

基于 NI PXI 的超高速 WLAN 系统原型机研发

张皓月 张晓燕 黄永明 王 孜 杨绿溪
(东南大学信息科学与工程学院 南京 211100)

摘要:提出了一种 IEEE 802.11ac 超高速 WLAN 原型机的设计方案,并基于 NI 的 PXI 平台和 LabVIEW 图形化语言开发实现。系统在 FPGA 上实现了 802.11ac 物理层基带的编解码、(逆)流解析、调制解调、(逆)FFT、同步、信道估计均衡等模块,同时通过估计接收信号强度修正接收天线放大倍数实现自动增益控制(AGC),从而实现自适应调制。最终联合 PC 上位机实现视频流实时传输。测试结果表明,系统接收信号误帧率低、传输速率高,能实现视频流的高速高质量传输,具有较好的可行性与应用性。

关键词:NI-PXI;802.11ac;自适应调制;LabVIEW

中图分类号: TN925.93 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Implementation of ultra-high-speed WLAN prototype based on NI PXI

Zhang Haoyue Zhang Xiaoyan Huang Yongming Wang Zi Yang Lvxi
(School of Information and Science Engineering, Southeast University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In this paper, we propose a designing scheme of ultra-high-speed IEEE 802.11ac WLAN prototype, which implemented on NI-PXI platform using LabVIEW graphic language. The system consists of different modules on 802.11ac physical layer, namely, encoder, stream parser, modulator, FFT and their inverses, synchronization, channel estimation as well as equalization. The system can also achieve automatic gain control(AGC) by correcting the antenna magnification with the estimated energy of the received signal, in this way, adaptive modulation is realized. The whole system transmits real-time video data combining with upper computers. Testing result shows that the prototype has good feasibility and applicability, which can achieve low frame-error-rate and high transmission rate, as well as supporting the high rate and high quality video transmission.

Keywords: NI-PXI;802.11ac; adaptive modulation; LabVIEW

1 引言

面向 2020 年以后的第五代移动通信技术(5G)是为满足日益增长的移动通信需求而发展的新一代移动通信系统^[1],5G 不再只是一种拥有高速率、高能力、高效率的空口技术,而是一种能够应对不同业务需求并不断提高用户体验的智能网络,5G 与其他无线移动通信技术之间的融合将会成为一种必然趋势。而 WLAN(wireless local area network)技术已经成为日常生活中必不可少的无线通信技术之一,在热点区域实现 WLAN 与 5G 的融合组网将能更有效地起到对现有蜂窝网分流的作用,同时可以大幅提高用户体验,是未来 5G 的发展方向之一。

IEEE 802.11ac 协议在 8 条空间流、256QAM 调制、5/6

编码码率、160 MHz 传输带宽、400 ns 保护间隔的条件下,物理层传输速率可高达 6 933.3 Mb/s^[2]。作为 802.11n 标准的一种延续,802.11ac 在原有基础上有很大改进。除了使用关键的正交频分复用(OFDM)、多输入多输出(MIMO)技术^[3]以及空时编码之外,802.11ac 还引入了多用户多输入多输出(MU-MIMO)技术,可以使用更高阶数的调制(256-QAM)使得传输速率成倍提升。此外,802.11ac 对于信道带宽进行了扩展,在 802.11n 的 20 MHz(可选 40 MHz)信道的基础上增至 40 MHz、80 MHz,甚至达到 160 MHz。物理层的帧结构增加了 VHT_SIG_B 区域,用来描述所要传输的数据长度、调制方式和编码策略(modulation and coding scheme,MCS)以及单用户/多用户模式。当然,满足上述要求也面临着复杂技术带来的更大挑战。

收稿日期:2015-12

802.11ac 能提供高速的传输速率、良好的用户体验等,本文提出一种适用于 IEEE 802.11ac 协议高速数据传输的系统实现方案,并借助 NI-PXI 平台对其原型机进行开发验证,使用 NI 的系统能缩短开发周期^[4],这对新一代 WiFi 技术及 5G 技术的研究具有重要意义。

2 基于 IEEE 802.11ac 的 WLAN 系统

2.1 IEEE 802.11ac 分组结构

如图 1 所示为 802.11ac 物理层帧结构^[5],由前导码字段和数据字段组成。



图 1 802.11ac 物理层帧结构

其中,L-STF 为传统短训练字段,在时域上的长度为 $8 \mu\text{s}$,其包含 10 个重复的 $0.8 \mu\text{s}$ 的码元。L-STF 具有良好相关特性,可用于分组检测、自动增益控制(AGC)设置及初始频率偏移估计等。

L-LTF 为传统长训练字段,在时域上的长度为 $8 \mu\text{s}$,是由两个 $3.2 \mu\text{s}$ 的长训练序列和前面 $1.6 \mu\text{s}$ 的循环前缀组成。利用 L-LTF 中两个相隔 $3.2 \mu\text{s}$ 的取样之间的相位差可以得到载波频率偏移更加精确的估计。

L-SIG 为传统信令字段,由 24 个信息比特组成,包含用于配置接收机的分组信息,包括速率(调制和编码)和长度(八进制传输的数据量)。

VHT-SIG-A 为甚高吞吐量信令字段 A,其承载的所有 48 个信息比特经过 $1/2$ 码率的 BCC 编码得到 96 个编码比特,这些编码比特被分配到 VHT-SIG-A1 和 VHT-SIG-A2 中,每个符号中的编码比特经过交织、BPSK 映射、插入导频等操作后最终生成 VHT-SIG-A 的频域序列。

VHT-STF 为甚高吞吐量短训练字段,可以对多空间流的系统采用更大的循环移位值,得到比 L-STF 更精确的 AGC 控制过程。

VHT-LTF 为甚高吞吐量长训练字段。它为接收端的 MIMO 信道估计提供服务,所有用户每根天线上的 PPDU 传输帧都包含该字段,用来完成信道估计和均衡等操作。

VHT-SIG-B 为甚高吞吐量信令字段 B,占用 1 个 OFDM 码元。在不同的传输带宽下,VHT-SIG-B 字段所包含的比特数不同。对于 20 MHz 传输带宽下的多用户传输过程,VHT-SIG-B 字段指示不同用户的数据长度(B0-B15)和调制编码方式(B16-B19)。

Data 为甚高吞吐量数据字段,用来承载发射端需要传输的实际数据。其 OFDM 符号的个数由 L-SIG 字段中的长度域、前导占用时间以及 VHT-SIG-A 字段中短保护间隔(Short GI)的设置共同决定。

2.2 IEEE 802.11ac 系统架构

IEEE802.11ac 标准为单用户和多用户模式定义了二进制卷积编码(BCC)和低密度奇偶校验码编码(LDPC)两种信道编码方式。发射过程采用 OFDM 和 MIMO 相结合的技术,实现无线局域网的高吞吐量,并提高其强健性与可靠性。以 BCC 编码为例,对于单用户的发射过程,数据字段完整的发射机流程如图 2 所示。

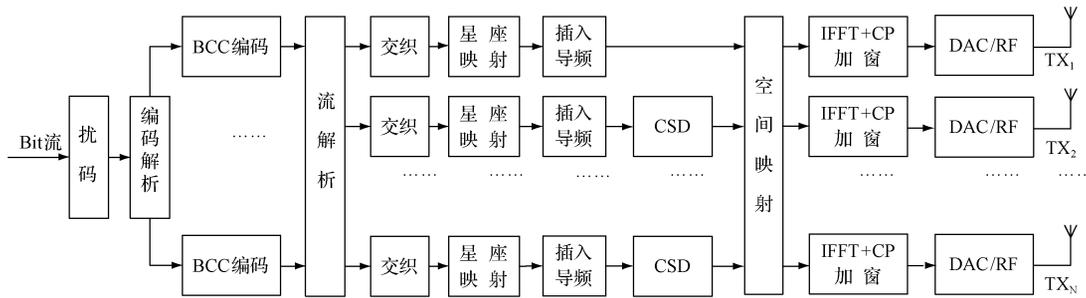


图 2 802.11ac 发射机流程

一个完整的发射过程包含扰码、BCC 编码(包含编码前的解析)、流解析、交织、星座映射、插入导频、循环移位(CSD)、加循环前缀(CP)、IFFT 以及射频处理等部分。

在接收端,大部分操作过程与发射端互为逆关系以确

保最后得到正确的比特序列。802.11ac 接收机流程如图 3 所示。对于 MIMO-OFDM 系统,接收端有许多特有的信号处理过程,例如时频同步、MIMO 信号检测、相位补偿等。这些部分将会在下文系统硬件设计与实现部分具体阐述。

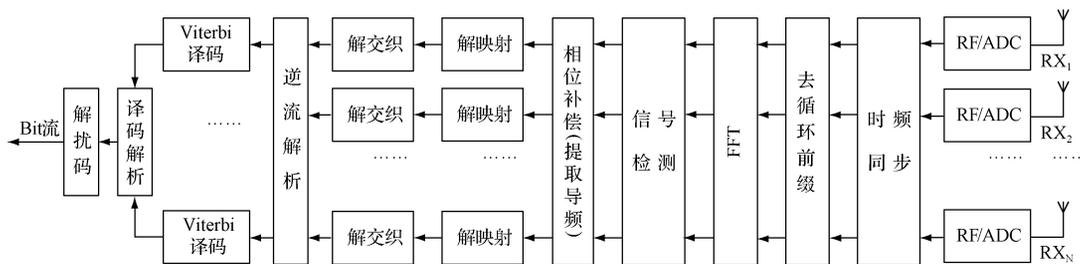


图3 802.11ac 接收机流程

3 系统设计与实现

3.1 系统框架

本文原型机整个系统的结构框架如图4所示,系统设计主要分为PC端、HOST端及FPGA端设计3个部分,

PC端设计基于C#语言实现视频的编解码等工作,而HOST端和FPGA端设计主要是基于LabVIEW编程实现,前者负责参数配置、数据传输等工作,后者负责实现IEEE 802.11ac协议的物理层模块。这三者之间也要进行数据同步。下文将对各个部分的设计进行详细的叙述。

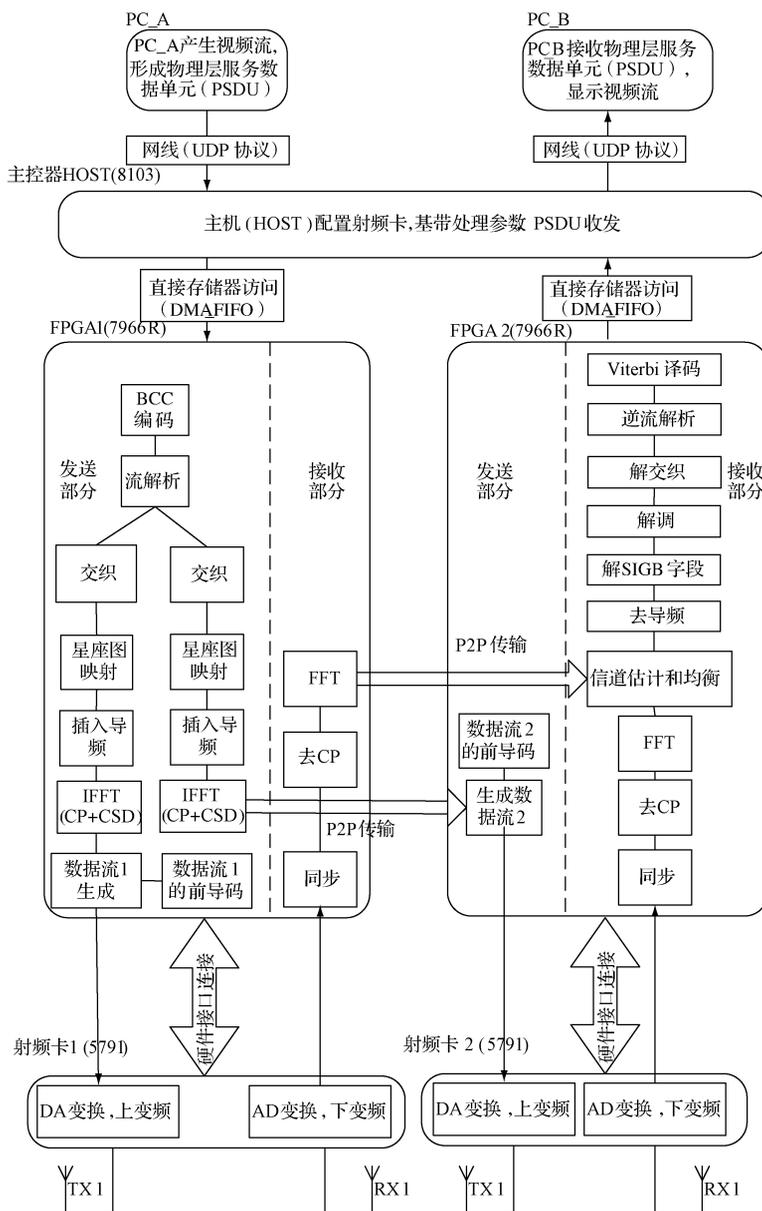


图4 系统总体结构框架

3.2 HOST 端设计

HOST 端是连接 PC 端及 FPGA 端的重要纽带。其主要完成的工作为:PC 端视频流的收发、基带参数的传递及 DMA_FIFO 的建立、射频参数的传递、FPGA 板卡间数据传输及同步配置以及自动增益控制(AGC)和自适应调制(AMC)功能。

3.2.1 视频流收发配置

PC 端与 HOST 端之间的通信是通过 UDP 协议完成的。UDP 有连接简单、速度快的特点,只要保证发送端 PC、NI-PXI 的主控器、接收端 PC 三者都连接在同一个局域网内,即可利用 UDP 实现数据的高速通信。

HOST 具体设置如下:发送端 PC 设置本机 IP 地址和目的 IP 地址,目的设备端口号设为 12270。此外还需设置一个接收 HOST 发来的数据请求中断的端口号,设其为 2000;接收端 PC 将本机 IP 地址和远程设备 IP 地址均设为实际地址,再定义一个接收远程数据的端口号 12271。这样就可以利用 Socket 套接字进行 UDP 数据的发送和传输。

3.2.2 自适应调制(AMC)方案

尽管高阶调制、高编码速率可以使频谱效率提高,但这对通信系统的信噪比参数提出了较为严格的要求,如果噪声能量达到一定程度会造成系统误码率上升,误码性能大大下降,从而降低了系统的吞吐量。为确保系统的有效吞吐性能,当信噪比较低时,应选择低阶调制方式与编码速率,当信噪比较高时,可以选择高阶调制方式与编码速率。因此,设计采用自适应调制(AMC)技术,在发射功率恒定的情况下,通过调整无线链路传输的调制方式与编码速率确保链路的传输质量。

实现 AMC 的过程需要稳定的信号功率,这需要引入自动增益控制(AGC)技术以确保信号能量的稳定性。在 AGC 的工作过程中,设置预期能量 p_{ref} 为 AGC 过程趋于稳定时的接收信号能量,使用功率 p_0 初始化配置天线。在通信过程中,信道环境发生变化时,接收信号的能量 p_r 也不断波动,接收射频放大倍数 p_d 也会随之变化。接收信号能量降低时,接收天线的射频放大器会提高放大系数;接收信号能量提高时,则会降低放大系数,将接收信号能量稳定在 p_{ref} 附近。AGC 过程中参数 p_d (对数形式)满足公式(1),其中 p_{d_new} 为 p_d 的更新值。

$$p_{d_new} = p_r - p_{ref} + p_d \quad (1)$$

考虑采用 BCC 信道编码方式的单用户 MIMO 2×2 系统,固定 BCC 编码速率为 $1/2$,一种简单的 AMC 设置方案如表 1 所示,此时对应的预期能量 $p_{ref} = -8$ dBm。

3.3 FPGA 端设计

FPGA 端的设计是基带数据处理的核心,此外还负责射频卡配置、P2P 传输、FPGA 间同步设计。图 4 中展示了发射端及接收端基带的主要过程,重要模块的具体细节如下文所述。

表 1 AMC 调制方式与调整功率参数 p_d 的关系

p_d 所在区间/dB	选择调制方式
(-27, -18)	BPSK
(-18, -12)	QPSK
(-12, -8)	16QAM
(-8, -5.5)	64QAM
(-5.5, -4)	256QAM

3.3.1 BCC 编码

采用 IP 核实现 802.11ac 标准规定的 BCC 编码器,其生成多项式 $g_0 = 133_{(8)}$ 和 $g_1 = 171_{(8)}$,分别对应于生成多项式 $S_0(x) = x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$ 和 $S_1(x) = x^6 + x^3 + x^2 + x^1 + 1$,可以使用移位寄存器来实现^[6]。卷积编码后的两路输出相互合并再进行后续传输。根据不同的规则进行删余打孔,BCC 信道编码器支持 $1/2$ 、 $2/3$ 、 $3/4$ 、 $5/6$ 4 种编码速率,以满足更高的传输效率。

3.3.2 流解析与逆流解析

在经过信道编码后,流解析将编码比特被重新排成一组新的、等于空间流数(NSS)的比特串。其输出为 NSS 路并行比特序列,每个串的长度为 NCBPSS (每空间流编码比特)。逆流解析时流解析的逆过程,主要完成两个数据流合并成一个流的过程。

3.3.3 调制与解调

星座映射过程是把比特序列以一定的方式映射到星座图中的一个复数星座点。IEEE802.11ac 支持的映射(调制)方式包括 BPSK、QPSK、16QAM、64QAM 和 256QAM,各调制方式下每个子载波的复数星座点分别承载 1、2、4、8 和 16 个比特的信息,也即调制阶数 NBPSCS。前导码字段中的信令字段均采用 BPSK 调制。生成数据字段时,根据信令字段中的 MCS 信息,子载波选择相应的映射(调制)方式。在 20 MHz 带宽下,每个 OFDM 码元是由 52 个有效的复数星座值组成;4 MHz 带宽时这个有效值为 108 个。解调为调制的逆过程,以恢复传输。

3.3.4 IFFT 与 FFT

实现发射端频域数据到时域数据的转换,同理,FFT 则实现了接收端时域数据到频域数据的转换,以用于后续处理。

3.3.5 同步

由于实际实现时上变频与下变频的本振由一个时钟产生,所以不考虑载波频率同步的问题^[7],系统中涉及的同步是定时同步^[8],处理主要分为捕获和跟踪两个阶段,具体分为帧同步过程和符号同步过程。帧同步又称作粗时间同步,用于检测数据分组的到来,这是时间同步的捕获阶段;符号同步又称作精时间同步,需要寻找相关函数的峰值^[9],用于精确定位 OFDM 符号数据的起始位置,这是时间同步的跟踪阶段。

3.3.6 信道估计与均衡

信道估计是获取信道信息的重要模块,利用估计出的信道响应可以对接收端数据进行信道均衡操作从而恢复数据^[10]。IEEE802.11ac 协议的信道估计采用定期发送训练序列的方法,即利用前导码中 VHT-LTF 的若干字段在频域内进行信道估计。信道均衡则是对接收信号进行一定的补偿操作,即对信号进行恢复与提取,为后续的解调和信道解码过程打下基础。利用之前得到的估计信道进行信道均衡过程,可以减轻或消除码间干扰,使得系统能够对抗无线信道衰落,从而提高无线系统的数据传输速率和频谱效率。本原型机采用基于 LS 算法的信道估计和基于 ZF 算法的信道均衡。

3.3.7 维特比译码

本系统中采用 Xilinx 的 IP Core 实现 Viterbi 译码,串行输入,需要重点考虑的是咬尾问题。因此需要在每一帧的最后添加 6 个 0,使译码器回到初始状态。

3.4 PC 端设计

PC 端主要完成视频流的编码打包,并加上 CRC 校验码,同时根据不同调制方式改变发送数据包的大小。之所以选择用两台 PC 分别处理视频流的收发,是因为考虑到 LabVIEW 对视频流处理能力的薄弱,如果采用 HOST 端作视频流的编解码,这会耗用大量的 CPU 资源。因此 NI 仪器完全用来处理数据比特部分,而视频流的一系列处理则用 C# 编写的代码进行。

4 结果测试与分析

关于原型系统的测试,分别从接收星座图演示以及视频流传输两个角度进行分析,以便更好地测试系统的性能。

4.1 接收星座图演示

在接收信号星座图测试中,Host 需要实现 AGC 功

能,根据是否采用 AMC 方案,可以将接收星座图测试分为手动模式和自适应模式两种。手动模式下,固定星座映射方式,这种模式可以观察特定星座映射方式下不同天线环境对接收星座图的影响;自适应模式下,系统根据当前的信道环境自动设置合适的星座映射方式,使得数据传输的速率和误码性能达到同时较优的状态。如图 5 所示为手动模式下,发送端采用 256-QAM 调制方式的接收星座图结果。如图 6 所示为展示了自适应模式下的接收星座图结果,此时自适应调试方式为 QPSK。自适应模式下,改变天线的位置与间距意味着信道环境发生变化,系统自动给出一种既保证传输质量又具有尽可能高吞吐率的数据传输方案。

4.2 视频流实时传输

如图 7 所示为基于 NI-PXI 平台的 IEEE 802.11ac MIMO2×2 演示系统,图中右侧 PC 产生包含两路视频流的数据源信息,通过 UDP 协议可以将数据源传输到 NI-PXI 控制器 Host 中。Host 将数据传输到 FPGA 中生成时域 OFDM 符号,通过射频卡以无线方式发送并接收数据,接收到的数据送入 FPGA 做接收端处理,从而恢复出视频数据并传回到 Host 中,再次通过 UDP 协议将恢复的视频数据传输给图中左侧 PC,并对视频数据进行实时显示。系统的实际工作速率如表 2 所示。从表中可以看出,由于硬件实现时存在硬件性能的限制以及各类微小的偏差,系统实际的传输速率并不能达到理论值。同时,当采用高阶的星座映射方式进行传输时,实际物理层传输速率逐渐受限,数据吞吐量不能正常翻倍,这是因为采用高阶映射方式时,控制器 Host 需要在相同时间内处理更多的数据包,当 Host 处理能力达到极限时,实际的传输带宽不能充分利用,因此传输的吞吐量不能按照预期进行提升。如果采用 256QAM 映射方式,在相同时间内进行与低阶映射方式具有相同 OFDM 发送符号数的传输过程,系统将不

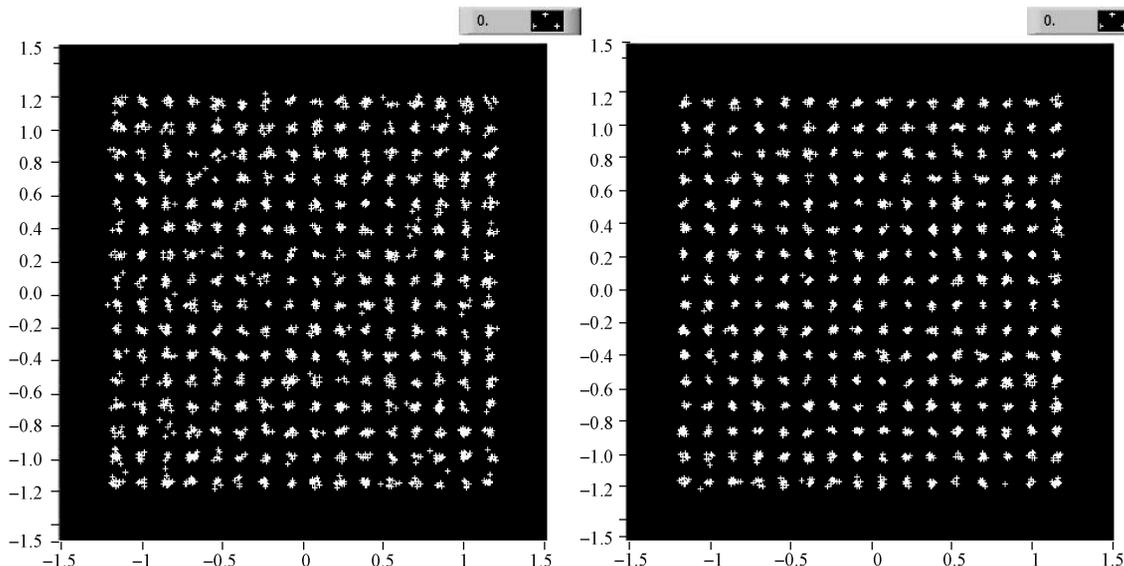


图 5 手动模式下 256-QAM 接收星座图

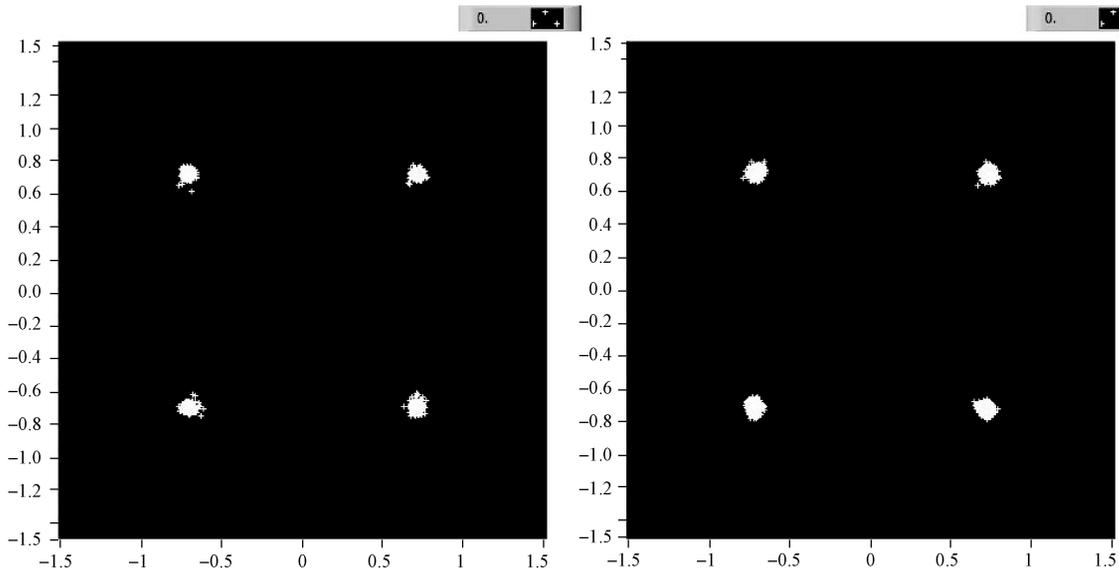


图6 AMC模式下接收星座图



图7 IEEE802.11ac MIMO2×2 演示系统

能正常工作,这是由于原型系统所需的时钟速率达到控制器 Host 的工作极限,因而无法支持 256QAM 进行正常的物理层传输。同时,256QAM 正常工作所需的接收信噪比要求也较高,在接收星座图测试中可以看出该映射方式下的星座点性能不甚理想。

表2 原型系统在各映射方式下的传输速率 (M/s)

映射方式	BPSK	QPSK	16QAM	64QAM
理论工作速率	13.0	26.0	52.0	78.0
实际工作速率	11.2	22.4	44.8	46.7

5 结 论

该系统方案利用 NI 的 PXI 平台及 LabVIEW 软件平台进行研发,使我们能专注于 802.11ac 协议的实现,缩短了研发周期。LabVIEW 图形化的编程语言以及提供的 IP 接口也为开发者提供了不少的便利。系统的核心运算都在高速的 FPGA 模块内完成,能满足原型机设计目标的高速要求。整

个系统的测试结果表明,原型机能正确显示接收数据在不同调制方式下的星座图,系统工作速率也能达到要求,能进行高质量的视频流的传输。本文设计的原型机只是阶段性的成果,还有更进一步的空间,如将基带带宽拓展到 40 MHz,扩展到 4×4 的 MIMO 系统以及开展毫米波的研究。

参 考 文 献

- [1] JUE G, SHIN S.灵活的 5G 波形及超宽带信号生成和分析测试系统[J].国外电子测量技术,2015,34(6): 16-21.
- [2] PERAHIA E, GONG M X. Gigabit wireless LANs: an overview of IEEE 802.11ac and 802.11ad [J].ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review,2011,15(3):23-33.
- [3] JIANG M, HANZO L. Multiuser MIMO-OFDM for next-generation wireless systems [J].Proceedings of the IEEE, 2007, 95(7):1430-1469.
- [4] 邓茂荣.基于 NI CompactRIO 的高精度研磨系统的设

- 计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(增刊1): 165-168.
- [5] PERAHIA E, STACEY R. 下一代无线局域网 802.11n 的吞吐率、强健性和可靠性[M]. 罗训, 赵利, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 46-79.
- [6] 史治国, 洪少华, 陈抗生. 基于 XILINX FPGA 的 OFDM 通信系统基带设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009: 51-75.
- [7] 戴猛, 陈叶明. 一种频域相位差分测频算法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 25-28.
- [8] NGUYEN M D, NGUYEN V T, NGUYEN T D, et al. FPGA implementation of the synchronization for IEEE 802.11 n WLAN systems [C]. IEEE Fifth International Conference on Communications and Electronics, 2014: 280-284.
- [9] 王飞. 基于 FPGA 的全数字化峰值时刻检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 914-919.
- [10] KAUR J, SINGH M. Performance analysis of various channel estimation techniques for higher order modulation in a MIMO system [J]. International Journal of Engineering

and Innovative Technology, 2012, 2(2): 114-117.

作者简介

张皓月, 1991 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为 MIMO 传输技术和实现。

E-mail: hyzhang91@126.com

张晓燕, 1991 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为 WLAN 系统传输技术及硬件实现。

E-mail: Xiaoyan_Zhang_@hotmail.com

黄永明, 1977 年生, 工学博士, 教授, 主要研究方向为多天线的宽带无线通信的现代信号处理理论与技术。

E-mail: huangym@seu.edu.cn

王孜, 1989 年生, 工学硕士, 主要方向为虚拟仪器的无线射频技术。

E-mail: wangzibaba@126.com

杨绿溪, 1964 年生, 工学博士, 教授, 主要研究方向为通信信号处理、移动通信中的 MIMO 空时信号处理、中继协作通信与网络编码、盲信号处理与阵列信号处理等。

E-mail: lxyang@seu.edu.cn

泰克启用全新品牌徽标和品牌战略

新标识体现了公司新愿景：科技改变世界，灵感着陆现实

泰克科技公司日前启用全新品牌标识和品牌战略，开启公司 24 年来最明显的视觉识别系统变动。泰克科技成立于 1946 年，是电子行业最具有标志性的公司之一。在公司成立 70 周年大会上，新徽标首次亮相，其不仅继承了公司 70 年的优良传统，同时也为公司发展的下一阶段指明了道路，即加速实现变革世界的创新技术。

泰克对原来的徽标进行了重新设计，标志字体内部带有一个向上的角，代表泰克保持着不断昂首向前的姿势。略微修剪的字母“T”总领采用 sans-serif 字体的文字，与蓝色的角直接呼应，简单明确的线条则体现了我们对性能的承诺。

“新徽标的设计离不开广大客户的支持。”泰克科技公司总裁 Pat Byrne 指出，“在调研过程中，我们采访了全球范围内一千多位客户、合作伙伴和员工，以便深入了解购买者行为特点和发展趋势。调研结果充分体现在我们的品牌上，展示了为什么客户会选择我们的产品和服务。”

大量的测量工程师已经选择泰克的通用测量仪器。但随着复杂程度和产品开发周期压力加大，他们需要完整度高得多的解决方案，来处理这些复杂的测量任务，自动完成困难的测量任务。这就需要创造更强大的客户体验和品牌识别系统，以突出协作、整合、洞察力、精度、简单性和速度。

“我们正在把更多的重点放在满足具体客户需求的应用和解决方案上。”Byrne 补充说，“全新品牌战略体现了我们从一家以产品为中心的硬件公司转向一家以应用为重点的科技公司，主要重点是以更高的精度、速度和简便性，来加快客户获得测量数据的速度。”

全新徽标已经应用于泰克全球的数字平台和实际资产中，同时泰克网站也全面改版，客户可以更方便快捷地找到所需的解决方案。新产品将采用新启用的徽标。在过渡期间，现有存货将继续使用当前徽标。