

基于 Wireless Insite 的无线信道教学研究

朱秋明^{1,2}, 陈小敏¹, 杨婧文¹, 杨建华¹, 李明昇³

(1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院,南京 211106;

2. 赫瑞瓦特大学 工程与物理科学学院,英国 爱丁堡 EH14 4AS;

3. 实密国际贸易(上海)有限公司,上海 200070)

摘要:针对无线信号传播过程抽象不易理解的问题,采用射线跟踪方法对电波传播机制及无线信道模型进行分析,将 Wireless Insite(WI)电磁仿真软件引入教学课堂,设计并实现了室内和城市两个典型传播场景的教学案例。该案例能够清晰地演示不同路径信号的传播过程,并图形化给出功率延迟分布、路径损耗和信号强度等无线信道特征参数。教学实践表明,该方法有助于学生直观地观测传播过程中直射、反射和绕射等对传播信号幅度和相位的影响,体会传播场景及收发机位置对接收功率及多径时延的影响,为将来进一步学习物理层算法、网络优化及无线定位等知识奠定理论基础。

关键词:无线信道仿真; 射线跟踪; 无线现场; 路径损耗

中图分类号:TN 914.3 文献标志码:A 文章编号:1006 - 7167(2019)08 - 0000 - 00



Application of WI in Teaching of Wireless Channel

ZHU Qiuming^{1,2}, CHEN Xiaomin¹, YANG Jingwen¹, YANG Jianhua¹, LI Mingsheng³

(1. College of Electronic Information and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. School of Engineering & Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh EH14 4AS, UK; 3. Schmdit International Trading, Shanghai 200070, China)

Abstract: Radio propagation is abstract and indigestible. In this paper, the ray tracing method is adopted to analyze the mechanism of radio propagation and wireless channel modeling. In addition, an electromagnetic simulation software, Wireless Insite, is introduced to the classroom and used to design two typical teaching cases, i. e., the indoor scenario and urban scenario. These two cases can clearly demonstrate the propagation process of multi-path signals and provide the graphic results of channel characteristic parameters such as the power delay profile (PDP), path loss, and signal strength. The teaching practice has shown that this method can help students to observe the impact of the line of sight, reflection and diffraction on the amplitudes and phases of transmitting signals, and understand the effect of propagation scenarios and transceiver's positions to the received power and multi-path delay. All these lay a solid for further studying on the algorithms of physical layer, network optimization and wireless location.

Key words: wireless channel simulation; ray tracing; wireless insite; path loss

0 引言

通信原理和移动通信是我校信息工程专业的重要基础课,在整个信息类专业课程体系中起着承上启下的关键作用^[1-3]。随着移动通信技术的发展,用户对传输速率和系统容量的需求也不断增加。目前,我国的 4G 通信系统已经步入实用化阶段,5G 技术也日趋

收稿日期:2018-09-11

基金项目:教育部产学合作协同育人项目(美国家仪器公司 201702008035);“通信原理”省级教学团队培育项目(1804ZJ02JC01)

作者简介:朱秋明(1979-),男,江苏苏州人,博士,副教授,主要从事通信原理和软件无线电教学,无线信道测量及建模方面的科研工作。

Tel.: 13913949577; E-mail: zhuqiuming@nuaa.edu.cn

成熟并开始局部部署。然而,大容量和高数据速率的需求对移动通信的网络规划和优化提出了更高的要求^[4-5]。

早期的蜂窝小区划分和基站选址优化通过实际测量和反复测试来实现,需要投入大量的人力、财力和物力,既不经济,也不科学。那么如何高效、经济地进行基站选址,并使系统传输速率及网络效率达到最优化,是当前无线通信网络技术的重要课题。深入理解无线电波传播规律,建立符合实际传播场景的信道传播模型,是影响无线网络优化结果的一个重要因素,也是我校通信原理及移动通信课程重要的课堂知识点^[6-7]。

然而,无线信号传播是一个复杂的时变随机过程,板书和课堂讲授很难描述清楚无线电波在传播过程中到底产生了哪些随机变化。作者所在课程组长期从事无线衰落信道的相关研究,经过多年教学摸索和尝试,将无线现场(Wireless Insite, WI)电磁仿真软件运用于课堂教学中,使学生通过直观观测电磁波信号直射、反射和散射的传播过程,理解无线信号传播损耗的物理意义,加深了学生对无线通信原理的理解,已获得较好的教学效果。

1 基于射线跟踪的信道传播模型

常见的无线信道模型包括两类,基于实测数据或经验公式的统计模型^[8-9]和基于电磁理论分析的确定性模型^[10]。统计模型的实测会耗费大量人力和物力,而且小区半径的减小使得小区之间原有的相似特性失效。确定性模型广泛采用的射线跟踪方法可以辨认出所有可能的传播路径,并根据电磁波传播理论来计算每条射线的幅度、相位、延迟和极化,然后结合天线方向图和系统带宽可以得到接收点处所有信号叠加的结果^[11]。另外,随着移动通信系统高频段的发展趋势,信号波长远小于障碍物尺寸的应用条件也可以得到满足。

由几何光学理论可知,射线的主要传播机制有直射、反射、透射和绕射。接收端接收到的信号是来自不同路径信号的叠加,对应复信道单位冲激响应可表示为^[12-13]:

$$h(t) = \sum_{n=1}^N A_n \delta(t - \tau_n) e^{-j\theta_n} \quad (1)$$

式中:N为有效传播路径数目;δ(·)为冲激函数;A_n, τ_n, θ_n分别为第n条路径的幅度、延迟和相位。不同路径信号的功率和时延通常用功率延迟分布为:

$$p(\tau_n) = \frac{a_n^2(\tau_n)}{\sum_{n=1}^N a_n^2(\tau_n)} \quad (2)$$

式中,a_n²(τ_n)表示延迟为τ_n的射线路径在接收点处场幅值的平方。

为了计算接收端的总信号功率,令发射功率为P_t,收发天线增益分别为G_r和G_t,利用射线跟踪算法可得接收功率为:

$$P_r = 10 \lg \left(P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{|\mathbf{E}_{total}|^2}{|\mathbf{E}_0|^2} \right) + 30 \quad (3)$$

式中:λ为波长;E₀为发射天线处的场强;E_{total}为接收点处总场强,包含到达接收点的所有射线的场强:

$$\mathbf{E}_{total} = \sum_{n=1}^N \mathbf{E}_n \quad (4)$$

式中:E_n为第n条射线路径末场在天线极化方向上的分量。实际中无线传播路径包括视距和非视距路径两种,视距路径在接收点处的场强为:

$$\mathbf{E}_{los} = \mathbf{E}_0 \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \quad (5)$$

式中:k为波数;r₀为直射路径的长度;E₀为发射天线处的场强。

对于非视距路径,则从发射天线出发,先利用式(5)计算出天线在第1结点处的场强E^{inc},然后沿着射线路径进行推算,直至到达接收点,最终获得此条射线路径在接收点处的场强为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^{inc} \prod_{x=1}^X R_x \prod_{y=1}^Y D_y \prod_{z=1}^Z T_z \prod_{p=1}^{X+Y+Z} K_p \prod_{q=1}^{X+Y+Z} e^{-jkr_q} \quad (6)$$

式中:X为反射总次数;Y为绕射总次数;Z为透射总次数;R_x是第x次反射时的并矢反射系数;D_y是第y次绕射时的并矢绕射系数;T_z是第z次透射时的并矢透射系数;K_p为经过第p次反射、透射或绕射后的扩散因子;r_q为第q个结点到第q+1个结点的距离。

2 基于WI软件的教学案例

2.1 室内场景案例

Remcom公司的WI电磁仿真软件,可对复杂的城市、室内、郊区及混合路径环境内的电磁传播和通信信道特性进行高效准确的仿真预测^[14-15]。在通信原理教学实践过程中,为了让学生直观感受室内常见的WiFi信号的传播过程,本文采用WI软件尝试了所在电波传播实验室场景下的无线信道建模过程。实验室约为5.4 m × 8.9 m × 2.9 m,内部设施包括办公桌、实验桌和空调等(见图1)。为便于比较收发机不同位置的影响,选取了3个典型位置的发射机,均采用全向天线,天线高度均为0.3 m;接收机则处于一条不规则轨迹的任意位置,同样采用全向天线,天线高度为0.8 m,Rx1和Rx2分别对应该轨迹上的两个特定位置。主要仿真参数如下:地面介电常数ε=15,电导率σ=0.015,墙面介电常数ε=2.8,电导率σ=0.001,桌子的介电常数ε=1,中心频率为2.4 GHz,带宽为20 MHz。另外,考虑到仿真精度和仿真耗时,课堂教学中反射次数为6,透射次数为4,绕射次数为1。

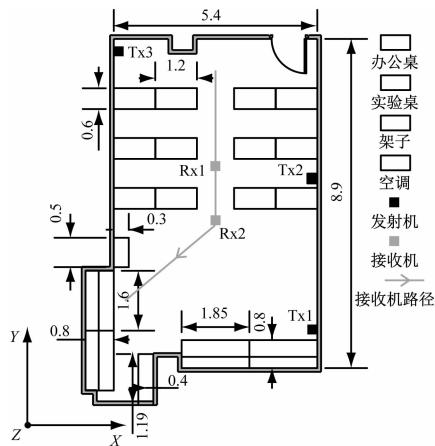


图1 实验室场景及尺寸(m)

(1) 仿真比较了发射机位于 Tx1, 接收机分别位于 Rx1 和 Rx2 时无线信号的传播路径状况(见图 2)。为便于观察,仅给出了占主要功率的 3 条路径。由图 2(a)可见,① 接收端信号包含了直射信号,地板、墙面和屋顶等反射信号;② Tx1 到 Rx2 之间存在很强的直射路径(见图 2(b)),而 Tx1 到 Rx1 之间由于办公桌遮挡,不存在视距路径;③ 直射路径的功率最高,呈现红色,其他反射次数越多的路径,信号功率越小,颜色越浅。

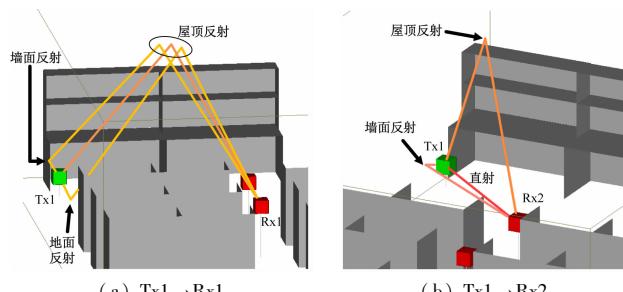


图2 室内不同路径信号的射线跟踪结果

(2) 为了进一步观测经过不同传播路径到达接收端的信号功率及时延状况,仿真给出了发射机位于 Tx1, 接收机位于 Rx1 和 Rx2 的功率延迟分布(见图 3)。由图 3 可见,由于 Tx1 和 Rx2 之间存在视距路径, Rx2 接收到的信号的功率明显高于 Rx1,且延迟更小。

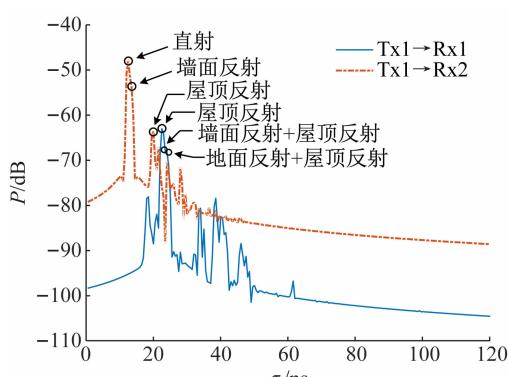


图3 不同接收位置的功率延迟分布

2.2 室外场景案例

为了课堂演示室外基站和手机之间信号的传播状况,以加拿大渥太华街区场景为例^[16],场景规模为 $1000 \text{ m} \times 600 \text{ m}$,主要障碍物为建筑物(见图 4)。传播模型的仿真参数如下:墙面介电常数 $\epsilon = 6$,电导率 $\sigma = 0.05$,地面介电常数 $\epsilon = 15$,电导率 $\sigma = 0.05$,信号频率 910 MHz,发收天线高度分别取 8.5 m、3.65 m,建筑物高度为 9~51 m;数值仿真中反射次数取 2~5 次,绕射次数取 2~3 次。

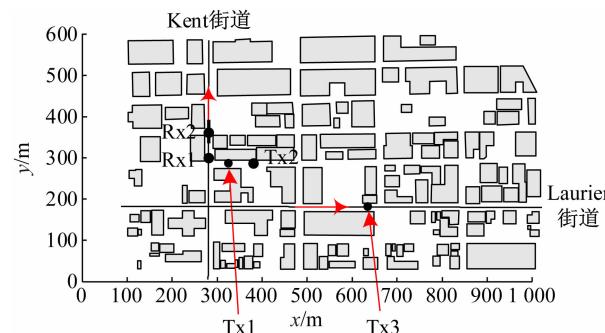


图4 渥太华城市街景尺寸图

(1) 仿真比较了发射机位于 Tx1, 接收机分别位于 Rx1 和 Rx2 时无线信号的传播路径状况(见图 5)。为便于观察,仅给出了占主要功率的 10 条路径。由该图可见,① 接收端信号包含了直射信号和建筑物反射的信号;② Tx1 到 Rx1 之间存在很强的直射路径(见图 5(a)),而 Tx1 到 Rx2 之间由于建筑物遮挡,不存在视距路径(见图 5(b));③ 直射路径的功率最高,呈现红色,反射次数较多的路径,信号功率较小,呈现绿色。

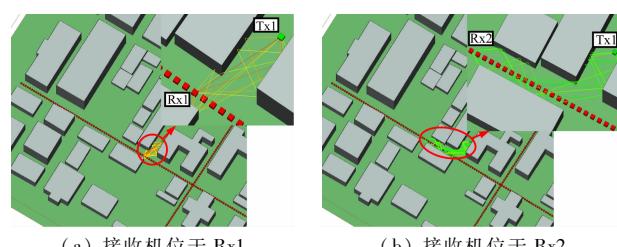
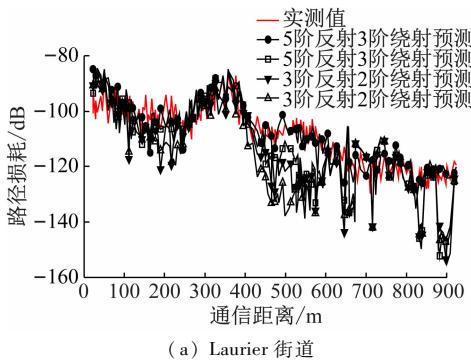


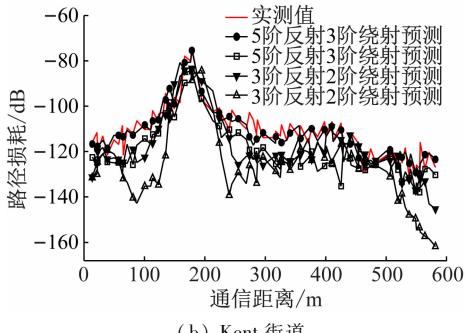
图5 室外不同路径信号的射线跟踪结果

(2) 为了验证和比较不同反射次数对计算精度的影响,比较了反射次数取 2~5 次的预测结果和实测结果(见图 6)。由图 6 可知,随着反射次数的增加,预测精度有所提高;但在建筑物较密集区域(接收点受到障碍物阻挡较多),还需通过增加绕射次数,才能达到理想预测精度。可见,增加绕射次数对于预测精度的提高程度大于反射次数增加带来的预测精度的提高。

发射机位置不同,信号的覆盖情况差别也比较明显,因此为了使发射机周围一定范围内的信号强度尽可能大,需要选择发射机的最佳位置。分别以图 4 中的 Tx1 和 Tx2 为圆心,半径 100 m 的圆为界(见图 7),当发射机位于 Tx1 时,圆内的街道为橘黄色和黄色,当



(a) Laurier 街道



(b) Kent 街道

图 6 预测结果和实测结果比较

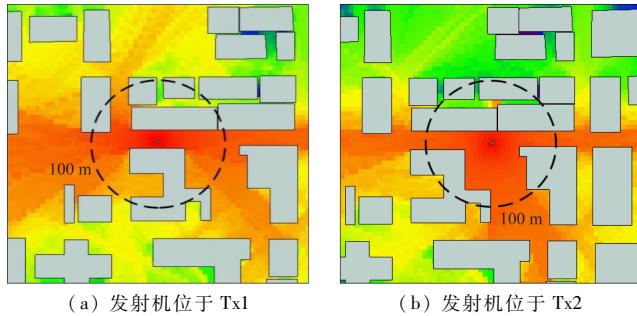


图 7 不同位置发射机信号覆盖情况

发射机位于 Tx2 时,圆内的街道基本为橘黄色,说明在 Tx2 信号能更好地覆盖。

3 结语

由于无线通信系统受到周围环境的影响,无线电波信号经历的传播过程具有极高的复杂性、随机性和抽象性,单纯对其进行数学分析非常枯燥,也是通信原理和移动通信课堂教学的一大难点。本文基于射线跟踪的无线信道建模原理,并利用 WI 软件仿真了无线信号的传播过程,将传播环境和传播路径以三维场景的形式直观地展示给学生,并利用功率延迟分布、路径损耗和信号强度覆盖,辅助学生对无线信道理解。实践表明,该方法能够使学生全面深入掌握无线信号在直射、反射、透射和绕射过程中发生的幅度和相位变

化,从而理解最终接收端信号功率预测方法及其统计特性。

参考文献 (References) :

- [1] 朱秋明,陈小敏,徐大专.“通信原理”综合实验教学研究[J].高校实验室工作研究,2011(4):16-17.
- [2] 包永强,“通信原理”课程实践教学探讨[J].电子电气教学学报,2013,35(4):114-116.
- [3] 李莉,赵蓉,项东.通信原理综合实验教学改革的实践[J].实验室研究与探索,2015,34(8):179-181.
- [4] 常怡萍,刘琴,李春雷.4G时代移动通信技术课程教学改革与实践[J].中国现代教育装备,2015(1):85-87.
- [5] Wang C X, Haider F, Gao X, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2):122-130.
- [6] 朱秋明,陈小敏,刘星麟,等.无线衰落信道模拟系统传输实验教学研究[J].实验室研究与探索,2014,33(12):108-112.
- [7] 朱秋明,陈小敏,江凯丽,等.Matlab 在 MIMO 无线信道教学中的应用[J].实验室研究与探索,2016,35(11):89-93.
- [8] Ko J, Cho Y J, Hur S, et al. Millimeter-wave channel measurements and analysis for statistical spatial channel model in in-building and urban environments at 28 GHz[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(9):5853-5868.
- [9] Jiang K, Chen X, Zhu Q, et al. A novel simulation model for nonstationary rice fading channels[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2018(8):1-9.
- [10] Wang J, Gentile C, Papazian P, et al. Quasi-deterministic model for doppler spread in millimeter-wave communication systems [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2017 (16):2195-2198.
- [11] 唐亚平,徐大专,朱秋明,等.基于三维反向射线跟踪的电波传播预测[J].计算机工程,2014,40(3):143-146.
- [12] Athanasiadou G E, Nix A R. A novel 3-D indoor ray-tracing propagation model: The path generator and evaluation of narrow-band and wide-band predictions [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49(4):1152-1168.
- [13] Zhou A, Huang J, Sun J, et al. 60 GHz channel measurements and ray tracing modeling in an indoor environment [C]// International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. [s. l.]: IEEE, 2017: 1-6.
- [14] Wireless Insite 2.6.3 Reference Manual, Remcom, PA, USA, 2012.
- [15] Johar U, Hussain R, Muqaibel A, et al. An indoors AoA study for mobile phones utilizing frequency reconfigurable MIMO antennas [C]// Applied Electrical Engineering and Computing Technologies. [s. l.]: IEEE, 2015: 1-5.
- [16] Whitteker J H. Measurements of pathloss at 910 MHz for proposed microcell urban mobile systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1988, 37(3):125-129.