

6.0-6.4GHz 室内 MIMO 无线信道测量与传播特性分析

张继良^{1,2}, 汪 洋¹, 丁丽琴¹, 闫大勇¹, 李 西¹, 张乃通^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东深圳 518055;

2. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 工作在 6GHz 以上高频段的多输入多输出 (Multi-Input-Multi-Output, MIMO) 无线通信系统是下一代无线移动通信的有力竞争方案. 目前, 对制约无线系统性能的高频段空时无线信道特性研究仍较少见. 针对这一现状, 采用基于网络分析仪的信道测量平台对典型办公环境下 6.0-6.4GHz MIMO 无线信道特性进行测量和分析. 为了明确高频段为系统设计带来的新问题, 将测量得到的高频段 MIMO 信道特性参数与低频段对比. 对比结果表明, 6.2GHz 频段与 2.45GHz 频段 MIMO 信道传播特性存在较大差异. 在对 6.0-6.4GHz 室内覆盖 MIMO 无线通信系统进行设计和评估时, 需要基于 6.0-6.4GHz 频段无线信道传播的新特性对系统的关键技术和方案进行调整.

关键词: 6.0-6.4GHz; 多输入多数出系统 (MIMO); 信道特性; 信道测量

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 06-1213-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.024

Indoor Measurement and Characterization of Wireless MIMO Channel at 6.0-6.4GHz

ZHANG Ji-liang^{1,2}, WANG Yang¹, DING Li-qin¹, YAN Da-yong¹, LI Xi¹, ZHANG Nai-tong^{1,2}

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Inst. of Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Multi-input-multi-output (MIMO) scheme at 6GHz is one of the enabling technologies for the next generation mobile communication. However, indoor channel measurement and characterization is rarely conducted at this band. An extensive MIMO channel measurement is performed at 6.0GHz-6.4GHz under typical office environment with channel sounder based on vector network analyzer. Results on path loss, delay spread and spatial correlation, which show great difference compared with those at 2.45GHz in similar environment, are presented. Therefore, our measurement results provide guidance for the design and development of the system working on 6.0-6.4GHz band.

Key words: 6.0-6.4GHz; MIMO; channel characteristic; channel measurement

1 引言

随着 3G 移动通信进入商用阶段, 能够实现高速数据传输的下一代无线移动通信系统成为了国内外研究者共同的研究重点. 高速数据传输需要更多的频谱资源^[1]. 然而, 目前 6GHz 以下频段已经或者即将部署, 频段拥挤. 为了满足低干扰和高带宽的需求, 需要把移动通信业务拓展至 6GHz 以上频段. 分配给卫星上行通信业务的 6.0-6.4GHz 频段用于移动通信时有如下优势: 卫星地面站装备有高增益定向天线, 不会干扰移动通信; 与地面站相比, 移动通信信号强度很低, 不干扰卫星接收; 带宽大, 易于实现高速传输等.

具有高频谱利用率高和可靠性的多输入多输出 (Multi-Input-Multi-Output, MIMO) 技术是下一代无线移动

通信的关键技术. 现有移动通信频带下 MIMO 技术的应用受到天线体积的限制, 难以在同一设备上配置多根天线. 在 6GHz 以上高频段, 由于波长变短, 天线体积小, 易于实现 MIMO. 因此, 与高频段结合是 MIMO 走向应用的有效途径. 综上所述, 6.0-6.4GHz 高频段 MIMO 通信系统是下一代无线移动通信的有力竞争方案.

无线信道的衰落特性从根本上制约无线 MIMO 通信系统性能. 因为无线信道衰落特性因频段不同有所区别, 针对相应频段的信道衰落特性研究是系统设计中需要考虑的基础问题. 无线数据通信业务大部分发生在室内, 因此对室内环境的 6.0-6.4GHz 高频 MIMO 无线信道衰落特性分析对于新一代移动通信系统的设计和性能评估具有重要意义.

信道测量是研究信道衰落特性的有效手段. 然而,

当前针对室内无线信道的测量和衰落特性研究主要集中在 6GHz 以下的低频段. 通过信道测量, S. E. Alexander 分析了室内 900MHz 频段窄带信道传输损耗特性^[2]. S. J. Howard 等人给出了室内 0.9-1.1GHz 频段的传输损耗特性和时延扩展特性^[3]. R. J. C. Bultitude^[4] 和 H. Zaghoul^[5] 等人各自给出 910MHz 和 1.75GHz 室内信道的时延扩展特性. H. Hashem 等给出了室内 900MHz-1300MHz 信道的 RMS 时延扩展特性, 并对其进行 CDF 统计^[6]. M. LeFevre^[7]、K. Yu^[8]、R. Stridh^[9]、H. T. Nguyen^[10] 等各自给出室内 915MHz、5.2GHz、5.8GHz、2.14GHz 室内 MIMO 信道的空间相关特性. 2008 年, J. M. Molina-García-Pardo 在 2.45GHz 频段开展了目前为止最为全面的室内环境 MIMO 无线信道测量工作^[11], 并基于测量数据提取了包括传输损耗特性, 时延扩展特性, 空间相关特性和信道容量在内的信道特性参数. 然而, 尚没有研究人员对室内 6.0-6.4GHz 频段 MIMO 无线信道特性测量与分析. 现有室内无线通信标准同样没有涵盖该频段. IEEE802.11^[12] 信道模型仅涵盖 2.45GHz 和 5.8GHz 频带. WINNER^[13,14] 信道模型标准仅支持 2-6GHz 频带. 因此, 室内 6.0-6.4GHz MIMO 无线信道全面测量与特性分析目前尚属空白.

针对 6.0-6.4GHz 高频段, 笔者采用基于网络分析

仪搭建的 MIMO 无线信道测量平台对室内 MIMO 信道进行了测量. 首先介绍了测量平台和测量活动, 随后基于测量结果分析了信道的传输损耗、时延扩展、空间相关等信道特性, 进而对比分析 6.0-6.4GHz 高频段与传统低频段的差异, 最后阐明高频段室内 MIMO 信道特性为系统设计带来的新问题.

2 测量平台与测量场景

室内环境 6.0-6.4GHz MIMO 信道的传输特性参数通过信道测量得到. 本章详细介绍测量过程中使用的 MIMO 无线信道测量平台, 并对测量开展的场景和测量过程进行描述.

2.1 测量平台

本文基于矢量网络分析仪搭建了 6.0-6.4GHz 宽带 MIMO 信道测量平台, 平台结构和各部分器件照片如图 1. 矢量网络分析仪采用扫频的方式测量端口间的幅度响应和相位响应. 扫频信号经功率放大器放大后通过发射天线发射, 信号经由无线信道被接收天线所接收, 被低噪放放大之后送入矢量网络分析仪, 从而获得信道的频率响应. 收发天线阵列为均匀线阵, 阵元间距 0.5λ . 计算机控制 SP4T 射频开关, 实现收发天线自动切换. 此外, 计算机还负责协调测量过程并存储测量数据. 数据处理采用离线方式完成.

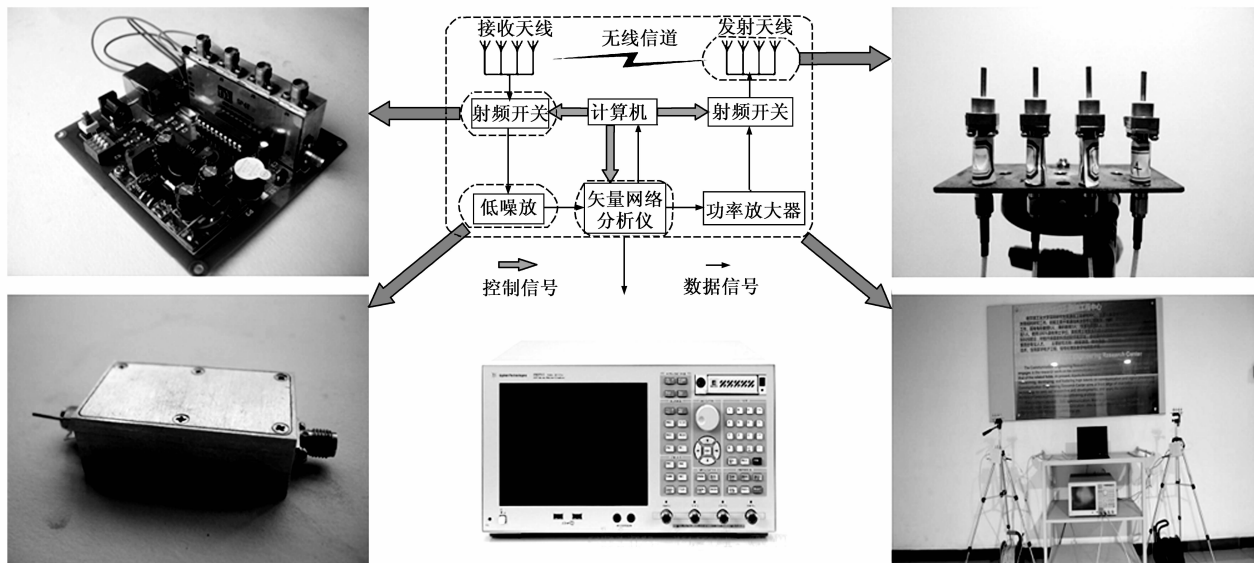


图1 信道测量平台

2.2 测量场景

图 2(a) 给出测量区域平面图和相应环境的照片. Tx1 和 Tx2 为发射天线的位置. M1 和 M2 为接收天线测量点分布范围. 在室内覆盖场景中, 接入点 (AP) 往往被放置于走廊环境^[13]. 因此典型的室内传输链路涵盖三个场景: 走廊-走廊视距 (Line-of-Sight, LOS) 场景 (场景 A); 走廊-走廊非视距 (None-Line-of-Sight, NLOS) 场景 (场

景 B); 走廊-实验室 NLOS 场景 (场景 C). 三种场景下收发天线位置如表 1.

表 1 测量场景

	场景 A	场景 B	场景 C
发射天线位置	Tx1	Tx2	Tx1
接收天线位置	M1	M1	M2

对于这三种场景下的每一条链路, 都利用前文介

绍的信道测量平台进行信道测量.测量过程中无人员

走动,避免干扰.

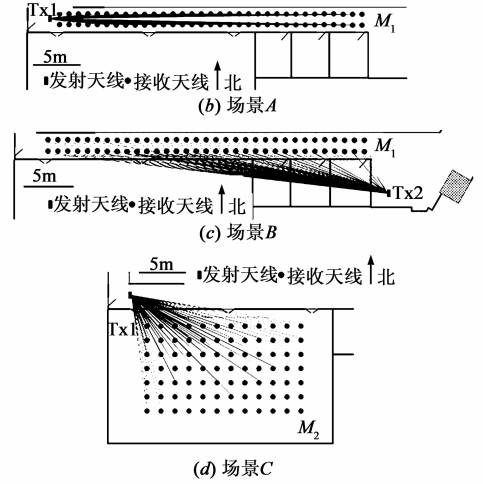
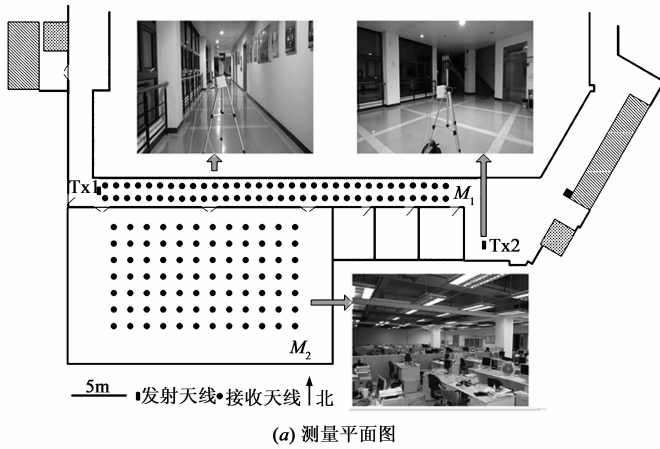


图2 测量场景

3 信道特性

测得 6.0-6.4GHz 不同室内场景下的 MIMO 信道响应矩阵后,基于这些数据进行分析 MIMO 信道特性,为该频段系统设计和性能评估提供支持.

3.1 传输损耗

传输损耗特性反映电波传播过程中的信号功率衰减情况,其定义为:

$$L = \frac{1}{\text{E}[|\mathbf{H}(i,j,f)|^2]} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{H}(i,j,f)$ 为第 i 根接收天线与第 j 根发射天线之间在频率 f 处的信道频率响应.

针对三个场景下的每条链路,均采用式(1)计算传输损耗.采用对数距离指数模型^[15]对传输损耗进行分析.传输损耗的对数距离指数模型为:

$$\bar{L} = \gamma_{PL} \times 10 \log d + L_0 \quad (2)$$

其中 d 为收发天线的距离,单位为 m; γ 为损耗系数; L_0 为参考距离处传输损耗.

通过最小二乘线性拟合,得到 6.0-6.4GHz 三种场景下传输损耗:

$$\bar{L}_A = 15.66 \log d + 46.31 \quad (3)$$

$$\bar{L}_B = 31.18 \log d + 46.45 \quad (4)$$

$$\bar{L}_C = 32.76 \log d + 49.92 \quad (5)$$

3.2 时延扩展

无线电波传播的多径效应使得信道冲激响应存在时延扩展,其特性由时延功率谱(Power Delay Profile, PDP)描述.PDP 定义为无线信道多径成分在时延域上的分布^[16]:

$$P(\tau) = \text{E}[|\mathbf{h}(i,j,\tau)|^2] \quad (6)$$

其中, $\mathbf{h}(i,j,\tau)$ 为第 i 根接收天线与第 j 根发射天线之

间的信道冲击响应.该参数由频率响应经过离散傅立叶反变换(Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT)获得:

$$\mathbf{h}(i,j,\tau) = \text{IDFT}[\mathbf{H}(i,j,f) \times w(f)] \quad (7)$$

其中, $w(f)$ 为布莱克曼窗函数,用于降低频谱泄露^[17]

均方根时延扩展(Root Mean Square Delay Spread, RMS-DS)是用于描述信道时延扩展程度的参数:

$$\tau_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{\tau} P(\tau) \tau^2}{\sum_{\tau} P(\tau)} - \left(\frac{\sum_{\tau} P(\tau) \tau}{\sum_{\tau} P(\tau)} \right)^2} \quad (8)$$

经过最小二乘线性拟合,可以发现全部场景中 RMS-DS 都随着收发距离延长而增大.三个场景下 RMS-DS 均值与距离 d 的关系为:

$$10 \log \tau_{\text{RMS},A} = 1.9 \log d + 9.2 \quad (9)$$

$$10 \log \tau_{\text{RMS},B} = 2.3 \log d + 12 \quad (10)$$

$$10 \log \tau_{\text{RMS},C} = 3.2 \log d + 11 \quad (11)$$

在 LOS 场景(场景 A)中, RMS-DS 在 10ns ~ 20ns 之间,在 NLOS 场景(场景 B、场景 C)中, RMS-DS 在 20ns ~ 40ns 之间,约为场景 A 的两倍.场景 B 下的平均 RMS-DS 比场景 C 大 2 ~ 4ns.

3.3 空间相关

受到散射程度和天线间距的限制, MIMO 天线阵列的天线之间存在一定的相关性.这种相关特性可以用空间间隔相关系数描述.相关系数的大小直接影响 MIMO 无线通信系统的信道容量和分集特性.

空间间隔相关系数定义为^[18,19]:

$$\mathbf{R}_{\text{Tx}} = \text{E}[\mathbf{H}^H \mathbf{H}] \quad (12)$$

$$\mathbf{R}_{\text{Rx}} = \text{E}[\mathbf{H} \mathbf{H}^H] \quad (13)$$

归一化可得空间间隔相关系数:

$$\rho_{\text{Rx}}(i,j) = \left| \frac{\mathbf{R}_{\text{Rx}}(i,j)}{\sqrt{\mathbf{R}_{\text{Rx}}(i,i) \mathbf{R}_{\text{Rx}}(j,j)}} \right| \quad (14)$$

$$\rho_{\text{Tx}}(i, j) = \left| \frac{\mathbf{R}_{\text{Tx}}(i, j)}{\sqrt{\mathbf{R}_{\text{Tx}}(i, i)\mathbf{R}_{\text{Tx}}(j, j)}} \right| \quad (15)$$

表 2 空间间隔相关系数均值

场景	场景 A	场景 B	场景 C
$\rho_{\text{Rx}, 0.5\lambda}$	0.74	0.28	0.54
$\rho_{\text{Rx}, \lambda}$	0.52	0.48	0.39
$\rho_{\text{Rx}, 1.5\lambda}$	0.42	0.20	0.33
$\rho_{\text{Tx}, 0.5\lambda}$	0.75	0.49	0.60
$\rho_{\text{Tx}, \lambda}$	0.48	0.38	0.53
$\rho_{\text{Tx}, 1.5\lambda}$	0.42	0.27	0.49

不同场景下空间间隔相关系数如表 2. 由表可知, 随着天线间距的增大, 空间间隔相关系数降低. 这表明在相同信噪比的前提下, 大天线间距的 MIMO 系统能够提供更高的分级增益和信道容量.

4 高频段的特殊性

为了分析 6.0-6.4GHz 频段下室内 MIMO 信道新特性, 将高频段信道参数与 2.45GHz ISM 频段信道参数进行对比. 其中, ISM 频段的信道参数取自 WINNER II^[14] 标准和 University of Cartagena^[11] 的测量结果.

图 3 描述了高低频段的传输损耗. 由图可知, 6.0-6.4GHz 频带的信道传输损耗比 ISM 频段大 10dB 左右. 因此, 在设计 6.2GHz 系统时, 要达到和 2.45GHz 相同的覆盖范围, 需要将发射功率提高 10dB. 图 4 对比了两种频段下 RMS-DS 均值. 测量结果表明, 在 LOS 环境下 6.0-6.4GHz 信道的 RMS-DS 小于 2.45GHz; 在 NLOS 环境

下, 距离大于 7m 时, 6.2GHz 信道的 RMS-DS 大于 2.45GHz. 在 LOS 和 NLOS 场景下, 6.0-6.4GHz 频段与 ISM 频段空间相关系数存在差异. 当中心频率 6.2GHz, 天线间距 5cm 时, 收发端两端相关系数在 0.38-0.52 之间. 当中心频率 2.45GHz, 天线间距 6cm 时, 收发端两端相关系数在 0.60-0.71 之间. 因此, 与低频段相比, 高频段能够用更小的天线间距获取更低的空间间隔相关系数.

5 结论

为了评估 6.0-6.4GHz 高频段无线信道, 采用基于网络分析仪的测量平台对典型室内场景 6-6.4GHz MIMO 信道进行测量, 并定量分析传输损耗、时延扩展、空间间隔相关等信道特性参数. 在此基础上, 通过测得高频段信道参数与 ISM 频段相应参数的对比, 分析高频段 MIMO 信道的新特性. 结果表明, 6.2GHz 频段和 ISM 频段 MIMO 信道传播特性存在较大差异, 在进行 6.0-6.4GHz 室内 MIMO 无线通信系统设计时, 需要基于这些新特性对系统的关键技术和方案进行调整. 由于传输损耗增大, 高频段室内基站和接入点覆盖范围降低, 可以采用更密集的覆盖提高单个用户的可用频谱, 提高系统的频谱利用效率. 高频段 LOS RMS-DS 小, NLOS RMS-DS 大, 因此在高频系统设计的时候需要增大码速率自适应调整的范围. 此外, 由于能够用更小的天线间距获取更低的空间间隔相关系数, 在高频段移动终端上能够配置更多的天线, 进而获取更大的信道容量和更高的分集增益.

参考文献

- [1] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27: 379-423, 623-656.
- [2] ALEXANDER S E. Radio propagation within buildings at 900 MHz [J]. Electronics Letters, 1982, 18(21): 913-914.
- [3] HOWARD S J, PAHLAVAN K. Measurement and analysis of the indoor radio channel in the frequency domain [J]. IEEE Transactions on Instruments and Measurements, 1990, 39(5): 751-755.
- [4] BULTITUDE R J C, MAHMOUD S A, et al. A comparison of indoor radio propagation characteristics at 910 MHz and 1.75 GHz [J]. IEEE Journal on

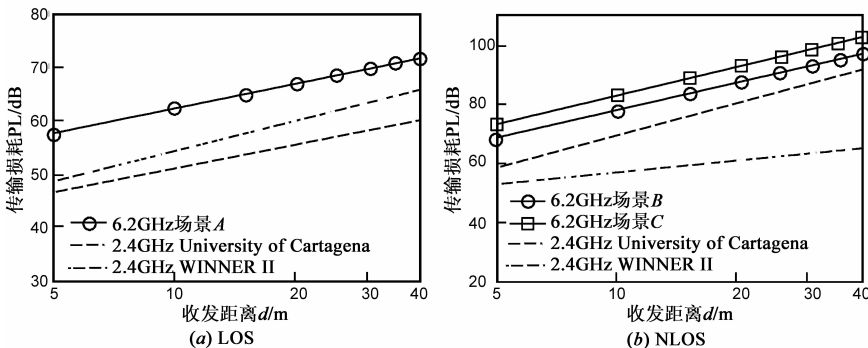


图 3 高低频传输损耗对比

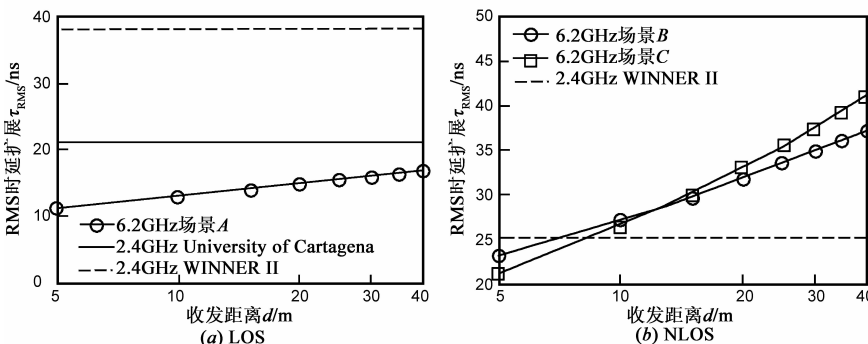
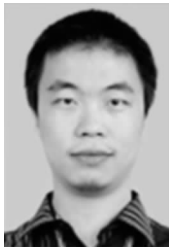


图 4 高低频RMS-DS均值对比

- Selected Areas in Communications, 1989, 7(1):20 – 30.
- [5] ZAGHLOUL H, MORRISON G, THOLL D, et al. Measurement of the frequency response of the indoor channel[A]. Proceedings of the 33rd Midwest Symposium on Circuits and Systems[C]. New York: IEEE, 1990. 405 – 407.
- [6] HASHEMI H., THOLL D. Statistical modeling and simulation of the RMS delay spread of indoor radio propagation channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1994, 43(1): 110 – 120, 1994.
- [7] DOLMANS G, LEYTEN L. Performance study of an adaptive dual antenna handset for indoor communications[J]. IEE Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation, 1999, 146(2):138 – 144.
- [8] YU K, BENGTSSON M, et al. Modeling of wide – band MIMO radio channels based on NLoS indoor measurements[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2003, 53(3): 655 – 665.
- [9] STRIDH R, OTTERSTEN B. Spatial characterization of indoor radio channel measurements at 5 GHz [A]. Proceedings of IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop[C]. New York: IEEE, 2000. 58 – 62.
- [10] NGUYEN H T, ANDERSEN J B, et al. A stochastic model of spatial-temporally correlated narrowband MIMO channel based on indoor measurement[A]. 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications [C]. New York: IEEE, 2004. 1827 – 1831.
- [11] MOLINA-GARCIA-PARDO J M, RODRIGUEZ J V, et al. Polarized indoor MIMO channel measurements at 2.45 GHz [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(12):3818 – 3828.
- [12] ERCEG V, SCHUMACHER L, et al. IEEE 802. 11 – 03/940r4: TGn Channel Models [EB/OL]. <http://standards.ieee.org/>, 2004.
- [13] HE S, et al. IST-WINNER D5. 4: Final report on Link and System Level Channel Models [EB/OL]. <http://www.ist-winner.org/>, 2005.
- [14] KYOSTI P, et al. IST-WINNER II D1. 1. 2: WINNER II Channel Models [EB/OL]. <http://www.ist-winner.org/>, 2007.
- [15] GAO X Y, ZHANG J H, et al. Large-scale characteristics of 5.25 GHz based on wideband MIMO channel measurements [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007, 6:263 – 266.

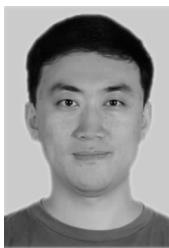
- [16] BELLO P A. Characterization of randomly time-variant linear channels[J]. IEEE Transactions on Communications Systems, 1963, 11(4):360 – 393.
- [17] MOLINA-GARCIA-PARDO J M, RODRIGUEZ J V, et al. Wide-band measurements and characterization at 2.1 GHz while entering in a small tunnel [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53(6):1794 – 1799.
- [18] YU K, BENGTSSON M, et al. Second order statistics of NLOS indoor MIMO channels based on 5.2 GHz measurements[A]. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference[C]. New York: IEEE, 2001. 156 – 160.
- [19] 张明, 张建华, 等. 一种通用宽带 MIMO 信道模型[J]. 电子学报, 2006, 34(10):1758 – 1762.
- ZHANG Ming, ZHANG Jian-hua, et al. A generalized broadband MIMO channel model [J]. Acta Electronica Sinica. 2006, 34(10):1758-1762. (in Chinese)

作者简介



张继良 男, 1985 年 3 月出生于黑龙江省大庆市, 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院博士研究生, 2007 年毕业于哈尔滨工业大学通信技术研究所并获得工学学士学位, 2009 年毕业于哈尔滨工业大学深圳研究生院并获取硕士学位. 现就读于哈尔滨工业大学电子与信息工程学院. 目前的研究方向集中于无线电波传播, 无线信道建模, MIMO 技术等.

E-mail: zhangjiliang3000@163.com



E-mail: wangyang@hitsz.edu.cn

汪 洋 男, 1977 年 9 月出生, 副教授, 博士生导师. 2005 年毕业于哈尔滨工业大学. 自 2002 年至今, 参与国家自然科学基金重点项目及其它 2 项国防预研项目, 负责无线信道传播特性建模研究. 同期先后获得哈工大创新基金、中国博士后科学基金、广东省自然科学基金、深圳市科技计划等项目支持. 五年内共发表相关学术论文 50 篇, 其中第一作者 35 篇, SCI 检索 5 篇, EI 检索 23 篇. 申请发明专利 5 项. 独立承担科研课题 6 项, 参与 5 项, 其中国家级重点和重大项目 4 项, 国防预研项目 2 项. 现担任深圳市专家委专家, 深圳市发改委基础科学专家, 深圳市南山区、龙岗区科技专家, IEEE 会员、中国电子学会高级会员, 深圳市地方级领军人才.