

一种低成本多用途的802.11 MAC测试平台

张凌飞^{1,2}, 王 军³, 杨永存³, 刘 晨³

(1.青海民族大学物理与电子信息工程学院, 青海 西宁 810007;

2.青海师范大学计算机学院, 青海 西宁 810008;

3.西安电子科技大学电路CAD所, 陕西 西安 710071)

摘 要: 无线局域网是一种主流的网络接入技术, 研究人员借助计算机仿真技术提出了许多优化方案来提高网络服务质量, 如何对提出的优化方案进行测试和验证是一个急需解决的难题。本文设计并实现了低成本、多用途的MAC测试平台, 该平台以Marvell 88F6281和支持softMAC的无线网卡为关键硬件组件, 由OpenWrt、MAC协议栈和网卡驱动程序组成软件平台, 并通过移植mac80211和ath9k至该平台实现了AP和STA功能。由于该平台外围接口丰富, 可完成目前市面多种接口无线网卡的验证测试工作。

关键词: WLAN测试平台; OpenWrt; MAC协议栈; ath9k; softMAC

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

A Low-Cost and Multi-Purpose 802.11 MAC Testbed

ZHANG Lingfei^{1,2}, WANG Jun³, YANG Yongcun³, LIU Chen³

(1.College of Physics and Electronic Information Engineering, Qinghai Nationalities University, Xining 810007, China;

2.School of Computer, Qinghai Normal University, Xining 810008, China;

3.Institute of Electronic CAD, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Wireless Local Area Network (WLAN) is a kind of popular network access technology. In order to improve the quality of services (QoS), researchers have proposed many optimized schemes with computer simulation technology. How to test and verify the proposed scheme is an urgent issue to be solved. In this paper, a low-cost and multi-purpose MAC Testbed is designed and implemented. The pivotal hardware module of this testbed is composed of Marvell 88F6281 and the softMAC wireless network card. The software testbed is consisted of MAC stack, the wireless network card driver and OpenWrt, thus AP and STA functions are implemented by transplanting the mac80211 and ath9k to the testing platform. Due to the rich peripheral interfaces of this testbed, it can complete the corresponding verification and testing of various interface wireless network cards in the present market.

Keywords: WLAN testing platform; OpenWrt; MAC Stack; ath9k; softMAC

1 引言(Introduction)

智能家居、物联网等众多设备通过Wi-Fi技术接入网络, 给无线通信技术和无线通信协议性能提出更高的要求。国内外研究学者已针对问题的关键提出各种改进方案, 通过计算机仿真技术分析得出优化方向和结论^[1]。因计算机仿真环境和工程应用场景具有一定差距, 仿真技术验证的优化方案需经过实际应用环境测试验证后才具有投入工程应用的价值。

国内外各研究机构已经提出多种测试平台方案。WARP(Wireless Open Access Research Platform for

Network)是一款基于FPGA的WLAN开发平台, 可完成WLAN底层协议(PHY层和MAC层)所有研究工作^[2], 但构建测试网络费用昂贵。搭载OpenWrt和mac80211协议栈的测试平台, 采用开源协议栈mac80211, 802.11bgn无线网卡进行定制设计, 但研究其他协议则需重新设计测试平台^[3,4]。CalRadio1搭载ARM和DSP处理器, 成本相对较低, 但采用的802.11b基带相对于目前协议研究进展较为落后^[5]。USRP, FPGA板和主机组成的软硬件平台, 基于802.11a/g协议软硬件代码, MAC协议栈研发人员使用时需掌握各硬件和协

议栈架构^[6,7]。

针对文献中测试平台的不足,设计了一种802.11 MAC测试平台,可以实现:(1)多用途。通过PCIe或USB接口与网卡进行连接,可根据主流协议更换相应无线网卡而不必重新设计。(2)高兼容性。采用嵌入式Linux系统OpenWrt,以mac80211为MAC协议栈进行改进优化,与网络协议无缝对接。(3)低成本。采用ARM架构88F6281处理器设计硬件平台底板,商业无线网卡处理硬件层数据,相对FPGA开发平台成本低廉,适合多节点组网。

2 总体方案设计(Overall program design)

以88F6281处理器为核心硬件作为本文提出的测试平台硬件解决方案,软件方案由操作系统、软件协议栈和网卡驱动程序构成。

图1为测试平台总体硬件框图。硬件部分设计MINI PCIe插槽和USB接口等用于与无线网卡相连,内存容量512MB,采用128MB NAND Flash用于存储软件,千兆以太网接口用于与有线以太网相连,UART接口用于调试,GPIO接口预留备用。88F6281是Marvell公司推出的兼容ARMv5TE架构的高性能、高集成度处理器,搭载工作主频最高可达1.2GHz的Sheeva 88SV131 CPU,D-cache和I-cache均为16kB,二级缓存达到256kB。该处理器集成了丰富的外设,如数据速率高达800MHz的双通道DDR2 SDRAM控制器、PCI Express x1接口、两路千兆以太网MAC、两路SATA 2.0接口、USB2.0控制器、安全引擎、4通道XOR/DMA、NAND Flash控制器、SDIO、TS/Video、UART/SPI/TWSSI/I2S和GPIO等接口^[8]。支持SPI、UART、NAND、PCIe等接口启动。88F6281具备的强劲性能和丰富外设被广泛用于路由、网关、媒体服务器、存储、网络和打印服务器等领域。该处理器的PCIe接口、USB接口和千兆以太网MAC等高性能外设更加利于本测试平台的功能实现,且在多领域都有其成功应用的方案可供参考。

软件平台采用开源操作系统OpenWrt,协议栈通过C语言根据需求实现或基于Linux内核无线网路子系统进行改进优化,采用相应的程序驱动网卡。在计算机搭建协议栈开发环境,将开发的协议栈程序传送至测试平台进行测试和验证。

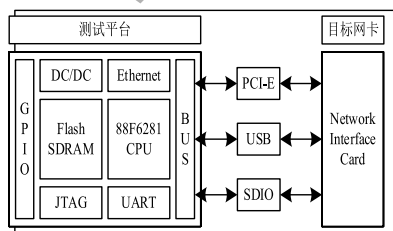


图1 MAC测试平台总体硬件框图

Fig.1 Overall hardware block diagram of MAC Testbed

3 硬件模块设计与实现(Hardware module design and implementation)

本测试平台硬件采用的88F6281处理器主频高达

1.2GHz,且集成丰富的外设。考虑到测试平台功能的完备性,对外设外围电路进行设计实现,且设计采用较多的高速信号电路,因此需要考虑各功能模块布局布线和高频信号的处理及信号完整性问题。图2为各功能电路模块布局示意图。

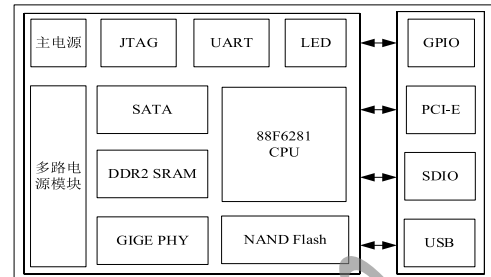


图2 各功能电路模块布局示意图

Fig.2 Layout diagram of each functional circuit module

由系统高性能要求,本平台不仅需要采用一款高性能CPU,还需要高性能的存储器和相应的外设进行配套设计。本测试平台采用时钟速率为400MHz、数据速率为800MHz的DDR2内存作为主存储器,容量为512*8Mbit。目前主流的内存设计方案有两种,一种是设计内存颗粒电路,并直接焊接在目标主板上。采用这种设计方式的优点是灵活方便,内存容量可选,可以根据系统需要进行相应的定制,并且节省主板面积,降低相应的成本;缺点是设计过程稍有不慎就会造成电路设计失败进而影响电路功能的实现。第二种采用DIMM条插在主板上,采用这种设计方式方便简洁,电路简单,失败风险较小,但是无法根据特定的目标系统进行相应的定制,而且因为采用标准的内存条插槽面积较大,浪费大量的主板面积,提高了相应的成本。由于该测试平台要求和88F6281集成的内存控制器仅支持第一种设计方式,故本测试平台采用第一种方式实现^[9]。

高效稳定的电源是硬件系统稳定运行的基础。本测试平台根据外设电路和系统电路要求需提供七路不同电压进行供电,分别为12V、5V、3.3V、1.8V、1.5V、1.1V、1.0V。其中12V为SATA设备供电,5V为USB供电,CPU需要3.3V、1.8V、1.5V、1.1V和1.0V,其中1.5V是为RTC供电,其他4路由DC-DC变换器供电,且这4路电源之间具有启动时序要求。根据以上性能需求,本测试平台采用Alpha&Omega公司的降压型DC-DC变换器AOZ1094设计供电电路。通过上一级电源输出作为下一级电源的使能端达到处理器对电源时序的要求。

根据规划的电路架构及相关芯片特性要求,参考高速信号元器件布局要求,对信号质量要求高的元件进行合理化布局和布线^[10],SRAM、SATA和GIGE PHY都属于高速信号走线,因此在设计走线位置和长度时需要给予高度关注,这些信号线的成功与否直接关系到该系统的可靠性。该系统外设资源和外部电路多且复杂,使用了多路开关电源,因此需要根据布局需要对电源进行电源层分割和布线。采用4层PCB走线结构,电源层单独采用一层走线,信号走线主要分布在

另外三层,在信号线之外区域进行覆铜。88F6281处理器采用FBGA封装,在FBGA焊盘下的走线需特别注意,以防对处理器和信号线的干扰。

4 软件模块设计与实现(Software module design and implementation)

4.1 软件平台系统设计

平台软件系统结构如图3所示。采用OpenWrt操作系统,mac80211协议栈,在内核空间实现STA功能,应用程序采用hostapd,在用户空间完成AP功能。

嵌入式Linux发行版OpenWrt具有高度模块化、高度自动化的特点,拥有强大的网络组件和扩展性,被应用于工控设备、智能家居、路由器等设备中。OpenWrt提供的SDK加速了程序的开发。

协议栈软件mac80211是Linux内核无线网络子系统一个重要组成部分,是驱动开发人员开发无线设备驱动的框架。

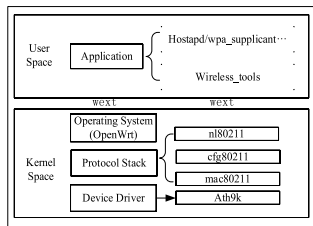


图3 系统软件结构图

Fig.3 The system software structure diagram

4.2 协议栈实现

4.2.1 ath9k驱动

早期网络设备中负责处理MAC层协议和其他底层协议的功能代码被编译生成固件,并以二进制形式提供给用户,运行在网络设备中。这种实现方式使研发人员无法接触源码,不能基于原有的功能进行提升和改进。随着技术的发展,网络设备中MAC功能通过软件实现(softMAC),并以内核模块的形式加载至Linux内核中。通过这种方式实现的协议栈给研发人员接触协议栈源码的机会,可以基于现有的源码进行改进和优化,实现目标功能。Atheros公司的WLAN设备网卡驱动以前是一个独立的项目,现在合并入Linux内核中,成为内核中的一部分。

4.2.2 数据发送

数据的发送过程如图4所示。

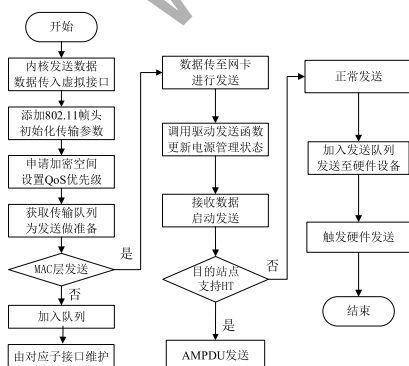


图4 数据发送流程图

Fig.4 The flow chart of data sending

4.2.3 数据接收

数据的接收由网卡完成,具体过程如图5所示。

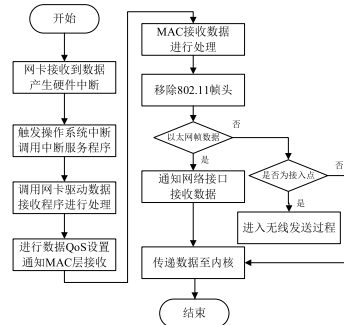


图5 数据接收流程图

Fig.5 The flow chart of data receiving

5 系统测试(System testing)

5.1 开发环境

本测试平台采用交叉编译环境进行开发和测试,将安装有Linux操作系统的PC,测试平台硬件,串口线和网线按照图6进行连接。

U-boot和OpenWrt移植工具步骤如下:

(1)在OpenWrt社区网站下载系统源码^[11],然后进行相应的更新。

(2)添加本测试平台U-boot源码。本测试平台处理器和Marvell公司SheevaPlug相同,将SheevaPlug源码作为模板进行修改,系统源码中添加MAC_Testbed平台。

(3)通过make menuconfig指令进行系统配置,architecture选择Kirkwood, board选择MAC_Testbed,选择必要的系统模块,如文件系统和Luci等。



图6 测试环境示意图

Fig.6 Diagram of testing environment

(4)选择无线网络驱动模块。在内核中将mac80211和网卡驱动以模块的方式进行编译,生成驱动模块。

(5)退出make menuconfig并保存配置,通过make指令进行编译,生成U-boot、内核镜像和文件系统文件。

(6)测试平台上电,通过串口启动,将U-boot写入NAND Flash。

(7)通过minicom连接串口,测试平台上电,进入U-boot,通过指令完成内核和文件系统的下载。

(8)测试平台上电复位,在OpenWrt系统中创建文件共享服务,在PC中添加OpenWrt共享目录,将编译后的协议栈软件拷贝至共享目录。进入OpenWrt系统中进行协议栈软件运行测试。

5.2 测试条件及结果

通过本测试平台搭建接入点MAC_testbed,采用多类型STA接入MAC_testbed进行数据传输实测试。接入点硬件

系统配置为测试平台和Atheros公司的AR9287无线网卡，软件采用mac80211协议栈和ath9k驱动程序，在用户空间采用hostapd完成用户接入管理。采用7种STA站点同时接入MAC_testbed，分别为测试平台分别与AR9287和RT5572(USB接口)网卡搭建的STA站点、Intel AC3165(笔记本电脑)、iPhone手机、ZTE手机、Intel 5100AGN(笔记本电脑)和华为手机。各STA与AP连接速率如图7所示。

从图7中可以得出，在同一环境中不同无线网卡所连接的速率不同。导致连接速率不同的原因可能有两方面。(1)协议算法不同。不同厂商设计的网卡底层通信算法和MAC层接入速率选择算法不同会导致以上结果。(2)设备应用场景。MAC_testbed发送速率大致相同，但是MAC_testbed接收速率相差较大，其中手机设备的接收速率较低与其为便携式设备低功耗需求有关。

已连接站点

MAC地址	设备	信号	噪声	接收速率	发送速率
A8:54:B2:73:C5:DA	AR9287	-40 dBm	-95 dBm	72.2 Mbit/s, MCS 7, 20MHz	72.2 Mbit/s, MCS 7, 20MHz
98:54:1B:E9:CA:E1	AC3165	-59 dBm	-95 dBm	72.2 Mbit/s, MCS 7, 20MHz	65.0 Mbit/s, MCS 6, 20MHz
70:EC:E4:50:81:CF	iPhone	-66 dBm	-95 dBm	24.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz	57.8 Mbit/s, MCS 5, 20MHz
6C:8B:2F:D8:9C:C7	ZTE	-47 dBm	-95 dBm	1.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz	57.8 Mbit/s, MCS 5, 20MHz
00:1E:65:AA:53:FA	Intel 5100 AGN	-25 dBm	-95 dBm	72.2 Mbit/s, MCS 7, 20MHz	65.0 Mbit/s, MCS 6, 20MHz
00:0A:F5:8E:30:20	Honor	-41 dBm	-95 dBm	6.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz	65.0 Mbit/s, MCS 6, 20MHz
00:0B:8B:20:33:4A	RT5572	-39 dBm	-95 dBm	130.0 Mbit/s, MCS 15, 20MHz	57.8 Mbit/s, MCS 11, 20MHz

图7 STA连接速率

Fig.7 STA connection rate

图8为电脑(Intel 5100AGN网卡)和华为手机连接至MAC_testbed上网截图。手机访问视频网站，电脑浏览网页均未出现卡顿现象。



图8 智能手机和电脑通过MAC testbed上网

Fig.8 Accessing Internet via MAC testbed on the smartphone and PC

6 结论(Conclusion)

本文提出的MAC测试平台，为广大MAC层协议栈研究人员提供了一种低成本多功能的方案选择。该测试平台已完成OpenWrt和mac80211移植工作，采用测试平台和AR9287无线网卡搭建AP，采用测试平台、笔记本和手机为STA接入AP进行数据传输测试，测试结果表明AP可同时完成多个STA站点连接管理，STA可以通过AP接入互联网。采用PCIe和USB接口可更换不同版本无线网卡完成协议栈的研发和测试工作。目前该测试平台通过移植mac80211实现相应的基本功能，接下来将会以mac80211为基础实现协议栈的优化工作。

参考文献(References)

[1] Yujun Cheng, Dong Yang, Huachun Zhou, et al. Adopting

IEEE 802.11 MAC for industrial delay-sensitive wireless control and monitoring applications: A survey[J]. Computer Networks, 2019, 157: 41–67.

[2] N.T. Huynh, V. Robu, D. Flynn, et al. Design and demonstration of a wireless sensor network platform for substation asset management[J]. CIRED—Open Access Proceedings Journal, 2017(1): 105–108.

[3] Y. Zhang, C. Jiang, Z. Han, et al. Interference-Aware Coordinated Power Allocation in Autonomous Wi-Fi Environment[J]. IEEE Access, 2016(4): 3489–3500.

[4] DUTT S, HABIBI D, AHMAD I. A Low Cost Atheros System-on-Chip and OpenWrt Based Testbed for 802.11 WLAN Research: TENCON 2012 IEEE Region 10 Conference, 2012[C]. Cebu: IEEE, 2012: 1–4.

[5] R. Manfrin, A. Zanella, M. Zorzi. Functional and Performance Analysis of CalRadio 1 Platform[C]. Eighth IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, IEEE, 2009: 300–305.

[6] 吴浩洋, 王楠, 陈佳华, 等. GRT: 高性能可定制无线网络底层软硬件开放平台[J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(01): 123–128.

[7] CHEN Jia-hua, WANG Tao, WU Hao-yang, et al. A High-performance and High-programmability Reconfigurable Wireless Development Platform: International Conference on Field-Programmable Technology (FPT)[C]. IEEE, 2015: 350–353.

[8] Marvell International Ltd.. 88F6180/88F619x/88F6281 Functional Specifications[EB/OL]. http://www.marvell.com.cn/embedded-processors/kirkwood/assets/FS_88F6180_9x_6281_OpenSource.pdf, 2017–12–10.

[9] 张超, 余综. 基于DDR3系统互联的信号完整性设计[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(02): 616–622.

[10] 畅艺峰, 杨银堂, 柴常春. 多芯片组件高速电路布局布线设计及信号传输特性仿真[J]. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(01): 44–47.

[11] OpenWrt Wireless Freedom[EB/OL]. https://downloads.openwrt.org/chaos_calmer/15.05.1/kirkwood/generic, 2017–12–10.

作者简介:

张凌飞(1981–), 女, 博士生, 副教授. 研究领域: 无线电与智能系统, 无线传感网络.

王 军(1992–), 男, 硕士生. 研究领域: 电子与通讯工程, 无线网络wifi协议研究.

杨永存(1994–), 男, 硕士生. 研究领域: 嵌入式ARM相关研究及音频信号处理.

刘 晨(1977–), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 无线移动通信系统, 认知无线电.