

天线极化方式对室内 ZigBee 信道传输特性的影响分析

徐光辉¹ 苏国杰² 王华力¹ 王庆国² 刘 洋³

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)¹ (解放军理工大学通信工程学院研究生 1 队 南京 210007)²
(空军 93514 部队 83 分队 唐山 064200)³

摘 要 为分析不同天线极化方式对室内 ZigBee 信道传输特性的影响,基于射线追踪法,构建了特定公寓住房的确定性模型,然后借助 Wireless Insite 软件平台对天线水平极化、垂直极化、左旋极化和右旋极化 4 种极化方式进行了仿真分析。最后,通过对比分析路径损耗、接收功率和时延扩展等信道参数得出了一些很有价值的结论,如:垂直极化时接收功率最理想,但时延扩展较大;左旋极化和右旋极化对信道特性影响基本一致,虽然路径损耗较小,但接收功率不理想;室内的木质门和隔断墙对 ZigBee 信道的传播影响不大,金属门会使透射电波损耗严重等。

关键词 射线跟踪法, ZigBee, 无线信道, Wireless Insite

中图分类号 TN92 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.4.018

Analyzing Effects of Antenna Polarization on Indoor ZigBee Channel Transmission Characteristics

XU Guang-hui¹ SU Guo-jie² WANG Hua-li¹ WANG Qing-guo² LIU Yang³

(College of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)¹

(Postgraduate Team 1, College of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)²

(83 Detachments, Air Force 93154 Unit, Tangshan 064200, China)³

Abstract To analyze the effects of different antenna polarization on indoor ZigBee channel transmission characteristics, the paper constructed a deterministic model of a specific apartment based on ray tracing method. Then it utilized Wireless Insite to present a simulation analysis on the four kinds of antenna polarization (horizontal polarization, vertical polarization, left-hand polarization and right-hand polarization). At last, through comparatively analyzing the path loss, the received power and the delay spread channel parameters, we got some conclusions of great value, such as vertical polarization leads to the best received power, but has serious delay spread; left-hand polarization and right-hand polarization have lower path loss than linear polarization, but the received power is not ideal; the wooden doors and partition walls have little effect on the spread of ZigBee channel while the metal door will leads to a serious loss of transmission waves, and so on.

Keywords Ray tracing method, ZigBee, Wireless channel, Wireless Insite

1 引言

近年来,随着移动通信的应用逐渐由室外向室内环境扩展和延伸,无线局域网(WLAN)技术和无线个域网(WPAN)技术得到了迅猛发展^[1]。ZigBee 技术作为无线个域网技术的代表,正在成为“物联网”中的关键技术之一,并大量应用于室内短距离无线通信系统中,如室内无线传感器网络设计、室内传感器定位系统的研究等^[2]。

然而当前关于 ZigBee 技术信道传输特性的研究却不是很多,这严重制约了基于 ZigBee 的无线通信技术在室内环境的应用和发展。文献[3]基于射线跟踪法,选取室内环境有人遮挡和无人遮挡两种情形,利用 Wireless Insite 软件对室内 ZigBee 传播信道进行仿真,对比分析了两种情形下 ZigBee 信

道的不同传输特性。文献[4]针对室内 ZigBee 无线信道,对北京邮电大学第二教学楼 118 教研室进行了确定性建模,并根据仿真结果提出了 ZigBee 技术在室内布局的合理建议,但仿真模型相对简单。而文献[5]则结合智能家居等热点问题,研究了 ZigBee 技术在室内的传播接收情况及其在家庭网中的应用,并对典型室内环境的无线传输信道进行了数值仿真和实验。文献[6-8]详述了当前 ZigBee 技术在无线传感器网络方面的实际应用。

上述成果为进一步研究和应用 ZigBee 技术提供了很好的理论参考依据,然而通过查阅相关文献发现,截止目前还没有针对天线极化方式对室内 ZigBee 信道传输特性产生影响的相关研究。考虑到天线是进行电磁波发射和接收的必要设备,而天线极化方式是需要考虑的一项重要参数,本文选取天

到稿日期:2015-03-13 返修日期:2015-07-06 本文受国家自然科学基金资助项目(61271354)资助。

徐光辉 副教授,主要研究方向为 SOC 技术与嵌入式系统设计, E-mail: 13814060352@139.com; 苏国杰 硕士生,主要研究方向为信息感知、处理与对抗, E-mail: suguojie11@163.com(通信作者); 王华力(1967-),男,教授,主要研究方向为信息感知、处理与对抗, E-mail: wanghl2008@gmail.com; 王庆国(1989-),男,硕士生,主要研究方向为信息感知、处理与对抗, E-mail: 944498353@qq.com; 刘 洋(1989-),男,主要研究方向为卫星通信, E-mail: 125362303@qq.com。

线极化方式这一影响参数,基于射线跟踪法,首先建立了某公寓住房的三维确定性模型;然后,利用 Wireless Insite 软件平台进行仿真,得到不同天线极化方式下室内 ZigBee 信道的路径损耗、接收功率、时延扩展、到达方向等信道参数;最后,通过对比分析这些信道参数,得出一些为室内 ZigBee 技术在工程应用中提供可靠的理论依据的重要结论。

2 理论分析

2.1 ZigBee 技术

众所周知,蜜蜂(Bee)是靠飞翔和“嗡嗡”(Zig)地抖动翅膀的“舞蹈”来向同伴传递花粉所在的方位信息,这种传递信息的方式构成了蜜蜂群体中的通信网络^[9],被人们称为蜜蜂八字舞,ZigBee 这一名称就来源于此。

ZigBee 技术基于 IEEE 802.15.4 无线个域网协议,是一种新型的具有统一技术标准的无线通信技术,相对现有的各种短距离无线通信技术,它具有网络容量大、安全性高、成本低、功耗及传输速率低等特点^[10]。相比蓝牙、高速率 PAN (个人局域网)或者 IEEE802.11X 无线局域网,ZigBee 技术更加简单实用,与其他几种短距离无线通信技术的具体比较如表 1 所列。

表 1 几种短距离无线通信技术的比较

项目	Bluetooth	Wi-Fi	ZigBee
传输频率	2.4GHz	2.4GHz	2.4G/868M/915MHz
传输速率	1~10Mbps	<11Mbps	20~250kbps
传输距离	<10m	100m	10~75m
网络节点	8	32	255~65535
功耗	较低	高	最低

2.2 射线跟踪法

射线跟踪技术^[11]中电磁波被简化为射线,进而可使用光的传播理论诸如反射定律、折射定律、光程定律等来研究电磁波传播特性,因能有效地解决复杂室内环境中的无线规划预测精度等问题,所以它常用于分析室内环境电波传输特性。

目前射线跟踪法大致可以分为:镜像法、最小光程法、测试射线法、SBR/Image 算法法和确定性射线管法等。其中,SBR/Image 是一种修正的入射及反弹射线技术的确定性方法,可以用于任何复杂的传播环境中,它能够找到从发射机到接收机的所有电波传播路径,具有很高的计算效率和仿真精度,非常适用于预测复杂室内的无线信道特性,是一种具有很高实用价值的电波传播预测方法。

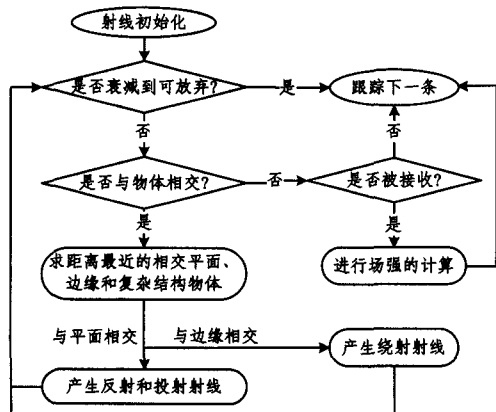


图 1 SBR/Image 算法流程

本文基于 Wireless Insite 软件平台,针对室内模型的仿真算法即射线跟踪方法中的 SBR/Image 算法进行仿真分析。该算法的基本思想为^[12]:将发射天线视为点源,跟踪从发射

天线发出的每一条射线,射线在遇到障碍物时,根据入射的几何位置和障碍物的电参数特性,按照反射、投射、绕射或者它们的组合来确定下一步的路径,然后继续对其跟踪直到它被接收或者达到退出跟踪的条件,完成电波传输的跟踪预测。算法流程如图 1 所示。

2.3 Wireless Insite 简介

Wireless Insite 是 REMCOM 软件包中一款对复杂电磁环境进行建模仿真预测分析的软件,它基于 UTD/GTD 理论,采用射线跟踪法建立传播模型,可以在 40MHz~50GHz 频段内提供精确的计算结果^[13],适用于本文研究的 ZigBee 信道。

在应用 Wireless Insite 仿真计算前,需要了解一些软件相关的基本公式^[14]。其中,接收功率的计算公式为:

$$P_R = \sum_{i=1}^{N_P} P_i \quad (1)$$

其中, P_R 为平均时间接收功率, N_P 为路径的数量, P_i 为第 i 条路径的平均时间接收功率,而其中 P_i 的计算如式(2)所示:

$$P_i = \frac{\lambda^2 \beta}{8\pi \eta_0} |E_{\theta,i} g_{\theta}(\theta_i, \phi_i) + E_{\phi,i} g_{\phi}(\theta_i, \phi_i)|^2 \quad (2)$$

其中, λ 为电磁波波长, β 为传输波形的重叠频谱, η_0 为自由空间阻抗(377Ω), $E_{\theta,i}$, $E_{\phi,i}$ 分别为关于 θ, ϕ 的第 i 条接收路径的电场强度, θ_i, ϕ_i 是第 i 条射线的到达方向角。而 $g_{\theta}(\theta, \phi) = |G_{\theta}(\theta, \phi)|^{1/2} e^{j\psi_{\theta}}$,其中 G_{θ} 是相位为 θ 接收机的天线增益, ψ_{θ} 和 g_{ϕ} 则分别是 θ 和 ϕ 在远场区的相对相位。 β 定义为:

$$\beta = \frac{\int_{f_T - B_T/2}^{f_T + B_T/2} S_T(f) S_R(f) df}{\int_{f_T - B_T/2}^{f_T + B_T/2} S_R(f) df} \quad (3)$$

其中, f_T 是传播波形的中心频率, B_T 是它的带宽, $S_T(f)$ 是它的频谱, $S_R(f)$ 是接收到的波形。此外,软件中路径损耗的计算公式为:

$$L_{Path}(\text{dB}) = P_T(\text{dBm}) - P_R(\text{dBm}) + G_{T,Max}(\text{dBi}) + G_{R,Max}(\text{dBi}) - L_S(\text{dB}) \quad (4)$$

其中, $G_{T,Max}$ 和 $G_{R,Max}$ 分别是发射天线和接收天线的最大增益, L_S 是包括带宽重叠因子在内的系统所有损耗的总和。

时延扩展是衡量多径传播信道质量的一个重要指标。

Wireless Insite 中计算时延扩展的公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_P} P_i t_i^2}{P_R} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_P} P_i t_i}{P_R}\right)^2} \quad (5)$$

3 模型建立及参数设置

3.1 仿真模型的建立

针对特定公寓住房环境建立简单三维确定性模型,公寓高 3m,面积为 10.6m×6.2m,其包含一扇金属门、两个玻璃窗、三扇木质门和少量隔断墙,这些构成了一个复杂室内环境。建模过程中,需指定所选用材料的电特性参数,查阅相关文献资料^[15,16],选定文中所用材料的电特性参数如表 2 所列。

表 2 电特性参数

材料	厚度(m)	导电率	介电常数	颜色
外墙	0.2	0.015	7	灰色
内墙	0.1	0.015	7	灰色
玻璃窗	0.005	0	2.4	蓝色
木质门	0.03	0	5	橙色
金属门	0.03	2×10 ⁸	1	紫色

为获得理想传输效果,发射机(Tx)放置在公寓中心位置,高度设为2.8m。由于本文目的是要分析整个公寓 ZigBee 信道电波传输特性,因此将接收机(Rx)以矩阵的形式均匀布满整个公寓区域,共 756 个接收机,高度均设为 1m,接收机噪声系数为 3dB。最终得到的三维模型和收发机位置如图 2 所示。

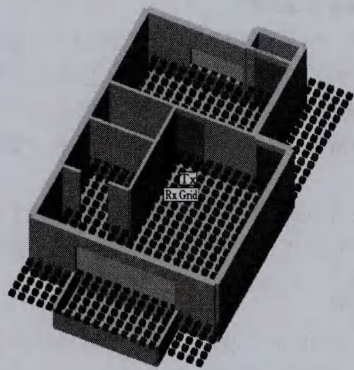


图 2 仿真模型

3.2 设置仿真参数

IEEE802.15.4 在物理层定义了 3 个频段^[17](868MHz、915MHz 和 2.4GHz),共划分为 27 个信道,编号 k 为 0—26。其中,2.4GHz 频段上划分了 16 个信道,915MHz 频段上划分了 10 个信道,而 868MHz 频段上只有 1 个信道。27 个信道的中心频率和对应的信道的编号定义如下:

$$F_c = 868.3\text{MHz}, k=0 \quad (6)$$

$$F_c = [906 + 2(k-1)]\text{MHz}, k=1, 2, \dots, 10 \quad (7)$$

$$F_c = [2405 + 5(k-11)]\text{MHz}, k=11, 12, \dots, 26 \quad (8)$$

考虑到新一代 ZigBee 技术的芯片传输速率都集中在 2.4 GHz 频段,下文的仿真分析中选取第 11 号信道作为仿真信道,中心频率为 2405MHz,中心带宽为 5MHz。此外,ZigBee 技术的发射功率应遵守国家的规定规范,通常为 0~+10dB,为了便于分析,仿真过程中设定发射机的发射功率为 0dB,接收机灵敏度为 -95dB。相关仿真参数设置如表 3 所列。

表 3 仿真参数

参数	数值
载波频率/带宽	2405MHz/5MHz
天线类型	全方向性天线
发射功率	0 dBm
仿真模式	Full 3D SBR
射线间隔	0.25
反射次数	6
折射次数	4
衍射次数	1

4 仿真分析

天线的极化方式决定天线发射或接收电磁波的极化方式,水平或垂直极化天线辐射水平或垂直极化波,统称为线极化;右旋或左旋极化天线辐射左旋或右旋圆极化波,统称为圆极化。为实现收发天线之间最大功率传输,应采用极化参数相同的发射方式和接收天线,否则会产生极化失配,接收信号变差^[18]。因此,选取接收机、发射机同极化的方式进行仿真,分别考虑水平极化、垂直极化、左旋极化和右旋极化 4 种天线极化方式对室内 ZigBee 信道路径损耗、接收功率和时延扩展的影响。

4.1 路径损耗

无线电波在传输过程中不可避免地会发生路径损耗,而损耗的程度直接决定着信号功率衰减情况和信道性能的优劣。将 Wireless Insite 软件的仿真结果导入 MATLAB 进行三维绘图,得到不同天线极化方式下室内 ZigBee 信道的路径损耗,如图 3—图 6 所示。

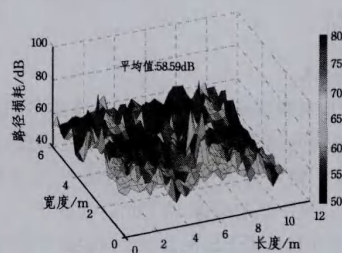


图 3 水平极化路径损耗

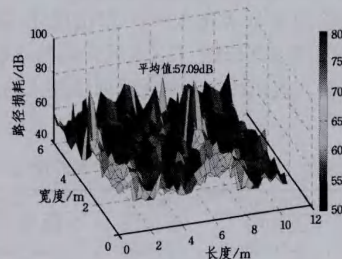


图 4 垂直极化路径损耗

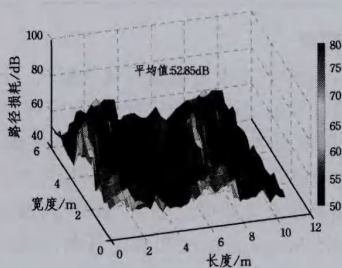


图 5 左旋极化路径损耗

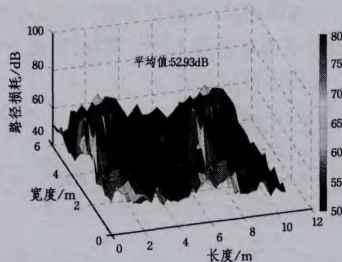


图 6 右旋极化路径损耗

结合仿真数据分析图 3—图 6,可以看出天线极化方式下室内 ZigBee 信道的路径损耗高于天线圆极化方式下的路径损耗,而线极化方式中,水平极化的平均路径损耗略高于垂直极化,左旋极化和右旋极化对信道路径损耗的影响基本一致。

此外,由三维图示还可以看出室内范围内,圆极化方式路径损耗较为平稳,而线极化方式路径损耗震荡比较明显;路径损耗最严重的位置集中在金属门附近的室外区域,这说明射线穿过金属门损耗严重。

4.2 接收功率

接收功率是评价通信系统的一个重要参数,表征接收信号强度的大小,决定着接收端是否能很好地接收信息。将仿真结果在 Wireless Insite 软件中显示出来,得到不同天线极化方式下接收功率的分布图,如图 7—图 10 所示。

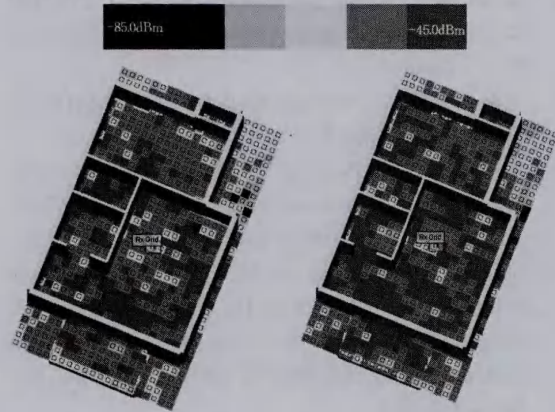


图 7 水平极化接收功率分布

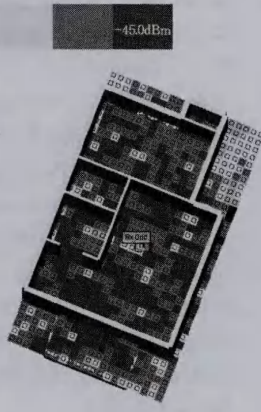


图 8 垂直极化接收功率分布

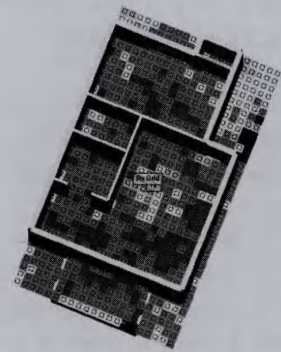


图 9 左旋极化接收功率分布

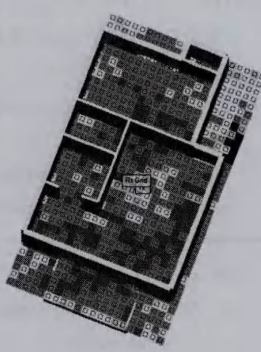


图 10 右旋极化接收功率分布

由图 7—图 10 可以看出,室内环境 ZigBee 信道下,天线极化方式能获得较高接收功率的接收机(深色)数目明显高于天线圆极化方式,而垂直极化是 4 种天线极化方式中接收功率较强接收机(深色)数目最多的,且室内覆盖效果最好;左旋和右旋极化方式下的接收功率分布图基本一致,且发射机正下方区域接收功率较差。

4.3 时延扩展

时延扩展定义为最大传输时延和最小传输时延的差值,即最后一个可分辨的时延信号与第一个时延信号到达时间的差值,实际上就是脉冲展宽的时间,是表征数字无线信道的重要参数。不同天线极化方式下的 ZigBee 信道时延扩展统计如表 4 所列。

表 4 时延扩展统计(单位:ns)

极化方式	时延扩展平均值	时延扩展范围
水平	6.54	1.18~13.92
垂直	8.93	3.30~14.79
左旋	7.28	1.16~15.29
右旋	7.25	1.19~15.24

由表 4 看出,垂直极化时的时延扩展平均值最大为 8.93ns,水平极化时的时延扩展平均值最小为 6.54ns。整个

公寓区域 ZigBee 无线传输信道的时延扩展在 1.16 ns ~ 15.29ns 之间。由此判断,接收机的第一径时延和最后一径时延的最大时间差为 15.29ns,所以室内 ZigBee 信道的传输经历平坦衰落,不会引起码间串扰。

再次将仿真数据导入 MATLAB 进行绘图,得到 4 种天线极化方式下室内 ZigBee 信道的均方根时延扩展概率累计分布图,如图 11 所示。

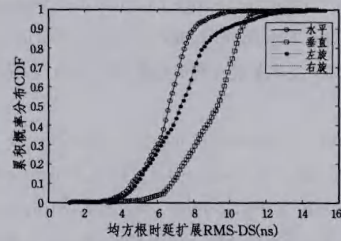


图 11 均方根时延扩展的累计概率分布

结束语 本文基于射线跟踪法,针对 4 种不同天线极化方式,利用 Wireless Insite 软件平台对室内 ZigBee 信道传输特性进行了仿真分析,得出以下结论:1)垂直极化方式的接收功率最为理想,但时延扩展较大,路径损耗仅低于水平极化;2)左旋极化和右旋极化对信道的影响基本一致,总体路径损耗较小,但发射机下方区域的路径损耗较大,接收功率较低;3)室内的木质门和隔断墙对 ZigBee 信道的传播影响不大,金属门会使透射电波损耗严重;4)室内 ZigBee 信道最大时延扩展一般在几十纳秒之内,不会引起码间串扰。这些结论为室内 ZigBee 技术的进一步研究和应用提供了可靠的理论依据。

参考文献

- [1] Gao Ming, Ji Xiang, Liu Yu, et al. Application of ZigBee Technology in Indoor Location [J]. Xi'an University of Technology, 2010, 30(1): 9-12 (in Chinese)
高明, 吉祥, 刘宇, 等. ZigBee 技术在室内定位中的应用[J]. 西安工业大学学报, 2010, 30(1): 9-12
- [2] Huang Ren, Yan Zheng-shuang. Research on impact of clear channel assessment on coexistence of Zigbee and Wi-Fi [J]. Application Research of Computers, 2013, 30(9): 2843-2845
- [3] Chen Jian-gang, Lv Ying-hua. Simulation and Research of ZigBee Channel in Indoor Location [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(2): 55-59 (in Chinese)
陈建刚, 吕英华. 室内环境下对紫蜂信道的仿真和研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(2): 55-59
- [4] Wei Wei, Lv Ying-hua, Ma Run. Research on ZigBee Channel in Indoor Location Based on Ray Tracing Method [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(3): 67-69 (in Chinese)
魏巍, 吕英华, 马润. 基于射线跟踪法对室内 ZigBee 传播信道的研究[J]. 电波科学学报, 2010, 25(3): 67-69
- [5] Run Ma. Study on Application of ZigBee in Indoor Communication [C] // Proceeding of International Conference of China Communication and Information Technology. Nanning, China, 2010: 333-337
- [6] Zheng Ji-jie, Xiang Xin-jian. Data analysis and research on ZIG-BEE wireless sensor network system based on complex event processing technology [C] // Computer Science and Information Technology. Chengdu: IEEE, 2010: 311-314
- [7] Dang Guo-qing, Cheng Xiao-yan. Application of wireless sensor

- network in monitoring system based on ZigBee[C]//Advanced Research and Technology in Industry Applications. Ottawa, ON; IEEE, 2014; 181-183
- [8] Bao Jun, Wu Jian-de, Wang Xiao-dong, et al. Design of pipeline displacement detecting system based on ZigBee wireless sensor networks[C]//Control and Decision Conference. Changsha; IEEE, 2014; 5057-5060
- [9] Jin Chun. ZigBee technology base and case analysis [M]. Beijing; National Defence of Industry Press, 2008(in Chinese)
金纯. ZigBee 技术基础及案例分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008
- [10] Yue Tao, Li Xiang-yang, Cheng Bo. Performance of Coexisted WiFi and ZigBee Networks[C]//Distributed Computing Systems Workshops. Philadelphia, PA; IEEE, 2013; 315-320
- [11] Liu Yuan-jian, Zhang Min-sheng, Cao Jing, et al. Simulation and Analysis of 900 MHz Radiowave Propagation Characteristics in the Indoor Complex Environment[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013, 33(2); 37-41(in Chinese)
刘尧健, 张敏胜, 曹京, 等. 室内复杂环境 900MHz 电波传播特性的仿真与分析[J]. 南京邮电大学学报, 2013, 33(2); 37-41
- [12] Yin Fu-rong, Wang Peng-fei, Liu Yuan-jian. Study on the Radio Wave Propagation in Indoor Environments with Metallic Furniture [J]. Journal of China Institute of Electronics, 2014, 9(2); 209-216(in Chinese)
殷福荣, 王鹏飞, 刘尧健. 室内带金属家具环境的电波传播特性研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(2); 209-216
- [13] Petar M, Mladen V, Zeljko B. Wireless InSite Software Verification via Analysis and Comparison of Simulation and Measurement Results [J]. International Convention, 2012, 21(25); 776-781
- [14] Cao Jing. Study on the Propagation Characteristics of UWB Signal in Indoor Complex Environment Based on TD-UTD[D]. Nanjing; Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013(in Chinese)
曹京. 基于 TD-UTD 的室内复杂环境 UWB 信号传播特性研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013
- [15] Yin Fu-rong, Wang Peng-fei, LIU Yuan-jian. Study on the Radio Wave Propagation in Indoor Environments with Metallic Furniture [J]. Journal of CAEIT, 2014, 9(2); 209-216
- [16] Shen Zhen. Research on the MIMO Channel Characteristic Based on Ray-Tracing Method [D]. Nanjing: PLA University Science and Technology, 2008(in Chinese)
申振. 基于射线追踪法的 MIMO 信道特性研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2008
- [17] Ma Run. Simulation of the Radio Propagation in Laboratory House with Applications In Home-Network [D]. Beijing; Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010(in Chinese)
马润. 室内无线信道的传播模型及其在家庭网中的应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010
- [18] Linden D S. A wideband omnidirectional loaded genetic antenna for receiving vertical, horizontal, right-hand and left-hand circular polarizations[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. Honolulu, HI; IEEE, 2007; 777-780

(上接第 85 页)

- [2] Liu Wai-xi, Yu Shun-zheng, Hu Xiao, et al. Selective Caching in Content-Centric Networking[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 37(2); 275-288(in Chinese)
刘外喜, 余顺争, 胡晓, 等. CCN 中选择性缓存机制的研究[J]. 计算机学报, 2013, 37(2); 275-288
- [3] Xylomenos G, Ververidis C, Siris V, et al. A survey of information-centric networking research[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(2); 1024-1049
- [4] Psaras I, Chai W K, Pavlou G. Probabilistic in-network caching for information-centric networks[C]//Proc. of the 2nd ICN Workshop on Information-Centric Networking. 2012; 55-60
- [5] Fayazbakhsh S K, et al. Less pain, most of the gain; Incrementally deployable ICN[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(4); 147-158
- [6] Tang X, Chanson S T. Coordinated en-route Web caching[J]. IEEE Trans. on Computers, 2002, 51(6); 595-607
- [7] Wang S, Bi J, Wu J P. Collaborative caching based on hash-routing for information-centric networking[C]//Proc. of the ACM SIGCOMM. 2013; 535-536
- [8] Wang J M, Zhang J, Bensaou B. Intra-AS cooperative caching for content-centric networks [C] // Proc. of the 3rd ACM SIGCOMM Workshop on Information-Centric Networking (ICN 2013). 2013; 61-66
- [9] Li Z, Simon G. Time-Shifted TV in content centric networks: The case for cooperative in-network caching[C]//Proc. of the 2011 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC). 2011; 1-6
- [10] Ming Z, Xu M, Wang D. Age-Based cooperative caching in information-centric network [C] // Proc. of the IEEE INFOCOM Workshop on NOMEN. 2012; 268-273
- [11] Cho K, Lee M, Park K, et al. WAVE: Popularity-Based and collaborative in-network caching for content-oriented networks[C]//Proc. of the IEEE INFOCOM Workshop on NOMEN. 2012
- [12] Zhu Yi, Mi Zheng-kun, Wang Wen-nai. A cache probability replacement policy based on content popularity in content centric networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(6); 1305-1310
- [13] Liu Wai-xi, Yu Shun-zheng, Cai Jun, et al. Scheme for Cooperative Caching in ICN[J]. Journal of Software, 2013, 24(8); 1947-1962(in Chinese)
刘外喜, 余顺争, 蔡君, 等. ICN 中的一种协作缓存机制[J]. 软件学报, 2013, 24(8); 1947-1962
- [14] Zhang Li-xia, Estrin D, Burke J. Named data networking(NDN) project; PARC NDN-0001[R]. 2010
- [15] Afanasyev A, Moiseenko I, Zhang L X. ndnSIM; NDN simulator for NS-3; NDN-0005[R]. NDN, 2012