



基于 MIMO-OFDM 的高频段 Gbit/s 通信系统设计和实现^{*}

彭俊宇^{1,2,3}, 蔡孙增^{1,2,3}, 朱正航^{1,2,3}, 徐 景^{1,2,3}, 周 婷^{1,2,3}

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海 200050; 2. 中国科学院无线传感网与通信重点实验室 上海 200335; 3. 上海无线通信研究中心 上海 200335)

摘 要: 目前 6 GHz 以下频段已经相当拥挤, 低速移动环境下高速率无线通信的需求却日益增长。为了缓解上述问题, 设计了基于 MIMO-OFDM 的高频段 Gbit/s 通信系统。简要描述了系统的基本结构, 并介绍了同步、信道估计和多天线检测等物理层关键算法。在 FPGA 硬件平台上实现了所设计的高频段 Gbit/s 通信系统, 并在室内环境下对系统的传输带宽、传输速率等参数进行测试。测试结果表明, 搭建的硬件平台基本符合系统的设计要求。

关键词: 高频段; Gbit/s; MIMO

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.06.015

Design and Implementation of High Frequency Broadband Gbit/s System Based on MIMO-OFDM

Peng Junyu^{1,2,3}, Cai Sunzeng^{1,2,3}, Zhu Zhenghang^{1,2,3}, Xu Jing^{1,2,3}, Zhou Ting^{1,2,3}

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
2. Key Laboratory of Wireless Sensor Network & Communication, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200335, China;
3. Shanghai Research Center for Wireless Communications, Shanghai 200335, China)

Abstract: Spectrum bands below 6 GHz have been crowded currently, but demand for high speed wireless communication in low speed environment is growing. Research and development of high-frequency wireless communication system is an important way to alleviate this problem. System structure for high frequency broadband communication was proposed. Physical layer key algorithm such as synchronization, channel estimation and MIMO detection was described briefly. The high frequency broadband Gbit/s system based on MIMO-OFDM was implemented on FPGA based hardware platform. Bandwidth and data rate of the system was tested in indoor environment. Test result shows that performance of the system conforms to design requirements.

Key words: high frequency broadband, Gbit/s, multiple-input multiple-output

1 引言

作为一种高效的频谱复用技术, 正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)能够有效克服频率选择性衰落^[1], 被广泛运用于各种通信系统, 如

LTE、IEEE 802.11p 和 IEEE 802.11n。多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)技术利用在发送端和接收端放置多根天线提高系统容量。OFDM 和 MIMO 技术的结合是未来宽带无线通信技术发展的主流^[1,2]。

在无线通信系统中, 频谱资源是最宝贵的, 目前 6 GHz

^{*} 国家科技重大专项基金资助项目(No.2014ZX03003012), 上海市科技创新行动计划基金资助项目(No.12511503400)



以下频段已经相当拥挤。主流通信系统中,LTE-TDD(long term evolution-time division duplex)的工作频段为 3.8 GHz 以下^[3],而无线局域网(Wi-Fi)的工作频段为 2.4 GHz 和 5.9 GHz^[4]。由此可见在 6~15 GHz 频段中,还有相当大一部分可用于移动通信的频段未被开发。高频段无线通信系统的研究开发可为大容量、低速移动环境的无线通信提供可行的技术途径,对未来移动通信的发展具有重要意义。另外,远程会议、远程医疗以及高清视频点播等业务的发展,使得用户对网络速度的要求不断提高。在参考文献[5]中,东南大学对 Gbit/s 无线通信试验系统进行设计,并完成了硬件实现;参考文献[6]中,北京邮电大学面向 IMT-Advanced 系统的需求,对 Gbit/s 无线传输关键技术进行研究及实现。

本文首先介绍基于 MIMO-OFDM 的高频段 Gbit/s 通信系统的基本结构,然后对同步、信道估计和多天线检测等物理层关键算法进行简要分析,最后介绍所搭建的系统演示平台,并在室内环境下对系统传输带宽、传输速率等参数进行测试。

2 系统结构

本系统物理层使用的 OFDM 技术,载波频率为 6.25 GHz,支持 4 发 6 收的 MIMO 传输,最大可支持 4 个数据流进行数据传输。系统物理层关键参数见表 1。

图 1 为系统的帧结构,在本系统中,一帧的长度为 5 ms。每个帧包括下行链路子帧(downlink subframe)和上行链路子帧(uplink subframe)两个子帧,分别对应 TDD 双工模式的下行和上行物理传输链路。两种子帧之间的上行切换点(downlink to uplink switch point, DUSP)用于子帧类型的切换。每个子帧都以前缀(preamble)作为开头,用来进行定时同步和频偏估计。每个下行子帧有 9 个下行

表 1 系统物理层关键参数

参数	数值
发射天线数	4
接收天线数	6
子载波总数	1 024
传输数据的子载波数	768
传输导频的子载波数	32
使用的子载波数	800
零频率附近未用子载波数	4
子载波间隔/kHz	120
带宽/MHz	96
IFFT/FFT 周期/ μs	8.333
循环前缀长度/ μs	1.042 ($T_{\text{FFT}}/8$)
符号长度/ μs	9.375
帧长/ms	5
每个子载波的传输速率/(OFDM 符号 $\cdot\text{s}^{-1}$)	106.7 k
调制方式(调制因子(MI))	16QAM(4)
编码速率	5/6
每 OFDM 符号携带的编码后比特数/bit	3 072
单天线通路编码后数据速率	上行:276.48 Mbit/s; 下行:30.72 Mbit/s
4 天线通路编码后数据速率	上行:1 105.92 Mbit/s; 下行:122.88 Mbit/s
单天线通路有效数据传输速率	上行:230.4 Mbit/s; 下行:25.6 Mbit/s
4 天线通路有效数据传输速率	上行:921.6 Mbit/s; 下行:102.4 Mbit/s

时隙,每个上行子帧有 1 个上行时隙。每个时隙的长度为 $487.5 \mu\text{s}$,其中包括 midamble、控制字(control word)以及数据符号(data symbol),midamble 用来进行当前时隙的信道估计,控制字用来传输当前链路的控制和反馈信息。

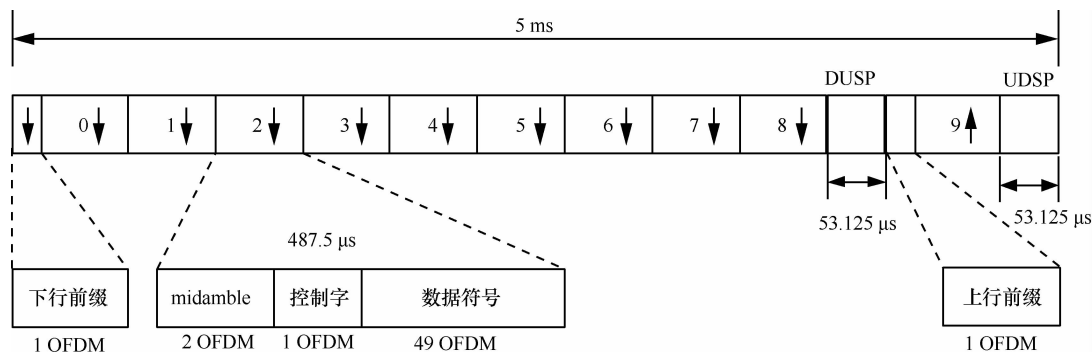


图 1 系统的帧结构

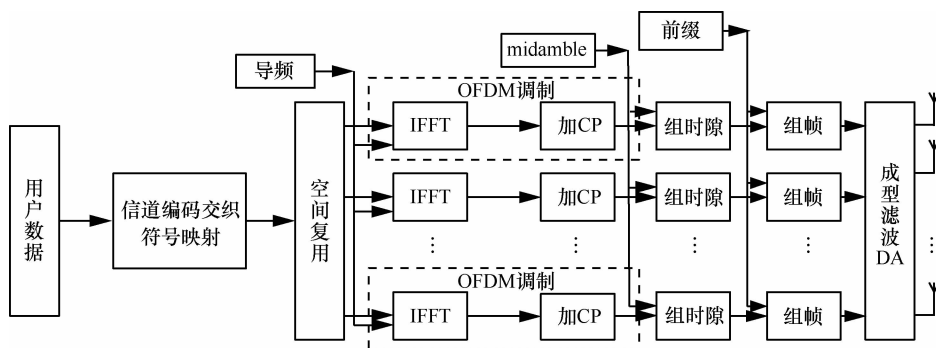


图 2 系统基带发射端结构

系统基带发射端结构如图 2 所示,主要包括以下几大模块:LDPC 编码、交织、符号映射、插入导频、插入 midamble、插入前缀、傅里叶逆变换、加循环前缀、成型滤波等。除此之外,还有系统定时同步模块、aurora 封装的 rocket I/O 接口模块。

系统基带接收端结构如图 3 所示,主要包括以下几大模块:同步、信道估计、多天线检测和 LDPC 解码等。

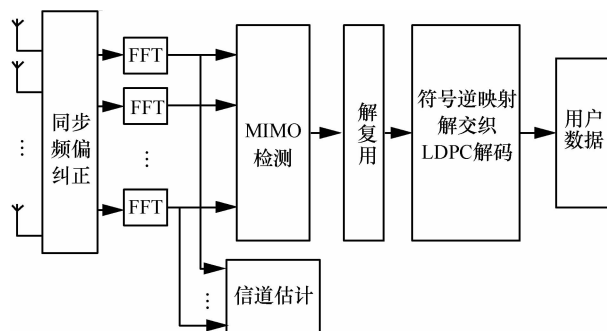


图 3 系统基带接收端结构

3 物理层关键算法

3.1 粗同步

MIMO-OFDM 系统需要在时间和频率上取得同步,时间上的同步用来寻找 OFDM 帧的正确起始位置,频率同步用来纠正载波频偏^[7-9]。本系统用二进制 Golay 互补序列作

为前缀,通过求接收序列自相关值的方式得到粗同步点,在进行载波频偏(carrier frequency offset, CFO)估计和矫正之后,利用矫正后的序列与本地序列的互相关获得精同步点。

系统中整个同步硬件实现的流程如图 4 所示。从天线接收的数据经过 A/D 转换得到数字信号,通过计算相关值模块及能量检测模块后得到粗同步符号定时 d_{est} 。一方面将得到的粗同步定时 d_{est} 送入 FIFO1 队列的粗定时控制;另一方面将粗同步定时 d_{est} 对应的相关值送入频偏估计模块,计算估计频偏,并将计算得到的载波频偏估计值送入 FIFO2 队列输出的频偏矫正模块。将校正后的数字信号同时送入精同步和 FIFO3 队列,根据精同步计算的符号精同步定时,确定出精确的 FFT 窗,去 CP 后经过快速傅里叶变换得到整个同步硬件模块的频域输出数据并送入下一个功能模块中。

3.2 信道估计

在不存在虚载波的情况下,最优导频是等能量,在频域中等间隔分布,不同天线的导频之间相互正交^[10,11]。但在实际系统中,存在虚载波。一是由于直流(direct current, DC)偏移,DC 子载波不用来传输数据,二是频带两边的高频部分作为保护频带,也不用来传输数据。当存在虚载波时,均匀分布的导频有些会落入虚载波区域,上述满频时的

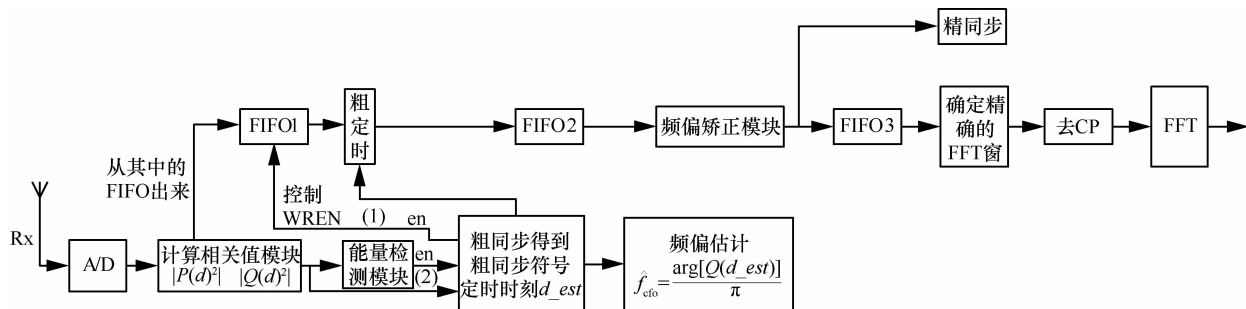


图 4 系统同步硬件整体实现流程



最优导频不再适用^[12]。本文采用 GCL(generalized chirp-like, 广义线性调频)序列作为导频序列^[13], GCL 序列在频域和时域中都是恒模, 具有理想的自相关特性, 由于 GCL 序列在时域中恒模, 能够得到较低的峰均比 (peak-to-average power ratio, PAPR)。本系统使用 LS(least square, 最小二乘) 估计算法得到导频上的信道响应后, 采用 3 次样条方式插值得到中间频率的信道响应。

3.3 MIMO 检测

MIMO 的应用可以通过发送多个独立子流来提高系统吞吐量, 但也带来多天线检测的复杂度。次优的译码算法有迫零 (zero forcing, ZF) 算法、最小均方误差 (minimum mean squared error, MMSE) 算法和有序连续干扰消除 (ordered successive interference cancellation, OSIC) 算法等^[14,15], 最优的算法如球形译码算法的复杂度过高^[16]。经过前期的仿真工作得出结论: 在 4 发 6 收天线的 MIMO-OFDM 系统中, ZF 算法和 MMSE 算法的性能差异很小, 最终选择复杂度较小的 ZF-SQR(多次排序) 检测算法作为最终硬件实现的首选方案。

4 系统硬件平台

系统硬件演示平台主要以 DE3-340 开发板为基础, 搭建和实现包括基带、AD/DA 及射频单元的完整宽带无线通信系统。图 5 是以 4 块 DE3-340 单板为基础通过 HSTC 接口互连实现的支持 MIMO 的基带硬件平台。

4 块基带处理板中, 包含 1 块主处理板、2 块协处理板和 1 块业务接口板。另外, 基带系统还包括 6 块数模转换子板 (DCC)、1 块吉比特以太网接口板 (ETH) 以及 DDP

SDRAM 扩展存储条。

该高频段 Gbit/s 无线传输系统选择的 DE3-340 芯片的片外 RAM 为 1 GB。逻辑资源分配与模块划分设计为: DE3 主处理板实现简单的 MAC 层控制、编码 (交织/解交织、LDPC 编码), 信道估计与 MIMO 解复用以及系统控制; DE3 扩展板 #1&2 实现 AGC、滤波、同步、频偏校正、解码、FFT/IFFT 等在各通道本地完成。

射频部分由 6 块中心频率为 6.25 GHz、工作带宽为 100 MHz 的射频收发单板构成。单通道天线发射功率不低于 0.1 W。射频模块需要提供收发切换控制, 切换控制时延不大于 5 μ s, 另外提供 AGC、APC 控制信号, 控制调整周期不大于 0.5 ms。

5 系统测试

系统测试在室内环境下进行。每个设备都配备 6 副天线, 设备之间相距 7.8 m, 为视距传播环境。两台设备之间进行点对点数据传输, 从而对相关系统参数进行测试。

5.1 系统传输带宽测试

设置系统硬件平台, 使其采用 16QAM 在 100 MHz 带宽下传输数据。待系统工作稳定后, 调整矢量信号分析仪的中心频率, 将频率扫描带宽设置为 200 MHz, 观察矢量信号分析仪上的测试结果, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 信号带宽为 100 MHz, 符合设计要求。

5.2 系统传输速率测试

设置系统硬件平台, 使其调制方式为 16QAM, 编码速率为 5/6, 传输 4 个子流的数据。待系统工作稳定后, 使用

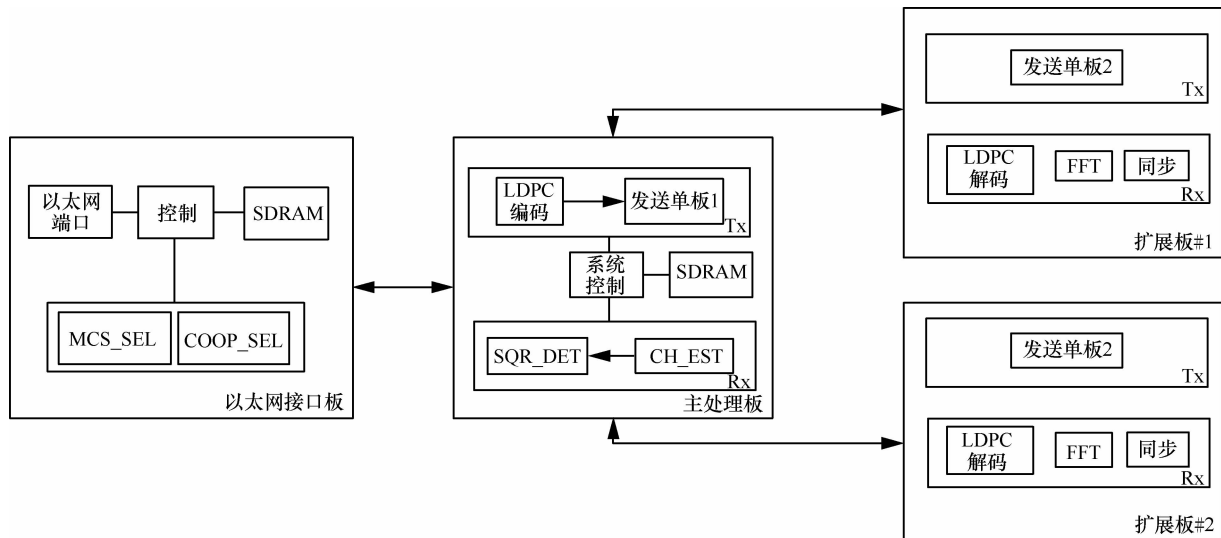


图 5 分布式系统硬件演示平台基带

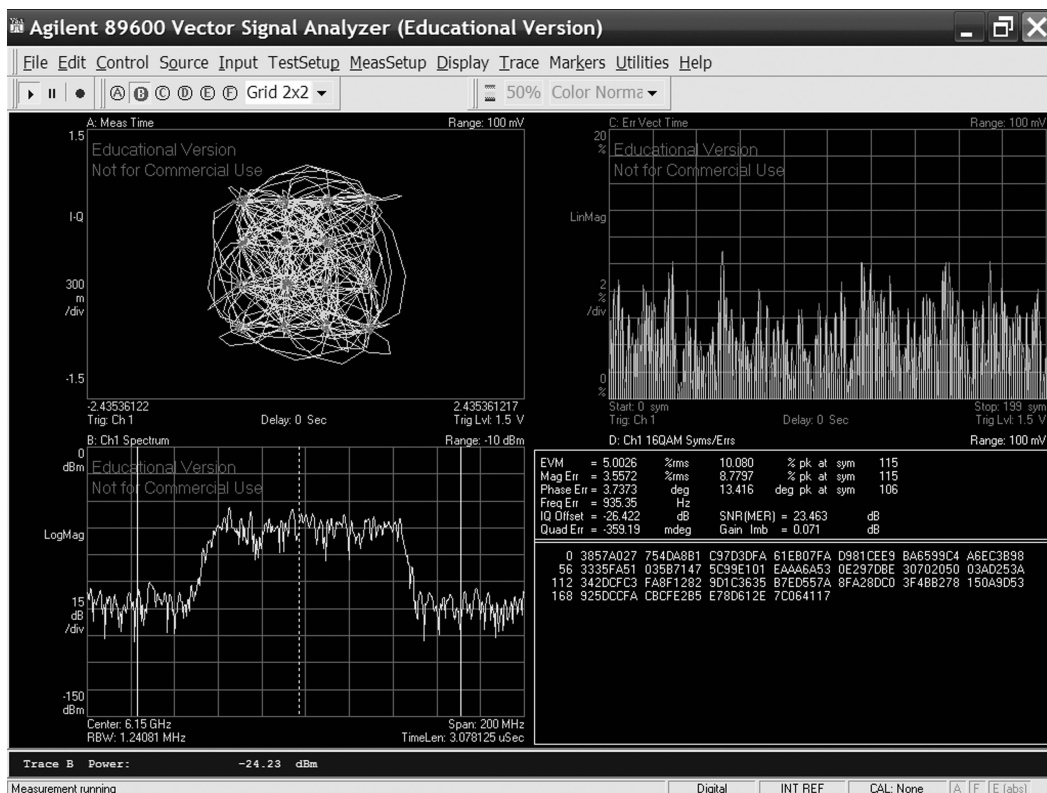


图 6 系统传输带宽测试结果

软件对系统下行链路数据流量进行统计,每隔 1 s 记录一次系统瞬时传输速率,共记录 10 min。软件的可视化界面

上会显示系统的实时工作状态,从中可以反映出系统的瞬时数据速率,可视化界面如图 7 所示。

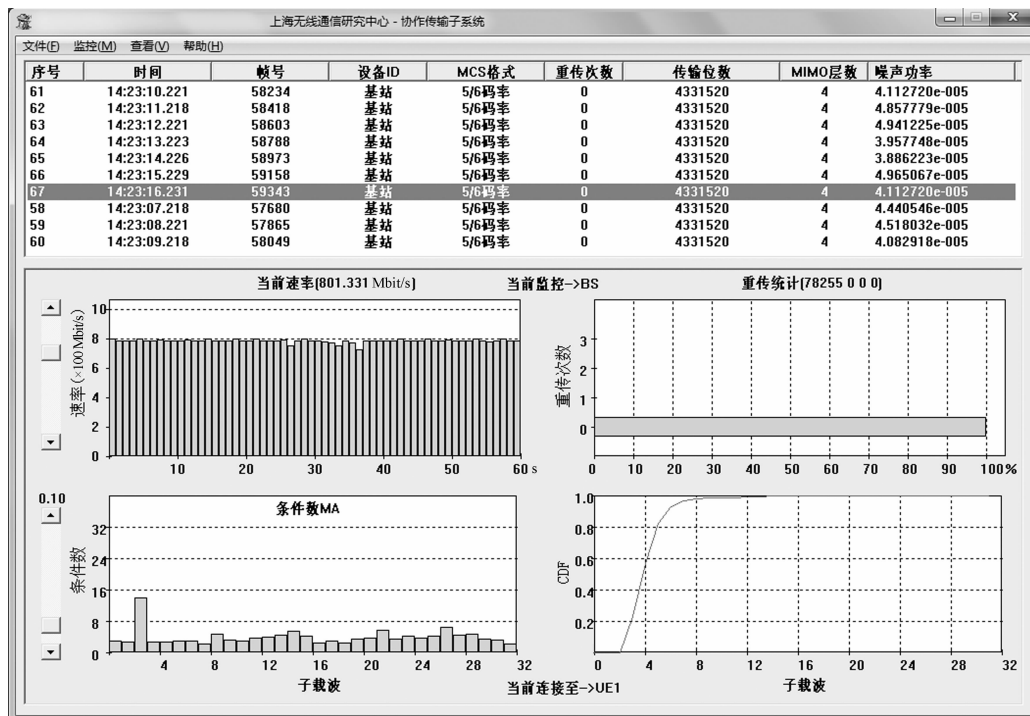


图 7 数据速率测试软件界面

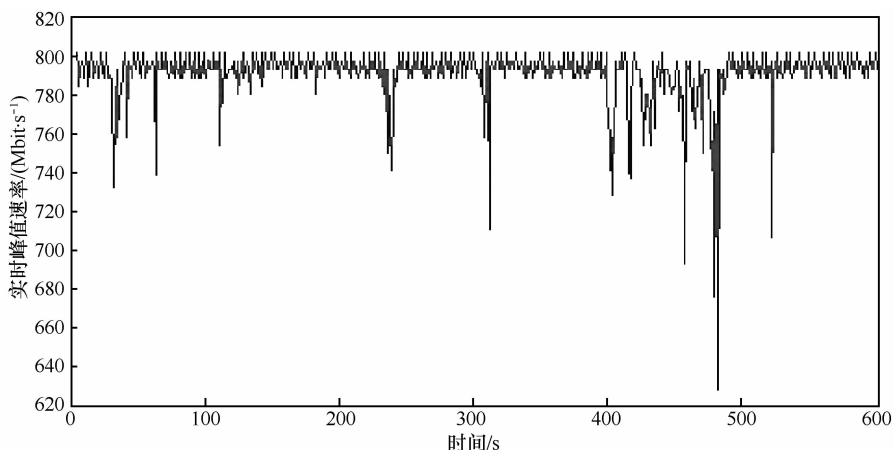


图8 系统实时速率测试结果

系统瞬时速率随时间变化的曲线如图8所示。

将观测时间内数据速率的最大值、最小值以及平均值列于表2中。由图8和表2可知,系统的最大数据速率为801.3 Mbit/s,平均速率为790.3 Mbit/s。

由测试结果可知,实际测得的4天线通路下的下行传输速率略低于表1给出的理论值,原因是存在一部分以太网开销。

表2 系统传输速率测试结果(观测时长600 s, 样本数600,样本间隔1 s)

最大值/(Mbit·s ⁻¹)	最小值/(Mbit·s ⁻¹)	平均值/(Mbit·s ⁻¹)
801.3	628.1	790.3

在测试过程中,系统接收端通过信道估计得到的信道矩阵会出现不满秩的情况,此时系统不能以4个子流进行数据传输。经过初步分析,认为造成这一问题的原因是设备天线布局不合理。在后续的工作中,将围绕这一问题对整套系统进行进一步优化。

6 结束语

为了解决目前6 GHz以下频段拥挤的问题,满足日益增长的高速率无线通信的需求,本文设计了基于MIMO-OFDM的高频段Gbit/s通信系统。描述了系统的基本结构,并对同步、信道估计和多天线检测等物理层关键算法进行了简要的介绍。所设计的系统在FPGA硬件平台上得到实现,并在室内环境下对系统的传输带宽、传输速率等参数进行测试。测试结果表明,搭建的硬件平台基本符合系统的设计要求。

参考文献

- 1 Mody A N, Stuber G L. Synchronization for MIMO OFDM systems. Proceedings of IEEE GLOBECOM'01, San Antonio, TX, USA, 2001: 509~513
- 2 Mody A N, Stuber G L. Receiver implementation for a MIMO OFDM system. Proceedings of IEEE GLOBECOM'02, Taipei, Taiwan, China, 2002: 716~720
- 3 3GPP TS 36.104-2013. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) Radio Transmission and Reception (Release 11), 2013
- 4 IEEE Std 802.11-2007. IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2007
- 5 王向阳, 赵艳杰. Gbit/s 试验系统中高速串行接口的设计与实现. 现代电子技术, 2008, 31(22): 4~7
- 6 张平, 王勇, 陶小峰等. Gbit/s 无线传输关键技术及试验验证系统. 中国通信, 2010(1): 99~103
- 7 Schenk T C W, Van Zelst A. Frequency synchronization for MIMO OFDM wireless LAN systems. Proceedings of IEEE 58th VTC 2003-Fall, Orlando, FL, USA, 2003: 781~785
- 8 Stuber G L, Barry J R, McLaughlin S W, et al. Broadband MIMO-OFDM wireless communications. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(2): 271~294
- 9 Van Zelst A, Schenk T C W. Implementation of a MIMO OFDM-based wireless LAN system. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2): 483~494
- 10 Barhum I, Leus G, Moonen M. Optimal training design for

- MIMO OFDM systems in mobile wireless channels. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(6)
- 11 Minn H, Al-Dhahir N. Optimal training signals for MIMO OFDM channel estimation. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(5)
 - 12 Hu D, Yang L X, Shi Y H, *et al.* Optimal pilot sequence design for channel estimation in MIMO OFDM systems. IEEE Communications Letters, 2006, 10(1)
 - 13 Lee D H. OFDMA uplink ranging for IEEE 802.16e using modified generalized chirp-like polyphase sequences. Proceedings of the First IEEE and IFIP International Conference in Central Asia on Source, Bishkek, 2005
 - 14 Li X, Huang H, Foschini G J, *et al.* Effects of iterative detection and decoding on the performance of BLAST. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, San Francisco, USA, 2000: 1061~1066
 - 15 Chiueh T D, Tsai P Y. OFDM Baseband Receiver Design for Wireless Communications. Wiley, 2007
 - 16 Lai I W, Ascheid G, Meyr H, *et al.* Efficient channel-adaptive MIMO detection using just-acceptable error rate. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(1): 73~83

[作者简介]



彭俊宇,男,中国科学院上海微系统与信息技术研究所硕士生,主要研究方向为无线通信系统物理层关键技术。



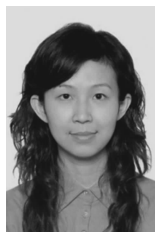
蔡孙增,男,中国科学院上海微系统与信息技术研究所博士生,主要研究方向为无线通信物理层信道估计均衡、同步等算法及可见光通信系统中的非线性后失真算法。



朱正航,男,上海无线通信研究中心工程师,主要研究方向为无线通信系统物理层算法与原型系统设计实现。



徐景,男,博士,中国科学院上海微系统与信息技术研究所副研究员,上海无线通信研究中心研发二部部长,主要研究方向为中继技术、B3G/4G 通信系统网络构架设计及资源管理。



周婷,女,博士,中国科学院上海微系统与信息技术研究所助理研究员,上海无线通信研究中心科研开发部部长,主要研究方向为中继技术、终端短距离直接通信及物理层网络编码。

(收稿日期:2014-04-08)

(上接第 72 页)

- 9 许树柏. 层次分析法原理. 天津:天津大学出版社,1998
- 10 Song Q Y, Jamalipour A. Network selection in all integrated wireless LAN and UMTS environment using mathematical modeling and computing techniques. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(3):42~48

[作者简介]



杨存,男,南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生,主要研究方向为异构无线网络接入选择算法。



赵季红,女,博士,西安交通大学电子与信息工程学院教授、博士生导师,西安邮电学院兼职教授,主要研究方向为宽带通信网络的基础理论研究及应用开发,如在宽带网的网络管理、多层传送网技术、现代交换技术、新一代网络的管理与控制、网络的生存性等。



赵庶源,男,西安交通大学电子与信息工程学院博士生,主要研究方向为 3G/4G、泛在网络、无线传感器网络、认知无线网络等无线资源管理和跨层优化算法及协议设计。

(收稿日期:2014-04-29)