

电波传播混合路径循迹的算法研究

周晓平¹, 吴德佩¹, 柳朝阳², 杨明珊¹

(1. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 数学系, 河南 郑州 450001)

摘要: 为快速准确预测基站周边环境辐射场强, 提出了射线跟踪技术中混合路径的反射点、绕射点算法. 给出了求镜像点与镜像线的通用公式, 提出了多次反射路径中反射点算法. 推出了多次绕射路径中绕射点算法的优化公式. 提出将混合型路径中反射及绕射进行适当的变换, 从而实现混合路径转换成绕射路径的算法. 最后将该算法运用于 z -缓存区改进算法中, 对一个通信基站周边环境中的射线传播路径进行跟踪, 并对场强进行计算, 计算结果与实测值非常吻合.

关键词: 电波传播; 射线跟踪; 角度缓存区算法; 传播路径; 移动通信基站; 反射点与绕射点

中图分类号: TN011; TN92 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.03.016

0 引言

现代移动通信技术的发展要求对电波传播进行准确预测, 以作为基站选址、评价电磁辐射对人体影响等的依据. 预测模型主要分为统计模型和确定性模型^[1]. 射线跟踪是确定性模型之一. 射线跟踪技术具有计算量较小, 能进行三维计算, 能考虑地形、地貌、地物等实际因素的影响, 模拟多径传播路径, 故射线跟踪技术能进行微小区电波传播预测. 对于复杂的建筑物环境, 直接遍历求解射线与面、劈、顶点的交点时, 计算量极大, 需要采用合适的射线跟踪加速算法. 近年来, 国内外学者提出的主要加速算法有二元空间分区 (binary space partitioning, BSP)^[2-3]、空间体积分区 (space volumetric partitioning, SVP)^[1,4] 和角度的 z -缓存区^[1,5] (angular z -buffer, AZB)、镜像法^[6] 等. 对于射线传播多次混合路径中, 合适的反射点、绕射点的计算方法同样能减少计算量、提高计算速度. 有学者对一次单纯反射及单纯绕射路径中反射点、绕射点的计算进行了详细讨论^[1], 鲜见有学者对多次混合路径中反射点、绕射点的算法进行讨论.

笔者在文献[7-8]的基础上, 针对如何快速准确地计算出混合路径的反射点、绕射点的算法进行研究, 提出如何将混合路径变换为绕射路径的算法, 并将该算法用于 z -缓存区改进算法中,

用 matlab 编程序对一个通信基站所在小区中的电波传播路径进行跟踪, 并对场强进行计算, 计算结果与实测值非常吻合.

1 绕射路径、反射路径的算法

1.1 反射路径反射点计算

1.1.1 镜像点与反射点

如图 1 所示, 由空间发射点 (或等效发射点) T_{m-1} (矢径 $\mathbf{r}_{T_{m-1}}$) 推出对于空间多面体面 π_m 所在的平面的镜像点 T_m 的矢径 \mathbf{r}_{T_m} 为

$$\mathbf{r}_{T_m} = \mathbf{r}_{T_{m-1}} - 2[\mathbf{n}_m \cdot (\mathbf{r}_{T_{m-1}} - \mathbf{r}_{P_{0m}})]\mathbf{n}_m. \quad (1)$$

式中: \mathbf{n}_m 为 π_m 的单位法向量; $\mathbf{r}_{P_{0m}}$ 为 π_m 上已知点 P_{0m} 的矢径.

接收点 (或等效接收点) 为 R_{m+1} (矢径 $\mathbf{r}_{R_{m+1}}$), 设连线 $T_m R_{m+1}$ 与 π_m 所在平面有交点 R_m , 求出矢径 \mathbf{r}_{R_m} 为

$$\mathbf{r}_{R_m} = \mathbf{r}_{R_{m+1}} + \frac{\mathbf{n}_m \cdot \mathbf{r}_{P_{0m}} - \mathbf{n}_m \cdot \mathbf{r}_{R_{m+1}}}{\mathbf{n}_m \cdot (\mathbf{r}_{T_m} - \mathbf{r}_{R_{m+1}})} (\mathbf{r}_{T_m} - \mathbf{r}_{R_{m+1}}). \quad (2)$$

如果 R_m 在 π_m 内, 则 R_m 是反射点, 否则 R_m 不是反射点.

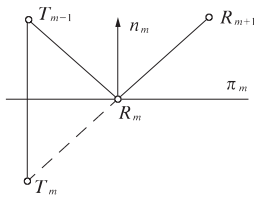
1.1.2 反射路径反射点计算

假设射线经过 M 次反射从发射天线 T (矢径 \mathbf{r}_T) 传播到接收天线 O (矢径 \mathbf{r}_O), 各阶镜像的矢径分别用 $\mathbf{r}_{T_1}, \mathbf{r}_{T_2}, \dots, \mathbf{r}_{T_M}$ 表示, 各反射面上反射点的矢径用 $\mathbf{r}_{R_1}, \mathbf{r}_{R_2}, \dots, \mathbf{r}_{R_M}$ 表示.

收稿日期: 2013-10-11; 修订日期: 2013-12-11

基金项目: 河南省科技厅科技攻关计划项目 (132102210194, 142102210492)

作者简介: 周晓平 (1966-), 女, 河南新野人, 郑州大学副教授, 主要研究方向为微波工程、天线与电波传播及电磁场数值计算等, E-mail: iexpzhou@zzu.edu.cn.

图1 第 m 次反射Fig.1 The m th reflection ray path

(1) 计算镜像矢径. 将 $m=1$ 及 $r_{T_0}=r_T$ 代入式(1)求出矢径 r_{T_1} , 然后将 r_{T_1} 及 $m=2$ 代入式(1)求出 r_{T_2} , 依此类推可求出各阶镜像矢径.

(2) 计算反射点矢径. 将 $m=M$ 及 $r_{R_{M+1}}=r_O$ 代入式(2)求出矢径 r_{R_M} . 如果 R_M 是 π_m 上的反射点, 就将 r_{R_M} 及 $m=M-1$ 代入式(2)求出 $r_{R_{M-1}}$. 依此可求出各阶反射点矢径.

如果入射线及所有的反射线都没有被多面体遮挡, 则该反射路径存在.

1.2 绕射路径中绕射点计算

多次绕射射线路径如图2所示. 假设射线从发射天线 T 发出经过空间若干个多面体面的 N 个直劈绕射, 最终到达接收点 O . 第 i 个劈上的绕射点矢径 $r_{Q_i}(t_i)$ 为

$$r_{Q_i}(t_i) = r_{p_{i,1}} + t_i(r_{p_{i,2}} - r_{p_{i,1}}). \quad (3)$$

式中: $t_i(0 \leq t_i \leq 1, i=0, 1, \dots, N, N+1)$ 为直劈参数, $r_{p_{i,1}}$ 和 $r_{p_{i,2}}$ 分别是直劈两端点矢径. $i=0$ 表示源点 T (矢径 r_T), 且 $t_0=0, r_{p_{0,2}}=r_{p_{0,1}}=r_T$; $i=N+1$ 表示接收天线所在点 O (矢径 r_O), 且 $t_{N+1}=0, r_{p_{N+1,2}}=r_{p_{N+1,1}}=r_O$.

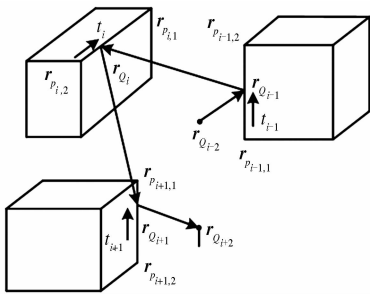


图2 多次绕射射线路径

Fig.2 The repeatedly diffracted ray path

根据绕射定理, 可推得方程:

$$\sum_{i=1}^N [(r_{p_{i,i-1,1}} + t_i r_{p_{i,21}} - t_{i-1} r_{p_{i-1,21}}) \cdot r_{p_{i,21}} | r_{p_{i+1,i,1}} + t_{i+1} r_{p_{i+1,21}} - t_i r_{p_{i,21}} | - (r_{p_{i+1,i,1}} + t_{i+1} r_{p_{i+1,21}} - t_i r_{p_{i,21}}) \cdot r_{p_{i,21}} | r_{p_{i,i-1,1}} + t_i r_{p_{i,21}} - t_{i-1} r_{p_{i-1,21}} |]^2 = 0. \quad (4)$$

式中, $r_{p_{i,i-1,1}} = r_{p_{i,1}} - r_{p_{i-1,1}}, r_{p_{i,21}} = r_{p_{i,2}} - r_{p_{i,1}}, r_{p_{i-1,21}} = r_{p_{i-1,2}} - r_{p_{i-1,1}}, r_{p_{i+1,21}} = r_{p_{i+1,2}} - r_{p_{i+1,1}}, r_{p_{i+1,i,1}} =$

$$r_{p_{i+1,1}} - r_{p_{i,1}}.$$

运用优化算法对方程(4)求解, 求出劈参数 $t_i(0 \leq t_i \leq 1, i=1, \dots, N)$, 将它们分别代入式(3), 即可求出绕射点矢径 $r_{Q_i}(i=1, \dots, N)$.

如果各阶绕射点都存在, 且入射线及所有绕射线都未被遮挡, 则该绕射路径存在.

2 混合路径向绕射路径变换算法

射线从发射天线发出经过若干次反射、绕射最终传播到达接收点时的路径是混合路径. 假设一条路径中射线转折 M 次, 其中反射 L 次, 绕射 $M-L$ 次. 由式(4)较容易求出绕射路径中绕射点, 故计算混合路径的反射点、绕射点时, 将其转换成绕射路径.

2.1 镜像线

如果一条水平棱或垂直棱所在的直线方程表示为 $G_1(r)=0, G_2(r)=0$, 则其对于多面体面 π_m 镜像的直线为

$$\begin{cases} G_1(r_{T_m})=0; \\ G_2(r_{T_m})=0. \end{cases} \quad (5)$$

式中, r_{T_m} 满足式(1).

2.2 第一次反射时路径变换

混合路径向绕射路径的正向变换如图3所示. 假设射线第 i 次转折是第一次反射, 反射面为 π_i , 反射点为 R_i . 根据式(1)求出 T 关于面 π_i 的一阶镜像点 T_i , 根据式(5)分别求出 $A_1 B_1, \dots, A_{i-1} B_{i-1}$ 关于面 π_i 的一阶镜像绕射棱 $A'_1 B'_1, \dots, A'_{i-1} B'_{i-1}$, 则点 Q'_1, \dots, Q'_{i-1} 分别是绕射棱 $A_1 B_1, \dots, A_{i-1} B_{i-1}$ 上的绕射点 Q_1, \dots, Q_{i-1} 对于反射面 π_i 的一阶镜像绕射点. 可以证明入射线 $Q'_{i-1} R_i$ 的镜像线 $Q'_{i-1} R_i$ 与反射线 $R_i Q_{i+1}$ 在同一条直线上. 由此将混合射线 $TQ_1 \rightarrow \dots \rightarrow Q_{i-1} R_i \rightarrow R_i Q_{i+1}$ 转换成一阶 $i-1$ 次镜像绕射射线 $T_1 Q'_1 \rightarrow \dots \rightarrow Q'_{i-1}$. 这种转换是正向变换.

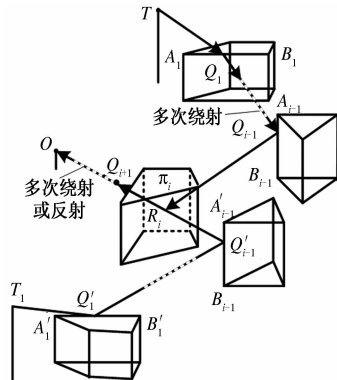


图3 混合路径向绕射路径的正向变换

Fig.3 The positive transformation from a hybrid path to a diffraction path

2.3 最后一次反射时路径变换

混合路径向绕射路径的反向变换如图 4 所示. 设射线第 m 次转折是最后一次反射, 反射面是 π_m , R_m 是反射点. 根据式 (1) 求出接收天线 O 对于面 π_m 的一阶镜像点 T_o , 根据式 (5) 分别求出 $A_{m+1}B_{m+1}, \cdots, A_MB_M$ 对于面 π_m 的一阶镜像绕射棱 $A'_{m+1}B'_{m+1}, \cdots, A'_MB'_M$, 则点 Q'_{m+1}, \cdots, Q'_M 分别是绕射棱 $A'_{m+1}B'_{m+1}, \cdots, A'_MB'_M$ 上绕射点 Q_{m+1}, \cdots, Q_M 对于反射面 π_m 的一阶镜像绕射点. 可以证明, $Q'_{m+1}R_m$ 与 R_mQ_{m-1} 在同一条直线上, 由此将混合射线 $Q_{m-1}R_m \rightarrow R_mQ_{m+1} \rightarrow G_{m+1}Q_{m+2} \rightarrow \cdots \rightarrow Q_MO$ 转换成一阶 $M-m$ 次镜像绕射射线 $Q_{m-1}Q'_{m+1} \rightarrow Q'_{m+1}Q'_{m+2} \cdots \rightarrow Q'_MT_o$. 这种变换是反向变换.

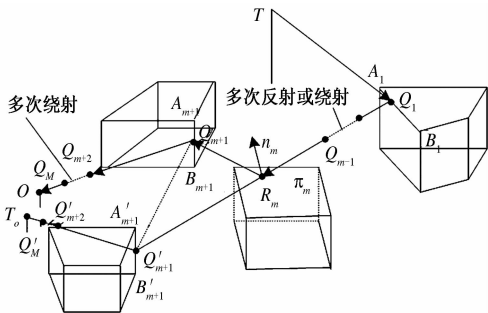


图 4 混合路径向绕射路径的反向变换
Fig. 4 The reverse transformation from a hybrid path to a diffraction path

2.4 第二次反射与倒数第二次反射之间路径变换

假设射线有 L 次转折是由反射引起的. 当射线遇到第二个与第 $L-1$ 个反射面之间的那些反射面时, 采用正反向计算. 正向计算: 当射线遇到第二个反射面时, 求出一阶镜像绕射棱及绕射点关于第二个反射面的镜像绕射棱及绕射点, 就将第二个反射面的入射线和反射线展开在同一条直线上, 得到二阶镜像绕射射线. 依此类推求得 $3, \cdots, V$ 阶正向镜像绕射射线.

反向计算: 当射线遇到第 $L-1$ 个反射面时, 求出一阶镜像绕射棱及绕射点对于第 $L-1$ 个反射面的镜像绕射棱及绕射点, 就将它的入射线和反射线展开在同一条直线上, 得到二阶镜像绕射射线. 依此类推求得 $3, \cdots, W$ 阶反向镜像绕射射线.

正向运算阶数 V 及反向运算阶数 W 必须满足 $V+W=L$, 由此得到 $M-L$ 阶镜像绕射路径.

3 混合路径中反射点、绕射点计算

根据 1.2 算法求出 2 中的 $M-L$ 阶镜像绕射

路径的绕射点及镜像绕射点.

3.1 绕射点计算

将 $r_{p_{0m}} = r_{p_{0p}}, n_m = -n_p, r_{T_{m-1}} = r_{Q'_{p_i}}$ 代入式 (1) 可求出关于面 π_p 的第 i 个镜像绕射点 Q'_{p_i} . 如果 Q'_{p_i} 是多次镜像的结果, 则多次运用式 (1) 最终求出绕射点 Q_p .

3.2 反射点计算

在正向算法中令 $T_m = Q'_{n-1}, R_{m+1} = Q'_{n+1}$, 在反向算法中令 $T_m = Q'_{j+1}, R_{m+1} = Q'_{j-1}$, 将它们分别代入式 (2) 求出各次反射点.

如果各反射点及绕射点有效, 则对入射线及反射线、绕射线做遮挡测试. 如果其它多面体都没有挡住这些射线, 则该混合型路径有效.

4 计算实例

为了验证算法的正确性, 在一个通信基站周围选若干个测试点, 进行测量与计算. 该基站位于一个建筑物楼顶, 发射天线极化角为 $\pm 45^\circ$, 下倾角 6° , 架设高度 35.1 m, 增益 18 dB, 发射功率 20 W, 发射天线到中心桅杆的距离为 148 cm, 测试频率 1 839 MHz. 考虑小区环境中的 5 个建筑物, 均为长方体.

以基站中心桅杆在地面上位置为坐标原点, 采用 matlab 编程, 对其周围建筑物间射线传播路径中遇到的面上反射点及棱上绕射点及场强^[8]进行计算.

4.1 传播路径及反射、绕射点坐标

基站天线实际由三幅发射天线构成, 由于篇幅所限, 下面只列出三幅发射天线中的一幅到一个测试点间混合型路径上的反射点、绕射点. 发射天线位置: (1.19, 0.74, 35.1), 接收点位置: (-1, -21.5, 1.03). 表 1 列出混合路径中反射点、绕射点坐标, 单位为 m.

表 1 两次混合型路径中绕射点或反射点坐标
Tab.1 The two order hybrid path diffraction point or reflection point coordinates

路径	第一个绕射点或反射点(x,y,z)/m	第二个绕射点或反射点(x,y,z)/m
垂直绕射→反射	(29.49, -3.17, 20.90)	(3.43, -25.25, 3.91)
	(15.42, -25.25, 21.32)	(6.45, -3.17, 10.23)
	(-42.18, -25.25, 19.19)	(-19.68, -3.17, 9.27)
	(84.95, -31.19, 18.79)	(32.99, -3.17, 8.05)
水平绕射→反射	(0.54, -3.17, 21.80)	(0.78, -25.25, 4.05)
	(29.49, -2.61, 21.80)	(-73.28, -13.70, 9.61)
	(0.36, -25.25, 24.20)	(-0.38, -3.17, 11.54)
	(-73.28, -14.48, 14.80)	(-19.67, -25.25, 4.59)
反射→垂直绕射	(29.49, -1.77, 20.81)	(13.77, -3.17, 12.87)
	(7.99, -25.25, 22.60)	(13.77, -3.17, 11.98)

经过验证, 由表 1 中的反射点、绕射点组成的电波传播路径满足反射定理、绕射定理.

4.2 通信基站周边环境中场强计算值与测量值

为了验证该算法寻找的路径没有遗漏,将该算法运用于改进型 z - 缓存区改进算法^[7]中,并对场强进行了计算^[8]及测量.表 2 列出通信基站周边环境中场强计算值与测量值的比较.

由表 2 可知,计算值与测量值之间的误差不超过 ± 4.5 dB.

表 2 通信基站场强计算值与测量值比较
Tab.2 The calculated communication base station field intensity values compared with the measured values

测试点/m	计算值/dB	测量值/dB	误差/dB
(-56.18,17.68,1.03)	95.358 5	97.900 0	-2.541 5
(-56.18,5.68,1.03)	110.679 2	107.005 0	3.674 2
(-56.18,-2.32,1.03)	108.385 5	106.660 9	1.724 6
(-56.18,-16.67,1.03)	109.885 2	113.048 8	-3.163 6
(-38.18,-16.67,1.03)	111.666 1	115.917 6	-4.2515
(1.82,-16.67,1.03)	107.181 0	106.107 0	1.0740
(21.82,-16.67,1.03)	106.762 3	104.120 3	2.642 0
(24.27,-12.32,1.03)	109.589 2	106.402 9	3.186 3
(24.27,11.68,1.03)	104.130 5	101.712 9	2.417 6
(24.27,17.68,1.03)	107.899 5	107.051 4	0.848 1
(24.27,29.68,1.03)	95.477 1	98.952 5	-0.902 8
(-1.00,-21.5,1.03)	106.107 0	107.181 0	-1.074 0

5 结论

(1)运用所提算法得出的反射点、绕射点构成的混合路径满足反射定理、绕射定理,说明反射点、绕射点及路径转换算法是正确的.

(2)测试场强与计算结果误差不超过 ± 4.5 dB,符合工程上精度要求,证明所提出的路径循迹算法是有效的.

(3)提出的算法能用于计算任意阶混合路径,能用于任何一种射线跟踪技术中,该算法编制的程序能用于评价、预测电磁环境.

参考文献:

[1] 吴志忠.移动通信无线电波传播[M].北京:人民邮电出版社,2002.

[2] 周东明,覃宇建,何建国.一致性绕射理论加速的时域积分方程方法[J].微波学报,2010,26(3):34-37.

[3] 任晶晶,冯获,陈卫东.基于时域射线法的 IR - UWB 信号穿墙传播建模与分析[J].微波学报,2012,28(2):9-15.

[4] 杨晋生,胡自胜,陈为刚.射线跟踪中三维矢量数据库建立方法[J].电信科学,2012,28(2):110-114.

[5] CATEDRA M F, PEREZ,J, Saez de Adana F, et al. 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,1998, 40(2):15-28.

[6] 袁正午,杨青宏,沐维.一种改进的镜像射线跟踪方法[J].计算机工程,2012,38(3):60-62.

[7] 周晓平,谭凤杰,柳朝阳,等.射线跟踪技术的一种加速算法[J].电波科学学报,2013,28(3):491-497.

[8] 周晓平,谭凤杰,柳朝阳,等.射线跟踪技术中场强计算的改进算法[J].电波科学学报,2013,28(4):669-675.

Research on Hybrid Path Tracking Algorithm in Ray Tracing Techniques

ZHOU Xiao-ping¹, WU De-pei¹, LIU Chao-yang², YANG Ming-shan¹

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Mathematics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A quick accurate algorithm for reflection points and diffraction points in hybrid paths, as a ray-tracing technique, was put forward, for forecasting station surrounding environment radiation field intensity. With a general formula for mirror image points and image lines, an algorithm for reflection points in multihop paths was presented. An optimization formula for diffraction points in multiple diffraction path algorithm was introduced. By proper transformation between reflection and diffraction in hybrid paths, the algorithm which transform hybrid paths into diffraction paths was implemented. Finally, the proposed algorithm was applied to improve the z-buffer algorithm, the ray propagation path was tracked and field strength was calculated in the surrounding environment around a communication base station. The numerical results from the algorithm are in good agreement with the measured values.

Key words: radio wave propagation; ray-tracing; ray-tracing AZB algorithm; propagation path; mobile communication base; reflection point and diffraction point