

# GRT : 高性能可定制无线网络底层软硬件开放平台

吴浩洋<sup>1</sup>, 王 韬<sup>1,3</sup>, 陈佳华<sup>1</sup>, 龚 健<sup>1</sup>, 李晓光<sup>1</sup>, 张高瀚<sup>1</sup>, 吕松武<sup>2,3</sup>

(1. 北京大学信息科学技术学院 北京 海淀区 100871; 2. 美国加州大学洛杉矶分校计算机系 洛杉矶 加州 美国 90095;

3. 北京大学洛杉矶加州大学理工联合研究所 北京 海淀区 100871)

**【摘要】**随着无线技术的飞速发展,无线领域的研发者和特殊需求的使用者亟需一种高性能、可定制的无线网络底层软硬件平台。本文介绍了自主设计并实现的GRT平台,能够提供高性能、高可定制性、高兼容性与开放性的特征。作为示例,已经在GRT系统上实现了一套基于802.11a/g协议的软/硬件代码,性能超过了协议标准中对于物理层最大速率的要求,且能够与商用WiFi设备进行互通。

**关键词** 可定制; 高性能; 开放平台; 无线网络

中图分类号 TP393.02

文献标志码 B

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2015.01.021

## GRT: a High-Performance Customizable HW/SW Open Platform for Underlying Wireless Networks

WU Hao-yang<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1,3</sup>, CHEN Jia-hua<sup>1</sup>, GONG Jian<sup>1</sup>, LI Xiao-guang<sup>1</sup>, ZHANG Gao-han<sup>1</sup>,  
and LÜ Song-wu<sup>2,3</sup>

(1. School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University Haidian Beijing 100871;

2. Computer Science Department, University of California, Los Angeles Los Angeles CA USA 90095;

3. PKU-UCLA Joint Research Institute in Science and Engineering Haidian Beijing 100871)

**Abstract** With the rapid development of wireless technology, wireless developers and users for special needs require a high-performance, customizable hardware/software(HW/SW) open platform for underlying wireless networks. This paper describes the design and implement of our proposed GRT platform, which can provide the features of high-performance, highly customizability, compatibility, and openness. As an example, we have implemented a set of SW/HW codes following 802.11a/g protocol. The system based on these codes exceeds the maximum data rate of the physical layer specified in the protocol, and can communicate with commodity WiFi devices.

**Key words** customizable; high-performance; open platform; wireless

随着通信与计算机技术的迅猛发展,无线通信与网络已经深入到人们的日常生活,也成为了现代科技研究的一个重要领域。以WiFi为例,根据美国市场研究公司ABI Research的报道,2014年的WiFi芯片组出货量已超过26亿,预计2015~2019年间,WiFi芯片组的累计出货量将接近180亿<sup>[1]</sup>。

一方面,无线通信传输速率迅速提高,仍然以WiFi为例,从1999年开始,流行起来的WiFi标准数据传输速率以每6年11倍的速度迅速提升,到2015年802.11ac正式颁布时,WiFi标准数据传输率将达到6.9 Gbps。另一方面,随着无线通信的普及,衍生出了大量相关的新应用,小至可穿戴设备、无线电子

医疗设备,大至空天一体军事化信息网络,多元化的无线应用对无线开发平台提出了新的需求。

目前,我国已经投入了大量科研力量对无线相关技术进行研究。但受限于当前的无线网络底层平台,研发人员往往不能对无线协议完成定制开发工作。传统无线算法的物理层和链路层(PHY、MAC层)基本都是在芯片中实现,其内部算法和协议固定,不具备可定制性,而且主流无线芯片均被若干家国外公司垄断。在某些特殊行业及特殊场景下,会对无线通信的特性提出一些特殊的需求。例如军事通信需要更高的安全性、隐蔽性;可穿戴计算中的无线传输需要有低功率、低反应延迟的特性;

收稿日期: 2014-04-09; 修回日期: 2014-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(61370056)

作者简介: 吴浩洋(1991-),男,博士生,主要从事无线通信、无线局域网系统结构的研究。

在某些工控场景下,又需要进行远距离传输或者在信道拥堵时紧急传递信息。当原有的协议不能够满足上述类似的特殊要求时,研发人员希望能够定制一个新的无线网络底层系统(包括PHY、MAC层等),并投入实际场景使用。因此,我国无线领域的研发者和特殊需求的使用者亟需一种高性能、可定制的无线网络底层软硬件平台。

针对上述需求,本文设计了GRT系统,该系统具备以下3个特征。1) 高性能。主要包括高吞吐率、低延迟两部分。2) 高可定制性。GRT系统提供了一种标准化、模块化的无线协议软硬件协同开发环境。3) 高兼容性与开放性。GRT系统可被定制为标准网络协议的软硬件平台,提供与商业无线设备的兼容性。

另外,GRT系统可以与现有网络协议无缝对接,易于与主计算机集成,实现网络跨层次优化。并能够给上层网络层提供开放接口,通过其可定制管控的特性,将软件定义网络(SDN)的管控能力延展到无线网络底层。

## 1 背景介绍

### 1.1 软件无线电(SDR)技术

文献[2]于1992年首次明确提出了软件无线电的概念。软件无线电的中心思想是构造一个具有开放性、标准化、模块化的通用软硬件平台。基于这一相对通用的软硬件平台,可以采用软件编程、调用等方式,自定义地实现特定的通信功能。随着研发者对可定制无线设备的需求越来越强,软件无线电技术也逐渐开始吸引无线领域研发者的注意。

### 1.2 802.11技术

IEEE 802.11是现今WiFi通用标准。从1997年的802.11到2015年的802.11ac,中间经历了802.11b、802.11a/g、802.11n几代变革,不到20年间的发展,WiFi的数据吞吐率由最初的2 Mbps发展到了2015年将成为标准的6.9 Gbps。802.11技术的发展也对无线底层平台的性能需求(吞吐率、延迟)提出了很大挑战。

### 1.3 目前已有的无线底层平台

当前的无线设备大部分都使用标准的无线芯片,这些芯片内部算法和协议是固定的,适合商业化的生产,但是无法被研发者所使用。无线芯片的物理层速率、频带宽度、中心频点以及PHY层和MAC层的实现算法都是固定的,而且功率往往受限。对于研发者来说,往往希望对协议进行修改,例如研发者希望修改802.11中MAC层的CSMA/CA算法,保证在限定时间内完成一次数据传输;或者

希望修改802.11中PHY层的频偏估计算法,使得WiFi协议能够适用于更加高速的移动环境。而这些工作很难在标准芯片中进行定制。

针对上述矛盾,国内外已经开始了相应的可定制无线网络底层系统的研究。也产生了多种不同的平台结构。

第一种方案是基于纯软件的无线开发平台,这种方案采用通用处理器CPU作为计算工具实现底层协议的算法。基于CPU的无线开发平台可以为用户提供非常好的编程性,却无法保证无线通信技术的两个重要特性——高吞吐率和低延迟。无线通信协议的物理层往往需要完成大量浮点运算,例如FFT、帧同步、信道估计与均衡等模块,因此采用CPU作为计算工具不可能胜任高吞吐率的需求;另一方面,采用软件实现无线开发平台时,受到操作系统的一些不可控因素(中断、抢先式调度等),软硬件的交互延迟难以控制在几十微秒的量级。

基于纯软件的无线开发平台的代表是GNU Radio<sup>[3]</sup>。GNU Radio提供了非常好用的图形用户接口。它不仅可编程性强、并且代码开源。但受限CPU的处理性能,GNU Radio只能提供最高2 Mbps左右的吞吐率,对802.11a/g的物理层协议处理延迟也高达几毫秒(802.11a/g的要求则是吞吐率达到54 Mbps、处理延迟为几十微秒)。因此,GNU Radio只能适用于无线通信算法的初步验证。

Sora<sup>[4]</sup>也是一种主要采用软件实现的无线开发平台,它采用高端的多核处理器作为无线底层的计算工具,用户在Windows操作系统上进行软件编程。为了解决软件吞吐率低、延迟大的问题,Sora将物理层的模块分放至不同的CPU核,并将时序性非常强的ACK模块用专用的FPGA硬件进行加速。Sora平台可以支持802.11a/g的54 Mbps吞吐率,其2\*2MIMO版本可达到117Mbps的吞吐率<sup>[5]</sup>。但Sora作为一个开发平台,仍有其局限性。首先,Sora受到Windows操作系统调度算法的限制,不能够完全保证WiFi中MAC层的时序。其次,采用Sora完成开发需要具备多核、并行的编程基础,在设计底层协议的时候,需要特地为算法进行优化,大大提高了研发者的开发难度。最后,Sora的开发环境是基于Windows的操作系统,与当前大部分的软件无线电平台都无法兼容。

第二种方案是基于FPGA硬件的开发平台。FPGA是一种特殊的可重构硬件,可以根据需要重构成所需的功能逻辑。它可以提供比软件高的多的吞

吐率,并保证非常好的实时性。但是,硬件设计难度比软件要大的多,导致平台的可编程性降低。尽管研发者能够自主地在FPGA上通过编写硬件代码做无线底层协议的开发,但他们必须分散大量的精力去考虑硬件是如何设计,大大降低了开发效率。

WARP<sup>[6]</sup>平台是一种典型的基于FPGA的无线开发平台。WARP通过以太网接口与PC机相连,它采用高性能的FPGA作为协议算法的实现平台,能够实现高吞吐率以及低延迟的要求。但是WARP更像是一个独立于计算机的设备,很难与主计算机中的上层网络协议栈无缝相连。另外,WARP也没有提供对FPGA中硬件编程的友好支持。

除此之外,还有一些其他结构的无线开发平台,例如DSP、GPU等。DSP和ASIC芯片一样,能够提供非常好的性能,但是内部算法和结构无法修改,无法达到灵活性的要求。而基于GPU的无线开发平台也有其局限性。GPU的数据并行计算结构并不适用于无线底层的计算模型,而且GPU本身无法和射频前端直接相连,这样就需要一种办法将GPU中的计算结果迅速地传递给射频前端,这将会导致非常大的延迟。

综上所述,当前的无线底层平台未能在高性能、高可定制性、高兼容性和开放性上均达到令人满意的指标。

#### 1.4 GRT系统

针对于其他无线网络底层平台的弊端,本文自主设计了GRT系统。GRT系统是一个具备高可定制性、高兼容性与开放性,同时又能达到无线协议所需的性能要求的无线网络底层软硬件平台。

GRT系统的前期相关工作已经在HEART 2014<sup>[7]</sup>和ICFPT 2014<sup>[8]</sup>两处国际会议中做过介绍。第一篇文章重点叙述GRT的体系结构设计;第二篇文章重点叙述802.11a/g协议在GRT平台上实现的应用。

本文将重点介绍GRT在高性能、高可定制性、高兼容性与开放性这三方面的相关技术,同时还展示评测了GRT系统的最新成果。

## 2 系统设计

### 2.1 设计目标

#### 1) 高性能

对于一个无线网络底层平台来说,高吞吐率和低延迟是两个非常重要的指标。随着无线网络协议的迅猛发展,未来的无线平台应当提供至少100 Mbps的数据吞吐率及微量量级的延迟。采用普通的CPU

作为计算平台是远远达不到要求的,即便是采用硬件作为计算工具,也需要对算法、底层结构进行精心设计,才可以满足系统在无线环境中真实全速率通信的要求。

#### 2) 高可定制性

作为无线领域的研发者,总是希望在最短的时间内在平台上完成自主定制的协议设计。这就要求系统给用户提供良好的用户接口,并保证良好的高可定制性,即研发者可以方便地修改、添加、移除相关的软硬件功能模块;也能方便地修改、调整底层软硬件平台的参数。

#### 3) 高兼容性与开放性

对于整个网络系统来说,仅有无线网络底层的研究是不够的。无线网络底层必须和上层协议的研究相结合。因此,研究的目的是能够将底层无线平台和上层网络协议栈无缝对接,使得研发者能够灵活自主地完成网络跨层次优化。这就要求GRT系统能够定制成标准的网络协议软硬件平台,并提供开放接口,易于上层网络获取信息及控制。

## 2.2 GRT系统设计

### 2.2.1 GRT系统整体结构

GRT系统如图1所示,主要由PC机、FPGA和USRP共3部分组成。

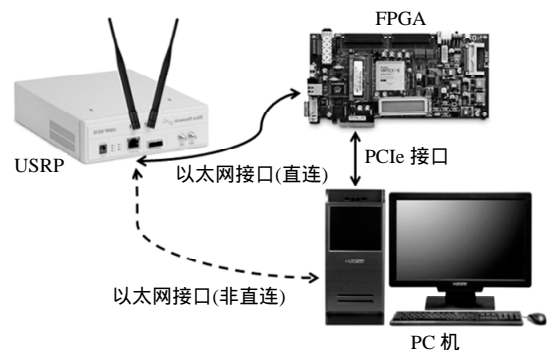


图1 GRT系统结构

PC机主要进行网络上层协议栈的相连以及完成一些控制与调度的工作。GRT系统在PC机中提供了一个TCP/IP标准网络驱动,用于协调MAC层与TCP/IP层之间的交互,在不考虑性能的情况下,PC机端也能基于软件完成所有的PHY层、MAC层算法。另外,在PC端,GRT系统提供了一个友好的图形化编程软件和测试软件,用户可以基于GRT系统快速自主开发新的网络协议或算法。

FPGA是GRT系统底层网络协议的主要计算平台,PHY层的基带处理算法和MAC层的调度算法均在FPGA中实现。FPGA与计算机之间采用PCIe接口

连接, GRT系统提供了一个高速的PCIe接口驱动, 使得计算机和FPGA之间能够高速、低延迟的传输数据, 在全双工模式下, 可提供高达43.02 Gbps的传输速率<sup>[9]</sup>。

USRP是一个通用软件无线电外设, 它完成了上下变频和射频信号的收发等工作。当USRP作为发送设备时, 它从以太网口获得基带采样信号, 最终形成射频信号发送出去; 当USRP作为接收设备, 它从空口获得射频信号, 转换成基带采样信号后, 从以太网口传递出来。在GRT系统中, 提供两种不同的USRP连接方式, 包括以太网直连方式与非直连方式。使用直连方式时, USRP和FPGA直接连接; 使用非直连方式时, USRP与PC机连接。在非直连的情况下, FPGA和USRP之间的交互需要经过PC机的协调才能完成。

### 2.2.2 GRT系统的高性能设计

GRT系统的高性能体现在高吞吐率和低延迟两个方面。为了达到高性能这一设计目标, 系统采用了多时钟域流水线结构和USRP与FPGA直连的设计方案。

1) 多时钟域流水线结构。在GRT系统的FPGA中, PHY层采用模块化设计方案, 模块之间采用异步FIFO进行连接, 模块与模块之间采用流水线结构。由于PHY层不同的模块的数据吞吐率是不同的, 因此采用了多时钟域技术, 解决不同模块之间的速率匹配问题。这样可以保证GRT系统不被吞吐率最低的模块的速率所限制, 达到高吞吐率的特征。

2) USRP与FPGA直连。如图1所示, GRT系统提供了两种不同的USRP连接方式, 与FPGA直连或者非直连。采用非直连的方式时, 每当基带采样信号需要在USRP和FPGA之间传递时, 都需要通过计算机完成数据的传递。整个传递过程需要完成FPGA与PC机之间的数据传递、PC机与USRP之间的数据传递两个步骤。若采用直连方式, FPGA直接通过以太网接口与USRP相连, 基带采样信号直接在FPGA于USRP之间传递, 不再经过PC机。这样的设计大大减少了数据绕路所造成的延时。

在802.11a/g协议中, ACK帧需要在数据帧发完后的16 us(SIFS时间)被发出。根据测试, 采用非直连的方式时, ACK的响应时间约为600~800 us; 而采用直连的方式时, 此时间会缩短到几十微秒。

### 2.2.3 GRT系统的高可定制性设计

为了达到自主可定制这一设计目标, 系统采用了以下设计方案。

1) 软硬件协同设计。GRT的每一个模块既可以在硬件中实现, 也可以在软件中实现。软硬件之间采用高速PCIe总线进行通信, 且软硬模块可以随时切换。

如图2所示, PHY层的发送端前3个模块分别是扰码、FEC编码和交织。在GRT系统中, 所有模块可以全部采用软件进行开发、也可以全部采用硬件进行开发, 分别对应上半部分、下半部分的流水线结构。除此之外, GRT系统还提供软硬件交错开发的模式, 所有模块都可以自由地在软硬件之间进行切换。例如扰码和交织模块选用软件模块、而FEC编码选用硬件模块。

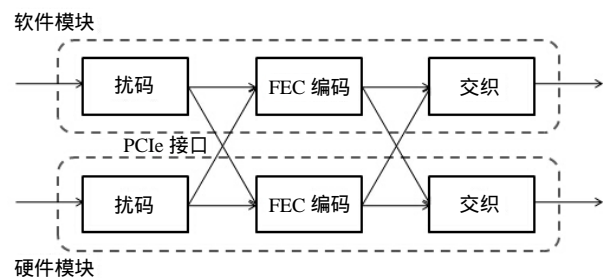


图2 软硬件协同开发结构

这样的设计为开发者提供了一套非常灵活的结构, 即开发者需要对协议进行修改时, 可以任意选择在软件或者硬件中做开发, 并支持开发者从快速的纯软件开发开始, 逐步修改相应模块转为高性能的硬件流水线。

对于FPGA硬件编程, GRT还支持采用C/C++编写硬件模块(C-to-RTL, 例如AutoESL或者Vivado HLS<sup>[10]</sup>)。

2) 软件设计框架。对于FPGA中的PHY层的模块, GRT提供一套开发环境, 能够自动地生成硬件的互连部分并将硬件模块组成流水线。这样, 用户在设计PHY层模块的时候, 就不必关注到硬件具体的设计的细节当中, 能够将精力集中在模块算法的设计当中。这样的设计既保证了高吞吐率的特性, 又保证了良好的可编程性。

### 2.2.4 GRT系统的高兼容性与开放性设计

GRT提供了一个标准的Linux网络设备驱动, 能够和主计算机中的TCP/IP层进行交互。加载驱动后, GRT系统能够作为一个可定制无线网卡使用。当定制为标准无线网卡时, 能够和商业WiFi设备进行交互。

GRT系统还提供开放的字符型设备驱动, 提供信息和控制接口, 使进一步对无线网络底层进行管控成为了可能(例如与软件定义网络SDN进行对接)。

### 3 系统评测

#### 3.1 评测环境

GRT的测试环境如图3所示, 包括普通的PC机、FPGA开发板和USRP。PC机上安装有Linux 12.04版本的操作系统, FPGA开发板的型号为Xilinx ML605, USRP的 motherboard 型号为USRP N210<sup>[11]</sup>, 射频子板型号为XCVR 2450。

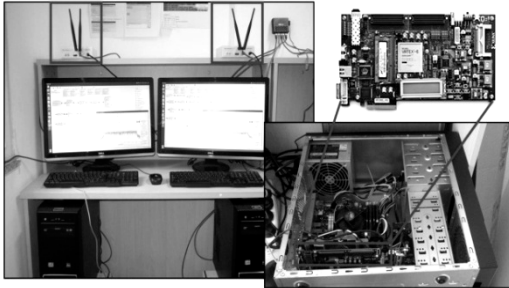


图3 GRT系统测试环境

FPGA开发板直接插在计算机主机的PCIe插槽中, USRP和FPGA之间采用以千兆网线直接相连。这样, 每一台PC机就对应了一个无线系统的终端。

#### 3.2 GRT对802.11a/g的支持

作为应用示例, 在GRT系统上“定制”了标准的802.11a/g无线协议。

##### 3.2.1 理论速率测试

表1、表2给出了基于GRT系统的802.11a/g的硬件PHY层理论性能测试。由于PHY层采用模块化流水线结构设计, 整个PHY层性能限制于模块中吞吐量最慢的模块。因此, PHY层流水线在这个设计中最高可能达到的吞吐率为125 Mbps(802.11a/g标准中的最高吞吐率为54 Mbps)。

表1 PHY层发送端主要模块性能评测

模块名称	最高时钟频率 /MHz	最高吞吐量 /Mbps	资源使用率 /%
加CRC校验	300	2 400	0.47
扰码	185	11 840	0.81
卷积编码	300	7 200	0.07
交织	300	5 400	0.75
星座映射	300	2 700	0.30
IFFT	300	1 012	2.00
插循环前缀	250	1 350	0.02

表2 PHY层接收端主要模块性能评测

模块名称	最高时钟频率 /MHz	最高吞吐量 /Mbps	资源使用率 /%
FFT	300	1 012	2.00
信道估计	60	498	7.64
相位跟踪	60	498	1.44
星座解映射	200	2 700	0.90
解交织	300	5 400	0.77
Viterbi译码	125	125	6.59
解扰码	210	13 440	1.81
做CRC校验	300	2 400	0.50

##### 3.2.2 单向传输速率测试

实验采用两台基于802.11a/g协议的GRT系统, 一台作为发送端, 一台作为接收端。无线收发采用标准802.11a/g MAC层协议的DCF(分布式协调功能)机制。

测试环境为室内, 频段为WiFi支持的标准频段信道10(即中心频率为2.457 GHz)。测试采用64-QAM的调制方式、3/4的卷积编码率, 数据帧的长度为4 095 byte。本文在不同的带宽下, 测试GRT系统的单向传输速率。

图4是在12.5 MHz的带宽情况下, 单向传输的速率统计情况。实验中设置传输总时间为15 s, 每秒统计一次平均速率。图4主要展现了传输平均速率随时间变化的结果。

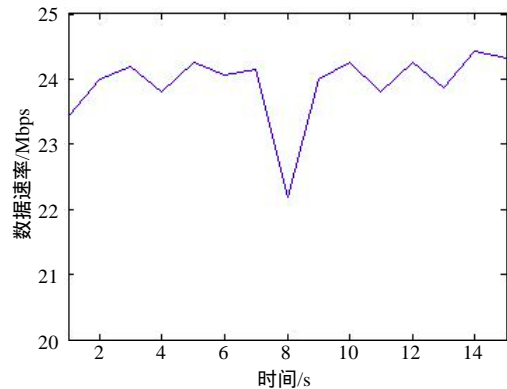


图4 12.5 M带宽时GRT系统单向速率测试

表3表示在不同带宽时, 单向传输速率的测试结果。测试结果包括平均速率以及最大瞬时速率。

表3 不同带宽时单向传输速率测试

带宽/MHz	平均速率/Mbps	最大瞬时速率/Mbps
0.5	1.02	1.19
1	2.03	2.31
3.125	6.74	7.44
6.25	13.17	15.55
12.5	24.66	28.05
20	11.64	42.77

由于采用的射频前端USRP N210母板对20 MHz的频宽支持不好, 导致其平均速率受限。最高的平均速率在12.5 MHz的频宽处。

##### 3.2.3 GRT系统与商业WiFi设备的交互

实验遵循802.11a/g协议, 采用20 MHz的带宽, 将GRT系统配置为AP模式。实验中, 将AP的SSID设置为“GRT\_AP”, 之后手机可以通过WiFi搜索到该SSID, 成功连接上“GRT\_AP”并通过浏览器访问网络。



图5的左半部分显示了手机连上GRT\_AP的信息，GRT\_AP为手机分配了IP地址。图5的右半部分显示手机通过GRT\_AP访问视频网站，流畅地观看网络视频。



图5 手机通过GRT\_AP上网

### 3.3 MIMO测试

GRT平台已经在软件端实现了 $2 \times 2$  MIMO，根据实验，接收端可以成功解调发送端通过无线信道发出的数据。GRT的MIMO系统实际测试环境如图6所示。

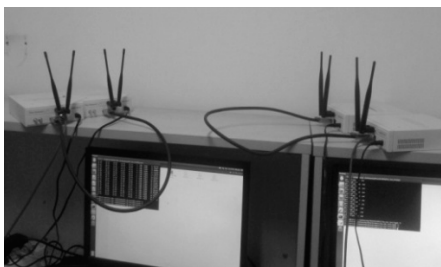


图6 基于GRT的MIMO系统

图7是某次MIMO接收端信道估计得到的4组信道参数(H11、H21、H12、H22)的模值。

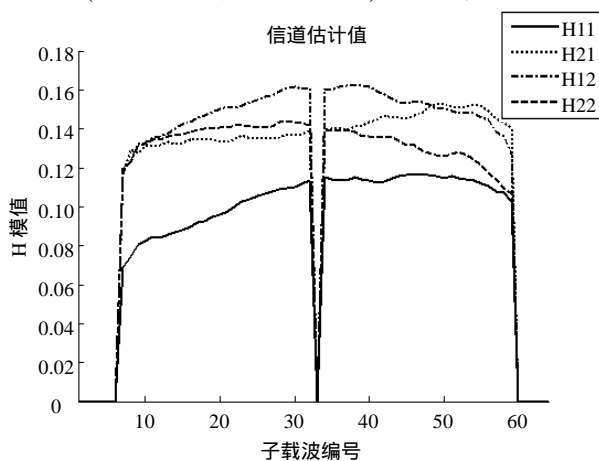


图7  $2 \times 2$  MIMO信道估计参数

## 4 总结与展望

GRT系统是一个无线网络底层软硬件开放平

台，为定制无线的研发者和特殊需求的使用者提供了高性能、可定制的无线网络底层环境。目前正在GRT系统上实现了一套完全自主编写的基于802.11a/g协议的硬件代码，性能超过了协议的要求，且能够与商用WiFi设备进行互通。GRT系统对802.11n协议的支持正处于开发过程中。

未来的GRT系统将会继续发展。实现更高的速率、更好的编程性，并为用户提供更加丰富、开放的定制功能。

### 参考文献

- [1] ABI Research. Wi-Fi Chipset Shipments will near 18 Billion Chipsets during the Next Five Years[EB/OL]. [2014-05-05]. <https://www.abiresearch.com/press-wi-fi-chipset-shipments-will-near-18-billion-chips>.
- [2] MITOLA J I. Software radios-survey, critical evaluation and future directions[C]//Aroa and Lron Ym Magazn. [S.I.]: IEEE, 1992.
- [3] GNU Radio. GNU Radio[EB/OL]. [2014-01-07]. <http://gnuradio.org>.
- [4] TAN Kun, LIU He, ZHANG Jian-song, et al. Sora: High-performance software radio using general-purpose multicore processors[J]. Communications of the ACM, 2011, 54(1): 99-107.
- [5] FANG Ji, TAN Zhen-hui, TAN Kun. Soft MIMO: a software radio implementation of 802.11n based on Sora platform[C]//Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 4th IET International Conference. Beijing: IET, 2011.
- [6] Mango Communications. Warp v3 Kit[EB/OL]. [2014-01-01]. <http://mangocomm.com/products/kits/warp-v3-kit>.
- [7] WANG Tao, SUN Guang-yu, CHEN Jia-hua, et al. GRT: A reconfigurable SDR platform with high performance and usability to be published in ACM SIGARCH computer architecture news[J]. ACM SIGARCH Computer Architecture News, 2014, 42(4): 52-56.
- [8] CHEN Jia-hua, WANG Tao, WU Hao-yang, et al. A high-performance and high-programmability reconfigurable wireless development platform(demo paper)[C]// International Conference on Field-Programmable Technology(ICFPT). Shanghai: IEEE, 2014.
- [9] GONG Jian, WANG Tao, CHEN Jia-hua, et al. An efficient and flexible host-FPGA PCIe communication library[C]// Field Programmable Logic and Applications (FPL). [S.I.]: IEEE, 2014: 1-6.
- [10] XILINX. Xilinx High-Level Synthesis (HLS)[EB/OL]. [2014-02-21]. [http://www.xilinx.com/tools/autoes\\_instructions.htm](http://www.xilinx.com/tools/autoes_instructions.htm).
- [11] Ettus Research. USRP N210[EB/OL]. [2014-01-01]. <https://www.ettus.com/product/details/UN210-KIT>.

编辑 蒋晓