2023年8月

文章编号: 2095-4980(2023)08-0992-05

室内射线跟踪关于反射次数的收敛性分析

周龙建,付 松

(中国西南电子技术研究所,四川 成都 610036)

摘 要:由于射线跟踪所需时间随着反射次数增加而迅速增加,反射次数的上限值对于室内 射线跟踪的精确度和效率至关重要。因此,本文开展了一个基于统计分析室内场景数据的射线跟 踪收敛性研究。通过统计场景中的分布特征,分析射线跟踪不同反射路径的概率,研究接收功率 关于射线跟踪最大允许反射次数的收敛关系,得出最优的反射次数上限值,实现优化室内射线跟 踪的效率和精确度。将本文模型收敛性与射线跟踪仿真结果的收敛性参数进行对比,在同样计算 精确度下,本文模型的收敛结果与射线跟踪仿真收敛结果一致,验证了本文模型的准确性。

关键词:射线跟踪;室内场景;收敛分析;射线跟踪加速

中图分类号: TN011.92 文献标志码: A doi: 10.11805/TKYDA2021218

Convergence analysis on reflection in indoor 3D ray tracing

ZHOU Longjian, FU Song

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu Sichuan 610036, China)

Abstract: Computational time in indoor Ray Tracing(RT) would rise sharply if more reflections are considered. The upper limit value of reflection number is the key to the efficiency of indoor RT. However, the convergence of reflection in indoor RT has not been clearly discussed yet. A convergence analysis of RT based on statistically studying digital data of indoor scenario is presented aiming to obtain the appropriate upper limit value of reflection number to improve the efficiency of RT without losing accuracy. Convergence study focuses on the distribution of indoor scene, derives the probabilities and the power of different reflection paths, and finally finds out the convergence result of the power of receiver and the upper limit value of reflection number. The comparisons with RT simulation show that the convergence of this model is consistent with that of RT simulation under the same computational accuracy and this study is feasible to improve the efficiency of RT.

Keywords: Ray Tracing; indoor scenario; convergence analysis; acceleration

近年来无线通信技术发展迅猛,室内室外电磁环境日益复杂,环境中电磁的分布很大程度上会影响通信效 果及系统架设,因此需要对环境中的场强覆盖进行精确的计算或预测。但人工实地测量工作繁杂,耗时耗力, 因此采用电波传播预测模型进行信道特征获取以及电磁辐射预测已成为首选。传统的经验预测模型,如适用于 城区场景的Hata-Okumura模型^[1-4],以及扩展的COST-Hata-Model模型^[5]等,计算速度快,并具有足够的准确 性。但这些经验模型需要充足的实地测量数据不断进行校正,且经验模型适用范围小。在计算电磁学方法中, 有基于全波仿真的技术,如时域有限差分法^[6]和有限元法^[7];有基于几何光学的射线跟踪法。这些方法虽然计算 时间较长,但准确性高,并能够适用于一些复杂的场景。自20世纪90年代起,结合几何光学模型和一致性绕射 模型的射线跟踪被广泛用于室内或城区场景的场强预测中^[8-9]。但在预测场景较为复杂或所需精确度较高(射线反 射、绕射次数多)时,射线跟踪算法的运算时间剧增,传统的射线跟踪算法已无法满足要求。因此,射线跟踪的 加速技术成为研究的热点。

射线跟踪的加速计算研究中,绝大部分是从简化场景和空间分割的角度来加速算法,但少部分从优化射线 跟踪初始参数的角度加速电波传播预测的研究也逐渐展开。B Choudhury等针对客机场景的改良射线追踪模型, 开展了关于射线追踪计算时间和射线追踪过程中反射次数的收敛分析研究^[10]。L Azpilicueta等针对复杂的室内场 景,分析研究不同反射次数、不同初始发射射线数量情况下射线追踪的结果,进行了接收功率和反射次数、射 线数量的收敛性研究^[11]。之后又针对几何光学一统一绕射理论(Geometric Optics-Geometrical Theory of Diffraction, GO-UTD)方法,在不同绕射分割角度的情况下,以射线跟踪的结果和时间为参考,进行了收敛性 分析^[12]。

上述收敛分析研究是在不同仿真参数下,分析特定场景的射线跟踪仿真结果,得到收敛结果,仅适用于当前场景,缺乏普适性。本文提出一个射线跟踪预处理的纯理论模型,模型通过对室内场景进行理论的统计分析,依靠场景的分布特征推导射线跟踪反射路径的概率和功率,结合射线跟踪所需的计算精确度,寻找最合适的符合精确度的射线跟踪反射上限次数,在满足计算需求的前提下,减少室内射线跟踪的时间。

1 收敛分析模型

室内射线跟踪在考虑尽可能多的反射次数情况下,仿真的结果相对更精确。但射线跟踪的计算效率却会因为引入更多反射而迅速降低。因此,本收敛模型将探索室内射线跟踪合适的反射次数上限值。在此上限值下,射线跟踪既能够满足射线跟踪计算精确度需求,又能够防止过度降低计算效率。本模型基于混合射线跟踪算法(^{13]},混合射线跟踪算法依靠射线弹跳算法搜索路径,再利用镜像法修正路径,确保路径有效。

本模型的运行流程为:

1) 从场景数据中提取基本参数;

2) 根据基础参数推导反射路径的概率和功率表达式;

3) 根据上述表达式遍历寻找最佳反射次数上限值。

1.1 模型参数

室内射线跟踪随着反射次数增加,射线被接收的概率会改变。单独讨论一条射线的射线跟踪,随着其反射 次数的增加,射线所经过的距离也增大。参考 Saeidi Chiya关于面与面的可见性的研究方法^[14],收敛模型通过预 处理三维室内场景数据,提取以下主要的基础参数用于推导反射路径概率和功率的表达式。

1) 发射机到其可见的面的平均距离 $L_{TX-face}$;

2) 接收机到其可见的面的平均距离 $L_{RX-face}$;

3) 场景中互相可见的面与面之间的平均距离 L_{ref} ;

4) 射线在场景中从一个面射到另一个面的入射角度(此 入射角度定义为2个面中心的连线与法向量的夹角,如图1 所示, θ₂₁为射线从面2出发(O₂为面中心),在面1(O₁为面中 心)进行反射的入射角度)的期望θ_{ref};

5) 发射机和接收机的距离 L_{TX-RX};

6) 场景中三角面的周长平均值 \bar{C}_{\circ}

1.2 反射路径的概率和功率表达式

1.2.1 概率表达式

在室内射线跟踪过程中, 某条射线要么成功被接收球接收, 要么继续在室内反射, 因此本文定义了条件概率 P_{RX}^n (表示射线跟踪时,前n-1次反射都未打到接收球上, 在第n次



Fig.1 Incident angle from face 2 to face 1 图1 面2对于面1的入射角度

反射后,射线打到接收球的概率)。在此条件概率的基础上,射线跟踪 n 次反射后成功到达接收机的传播路径的 概率 Pⁿ_B为:

$$P_{\rm R}^{n} = (1 - P_{\rm LOS}) \prod_{i=1}^{n-1} (1 - P_{\rm RX}^{i}) P_{\rm RX}^{n}$$
(1)

式中: P_{LOS} 为射线跟踪中一条射线为直射射线的概率; $(1 - P_{\text{LOS}})$ 表示射线从发射机发射后,没有直接被接收球接收的概率。

为了推导条件概率*P*ⁿ_{RX},参考如图2所示的条件概率对应事件的三维场景。将*P*ⁿ_{RX}定义为接收球在半球面上的 投影面积与半球面的面积之比,即:

$$P_{\rm RX}^n = \frac{N_{\rm RX}}{N_{\rm all}} \times \frac{\pi r_{\rm n}^2}{2\pi d^2}$$
(2)

第 21 卷

 $L_{\rm RX-face}$

receiver

式中: r_n 为接收球半径;d为反射面到接收球的距离,即 $L_{RX-face}$; N_{RX} 和 N_{all} 分别为对接收机可见的面的数量和场 景中面的总数量, $\frac{N_{RX}}{N_{all}}$ 保证当前事件下的反射面对接收 机可见。

射线跟踪接收球半径r,,为:

$$r_n = \frac{l_n \theta}{\sqrt{3}} \tag{3}$$

式中: θ 为射线跟踪初始发射射线时相邻射线的夹角; l_n 为射线经过的距离。参照图3, l_n 可以由预处理场景得到的参数表示:

$$l_n = L_{\text{TX-face}} + (n-1)L_{\text{ref}} + L_{\text{RX-face}}$$
(4)

最后整理可得条件概率表达式为:

$$P_{\rm RX}^{n} = \frac{N_{\rm RX} \times \theta^2}{N_{\rm all}} \times \frac{\left[L_{\rm TX-face} + (n-1)L_{\rm ref} + L_{\rm RX-face}\right]^2}{\left[6L_{\rm RX-face}\right]^2}$$
(5)

1.2.2 功率表达式

994

三维场景下,射线跟踪得到的反射路径的场强为:

$$\boldsymbol{E} = \sqrt{\frac{P_{\mathrm{T}}\eta_{0}}{2\pi}} g_{\theta}(\theta,\phi) \frac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}\beta r_{\mathrm{TR}}}}{r_{\mathrm{TR}}} \prod_{m=1}^{n} R_{m}$$
(6)

式中: $P_{\rm T}$ 为发射机的功率; η_0 为本征阻抗; $g_{\theta}(\theta, \phi)$ 为发射机初始发射射线的仰角和方位角对应的增益; $r_{\rm TR}$ 为射 线经过的距离; $R_{\rm m}$ 为反射衰减系数; β 为传播常数, $\beta = 2\pi f \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$, $\mu_0 \pi \varepsilon_0$ 分别为真空中的磁导率和介电常数。考 虑到反射路径的功率与反射路径场强的模值平方成正比,并且统计分析反射路径功率时,射线方向具有任意性, 因此忽略 $g_{\theta}(\theta, \phi)$ 造成的影响。不同反射路径的功率表达式可简化为:

transmitter

 $L_{\text{RX-fit}}$

$$P_{n} = K \prod_{1}^{n} a_{n} \times \frac{1}{l_{n}^{2}}$$
(7)

式中: P_n 为n次反射路径的功率;K综合了 P_T 、 η_0 和方向性函数 $g_{\theta}(\theta, \phi)$ 的影响,在本模型固定为常系数; a_n 为每次反射的功率衰减系数,可以由模型基础参数平均入射角度 θ_{ref} 推导得到。

1.3 计算最佳反射次数上限值

在反射路径概率和功率表达式的基础上,将所有反射路径的功率根据其概率加权求和得到总接收功率P,则 m次以内的反射路径功率和为:

$$P = N_{\text{init}} \sum_{n=0}^{m} (P_{\text{R}}^{n} \times P_{n})$$
(8)

式中*N*_{init}为射线跟踪初始发射射线数量。为了得到反射次数的收敛结果,本文量化了射线跟踪接收功率关于反射 次数的收敛性,定义了*P*_m和比值*W*:

$$P_{\rm sum} = N_{\rm init} \times P_{\rm R}^{m} \times P_{m} \tag{9}$$

$$W = \frac{P_{\text{sum}}}{P} \tag{10}$$

式中: P_{sum}为所有m次反射路径的功率和; W表示反射次数为临界值的反射路径功率占比。假设此次射线跟踪要





n times reflection

Fig. 3 Ray received by receiver after n times of reflection

图3 射线经n次反射到达接收机

求跟踪占总功率 MIN 以上的路径,当比值 W小于 MIN 时,表明 m 次及 m 次以上的反射路径在本次射线跟踪不需要考虑。因此遍历计算,得到最大的 m_{max},使 W > MIN,则最适合此场景的反射次数上限值为 m_{max}。

2 模型验证

为验证收敛模型的正确性,建立2个典型的室内场景,用于仿真对比收敛模型的收敛结果和射线追踪仿真数据分析出的收敛结果。场景1:1间空的大厅,长20m,宽10m,高4m,墙壁材料设置为混凝土材料,其中介电常数为25,电导率为0.02。场景2:在场景1的基础上,在大厅中设置10张桌子。发射机和接收机设置在场景两端,发射机频率为1GHz。射线跟踪初始发射射线时的相邻射线夹角为1°,并假设射线跟踪计算精确度需求为1×10⁴。在上述条件下,分别开展收敛模型的计算和射线跟踪仿真的计算,不同反射次数的功率占比结果对比如图4~5所示。



场景1的结果对比显示,射线跟踪仿真在反射次数上限值最大为18时,能满足计算精确度需求;收敛模型 在反射次数上限值最大为17时,能满足精确度需求。对比反射次数为17和18时射线跟踪仿真的总接收功率,两 者仅相差0.089%。虽然收敛模型的收敛结果与仿真的收敛结果存在细微差异,但反射次数上限的差异对总接收 功率的影响几乎可以忽略。场景2的对比显示,射线跟踪仿真和收敛模型都是在反射次数上限值最大为18时能 满足精确度需求。因此,通过模型与射线跟踪仿真结果对比,在2种场景下,本模型得到的收敛结果与射线跟踪 仿真分析出的收敛结果一致,验证了收敛模型的正确性。

3 结论

本文建立了针对室内射线跟踪的收敛性分析模型。收敛模型通过预处理操作,从三维的室内场景中分析场 景分布状况,再根据场景分布特征,建立射线跟踪反射路径的概率模型,研究根据概率加权求和的射线跟踪总 接收功率的收敛性,得到最佳的射线跟踪基本参数。对比射线跟踪仿真结果得出的收敛参数发现,本模型得到 的最佳参数与射线跟踪仿真结果分析得出的参数一致,验证了本模型的正确性。如果将模型与现今的一些射线 跟踪加速技术相结合,能够帮助室内无线通信系统的铺设工作,具有实际的应用价值。

参考文献:

- HATA M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1980,29(3):317-325.
- [2] OKUMARA Y,OHMORI E,KAWANO T, et al. Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile radio service[J]. Review of the Electrical Communication Laboratories, 1968,16(9-10):825-873.
- [3] BERTONI H L. Radio propagation for modern wireless systems[M]. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2000.
- [4] RAPPAPORT T S. Wireless communications: principles and practice[M]. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2002.
- [5] DAMOSSO E, CORREIA L M. COST action 231: digital mobile radio towards future generation systems: final report[M]. Brussels,

Belgium:European Commission, 1999.

- [6] TAFLOVE A, HAGNESS S C. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method[M]. 3rd ed. Boston, MA: Artech House, 2005.
- [7] JIN J M. The finite element method in electromagnetics[M]. 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2002.
- [8] SEIDEL S Y, RAPPAPORT T S. Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communication system design[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1994,43(4):879-891.
- [9] YANG C F, WU B C, KO C J. A ray-tracing method for modeling indoor wave propagation and penetration[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998,46(6):907-919.
- [10] CHOUDHURY B,SINGH H,BOMMER J P,et al. RF field mapping inside a large passenger-aircraft cabin using a refined raytracing algorithm[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2013,55(1):276-288.
- [11] AZPILICUETA L,RAWAT M,RAWAT K,et al. Convergence analysis in deterministic 3D ray launching radio channel estimation in complex environments[J]. The Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2021,29(4):256-271.
- [12] AZPILICUETA L, AGUIRRE E, LÓPEZ-ITURRI P, et al. An accurate UTD extension to a ray-launching algorithm for the analysis of complex indoor radio environments[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2016,30(1):43-60.
- [13] TAN S Y,TAN H S. A microcellular communications propagation model based on the uniform theory of diffraction and multiple image theory[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996,44(10):1317-1326.
- [14] SAEIDI C, FARD A, HODJATKASHANI F. Full three-dimensional radio wave propagation prediction model[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012,60(5):2462-2471.

作者简介:

周龙建(1988-),男,博士,工程师,主要研究方向为目标辐射与散射特征控制方向.email:ljz_0528@163.com.

付 松(1986-),男,博士,工程师,主要研究方 向为目标特性研究、复杂电磁环境构建与评估.