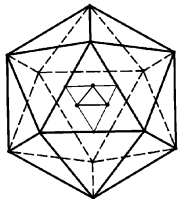


图 4 正 20 面体和等分三角形示意图

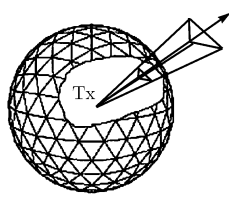


图 5 点源 T_x 等立体角发射三角形射线管

(2)传播 在发射的所有射线管的传播过程中，本算法

在每次反射前会把射线管的墙相交测试分为 3 种情形(详细分类可见图 1)。第 1 种情形不需要分裂而直接利用反射定律得到反射管的方向矢量，从而继续追踪下一次反射；其它两种情形采用本算法可将入射的射线管无缝隙地分为 3 个子射线管(图 2 和图 3)，并确保构成每一个子射线管的 3 条射线交在同一墙面上；然后利用反射定律得到 3 个子射线管的反射管的方向矢量，从而能再继续追踪下一次反射；通过本算法的分裂格式能确保在传播过程中也不放弃追踪任何一个射线管，因此保证了该算法在传播过程中的完备性。

从以上分析可以得到结论：从发射到传播的整个追踪过程，该算法在理论上可以不放弃追踪任何一个射线管，所以能保证不放弃追踪任何一个对接收点有贡献的射线管，从而确保了该算法的完备性。

4 仿真结果

(1)为了验证确定性射线管分裂法具有花费 CPU 时间较少、计算效率较高的优点，本文选择了在文献[3]的简化的室内几何环境中与其它两种射线管方法进行对比。现在取空房间(示意图见图 6)的大小和天线的位置：房间长 21m，宽 10m，高 4m，接收天线为(3, 2, 2.5)，发射天线为(1.9, 1.7, Z_r)(单位：m)，工作频率为 1GHz。在 CPU 配置为 Celeron 2.40GHz 和内存为 256MB 的 PC 机上进行了仿真计算，以下表 1，表 2 分别给出确定性射线管分裂法与入射及反弹射线法(SBR)、有固定分辨率的射线管分裂法的对比结果，从结果可以看到本算法具有花费 CPU 时间较少、计算效率较高的优点。

表 1 从点源发射 20 个三角形射线管进行追踪

方法	预测精度 (%)	需要追踪的射线管数目	放弃有效的射线管数目	CPU 时间 (s)
入射及反弹射线法 (SBR)	95	51200	3709	2014
确定性射线管分裂法	95	562	0	192

表 2 固定分辨率设定为 $d_0 = 0.5m$

方法	预测精度 (%)	需要追踪的射线管数目	放弃有效的射线管数目	CPU 时间 (s)
有固定分辨率的射线管分裂法	95	128506	4674	5435
确定性射线管分裂法	95	647	0	282

(2)为了验证确定性射线管分裂法的收敛性，本文进行了场强预测误差的估计。本算法是基于几何光学(GO)原理的一种高频近似方法，场强预测与环境的几何参数、电参数、发射频率、入射角、极化方式、传播距离等众多因素有关，很难定性地理论分析场强预测误差的估计。但是本算法具有完

性的优点，能够定量分析其强预测误差的估计。本文选择了在文献[3]的简化的室内几何环境中进行仿真，仿真条件和(1)一样，可以得到追踪代数 and 场强预测误差的关系(图7)。从图7可以看到，当追踪代数大于7次时，预测误差能控制在小于5%的范围内，因此该算法具有稳定的收敛性，所以采用本算法经过7次反射后的射线管可以忽略对接收点场强预测的影响。

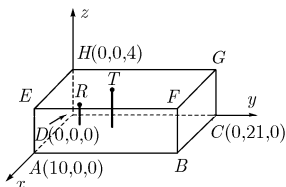


图6 文献[3]的简化空房间示意图

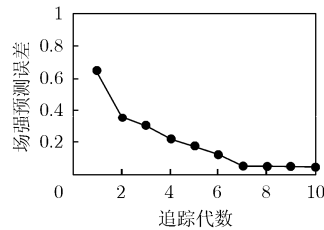


图7 场强预测误差的估计示意图

(3)为了验证确定性射线管分裂法的正确性，本文选择了文献[8]的两个室内几何环境进行对比，预测时接收天线在房间的平面移动路径分别如图8和图9所示，另外提供了在仿真计算时利用的双锥喇叭天线几何形状图和天线方向图，分别如图10和图11所示。

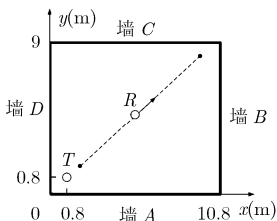


图8 空房间中接收天线沿着房间的对角线移动

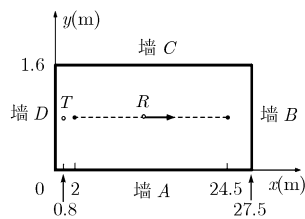


图9 走廊中接收天线沿着房间的中线移动

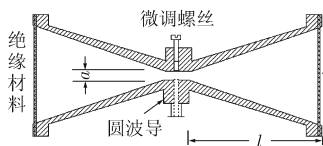


图10 双锥喇叭天线几何形状图

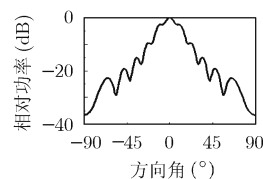


图11 双锥喇叭天线方向图

计算实例1 第1个模型取空房间的大小和天线的位置，墙壁为混凝土，其中混凝土的参数是 $\epsilon_r = 6.05$ ，空房间长10.8m，宽为9m，高为2.7m，发射及接受天线均采用双锥喇叭天线。发射天线位置为(0.8,0.8,1.7)，接收天线位置为沿着房间的对角线移动(图8)，高度为1.7m。发射信号频率为60.4GHz。四周墙体及天花板、地板的相对介电参数为 $\epsilon_r = 4$ ，并假设为理想介质，其中 $\sigma = 0$ ，另外设定发射信号的极化方向为垂直极化。仿真结果见图12，可以看到本文

的仿真结果图12(a)与文献[8]中的结果图12(b)是基本一致的。

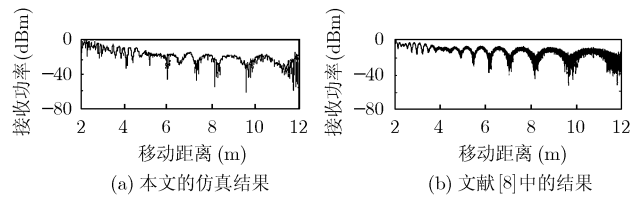


图12 空房间的接收功率预测对比示意图

计算实例2 第2个模型选取走廊长27.5m，宽为1.6m，高为2.7m，发射及接受天线均采用双锥喇叭天线。发射天线位置为(1.5,0.8,1.7)，接收天线位置为(xr,0.8,1.7)，接收天线沿着房间的中线移动(图9)。发射信号频率为60.4GHz。四周墙体及天花板、地板的相对介电参数为 $\epsilon_r = 4$ ，并假设为理想介质，其中 $\sigma = 0$ ，另外设定发射信号的极化方向为垂直极化。仿真结果见图13，可以看到本文的仿真结果图13(a)与文献[8]中的结果图13(b)是基本一致的。

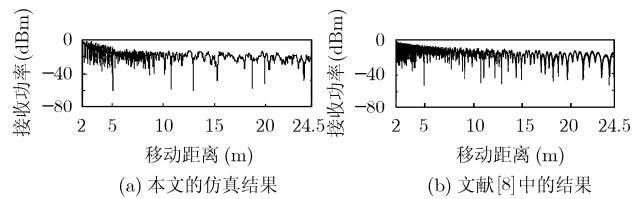


图13 走廊的接收功率预测对比示意图

5 结束语

从以上的仿真结果有力地证明了一个结论：本文提出的确定性射线管分裂法优于常见的射线追踪方法，通过与入射及反弹射线法、有固定分辨率的射线管分裂法等常见方法分别进行仿真比较，该方法均具有花费CPU时间较少、计算效率较高的优点。该方法在理论上还可以确保不放弃追踪任何一个对接收点有贡献的射线管，保证了场强预测的正确性。本文的确定性射线管分裂法可以用于任何复杂的传播环境中，它可以找到发射机到接收机的所有电波传播路径而具有较高的计算精度，另外该方法同时具有入射及反弹射线法和有固定分辨率的射线管分裂法的优点，同时剔除了它们的缺点，因此它是一种具有很高使用价值的微蜂窝电波传播预测方法。

参考文献

[1] Hamid M A K and Johnson W A. Ray-optical solution for the dyadic Green's function in a rectangular cavity. *Electron. Lett.*, 1970, 6(10): 317-319.
 [2] Honcharenko W, et al. Mechanisms governing UHF propagation on single floors in modern office buildings. *IEEE Trans. on*

- Vehic. Technol*, 1992, 41(4): 496-504.
- [3] Chen Shin hon and Jeng Shyh kang. An SBR/ Image approach for radio wave propagation in indoor environments with metallic furniture. *IEEE Trans. on AP*, 1997, 45(1): 98-106.
- [4] Tan S Y and Tan H S. A microcellular communications propagation model based on the uniform theory of diffraction and multiple image theory. *IEEE Trans. on Antenn. Propaga*, 1996, 44(2): 1317-1325.
- [5] Hae Won Son and Noh Hoon M yung. A deterministic ray tube method for microcellular wave propagation prediction Model. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat*, 1999, 47(8): 1344-1350.
- [6] Kreuzgruder P, Unterberger P, and Gahleinter R. A ray splitting model for indoor radio propagation associated with complex geometries. *IEEE VTC*, Australia, 1993: 227-230.
- [7] Kreuzgruber P, Brundl T, Kuran W, and Gahleitner R. Prediction of indoor radio propagation with the ray splitting model including edge diffraction and rough surfaces. *Proceedings of the 1994 IEEE 44th Vehicular Technology conference*, IEEE, Australia, 1994: 878-882.
- [8] Hhammoudeh A K. Millimetric wavelengths radiowave propagation for line-of-sight indoor microcellular mobile communications. *IEEE Trans. on Vehic. Technol*, 1995, 44(3): 449-460.
- [9] 陈泓, 室内声强分布的高效预测分析方法[D]. 南京邮电大学, 2006.
- 刘芫健: 男, 1973年生, 博士生, 研究方向为计算电磁学、射线追踪方法.
- 张业荣: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信系统与设计、电磁场的数值计算、UWB信道等.
- 曹伟: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场的数值计算及其在通信中的应用、射线追踪方法等.