

# DSP的通信协议栈的研究与实现

伍瑞卿, 顾庆水, 陈 伟

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**提出了一种基于TMS320C6415的嵌入式通信协议栈的实现方法。协议栈以TCP/IP/PPP为主, 底层设计物理层协议, 通过McBSP与信道调制解调的DSP进行数据帧收发, 实现多DSP互连传输数据和物理信道状态通告; 上层增加会话层, 数据通过PCI总线接口与主机应用层协议进行通信, 在DSP内部采用 $\mu$ C/OS-II完成多任务的调度管理。在Windows 2000上用Driver Studio设计实现cPCI的WDM驱动。实验结果表明, 该协议栈具有结构紧凑、层次分明、传输速率高、回路延迟小的特点, 符合设计要求。以之为基础开发的协议栈软件实现了远程测量通信。

**关键词** 设备驱动; 数字信号处理器; 调制解调; 网络协议; 遥测

中图分类号 TN915.02

文献标识码 A

doi.10.3969/j.issn.1001-0548.2009.03.008

## Research and Implementation of Communication Protocol Stack in DSP

WU Rui-qing, GU Qing-shui, and CHEN Wei

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** A new full network communication embedded protocol stack is presented and implemented on digital signal processors (DSP) TMS320C6415. The stack includes application, session layer, transmission control protocol/internet protocol (TCP/IP), point-to-point protocol (PPP), and net interface layer. The lower layer defines a physical frame to receive and transmit data and channel state indication by multichannel buffered serial port (McBSP) between the digital signal processors for channel modems. The  $\mu$ C/OS-II, a real time operating system (RTOS), is involved for management of multi-tasks. The compact peripheral component interconnect (cPCI) bus is high-speed path between application and session layer for data exchange. The device driver of cPCI is designed in Driver Studio on Windows 2000. The experiment result shows that the protocol stack with a refinement architecture and perspicuous hierarchy can works well on high transmission rate and low loop-back delay time. The full protocol has been used in a wide-band communication system for telemetering.

**Key words** device driver; digital signal processors; modems; network protocols; telemetering

远程测量通信系统广泛应用在地质勘探、石油开采等环境复杂恶劣的工业控制现场。这些现场具有难以近距离实施测量, 传输距离长达上千米甚至几千米, 通信链路环境的温度多为非常温、电磁特性复杂等特点, 同时要求测量的范围广、指标较多, 实时性和传输带宽高<sup>[1]</sup>。而测量系统正朝着仪器网络互联、高度集成化方向发展<sup>[2]</sup>。因此, 在远程测量通信中, 除了需解决抗衰减和干扰, 高速宽带传输以外, 还需要采用良好的通信协议和方便的用户控制接口。远程测量通信网络, 具有较长的通信距离并两端构成“哑铃形”的拓扑结构, 采用特殊的通信缆线, 远程终端是工作在非常温下的带多种网络接口的嵌入式设备。而现有的测量系统存在着工

作近距离小范围或者传输率低等问题, 如采用MIL-STD-1553A/B总线、Ethernet总线控制模式, 都不能很好地解决这些问题<sup>[3-4]</sup>。

### 1 协议方案设计

本文提出了一种可适用于宽带遥测通信系统, 支持多协议网络通信和以工控机为控制平台的协议栈协同设计和实现的方法。该协议栈应用于如图1所示的无中继电缆测井的遥测通信系统, 系统包括远程终端和控制中心端。系统采用非对称链路传输方法, 利用宽带上行链路传输仪器采集的大量数据, 采用窄带下行链路向仪器发送控制命令。本文提出的协议栈主要工作在控制中心端的主控板内, 其主

收稿日期: 2008-02-02; 修回日期: 2008-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(60496313)

作者简介: 伍瑞卿(1977-), 男, 博士生, 讲师, 主要从事网络通信、嵌入式系统设计和数字视频处理及模式识别方面的研究。

要功能包括:(1)接收控制中心端的解调器输出数据,解封后通过cPCI接口送给工控主机。(2)从工控主机获取数据,进行数据协议封装,发送给控制中心调制器。远程测量终端可以挂接多种接口的测量仪器,均能经过辅控板和网络与工控主机通信。辅控板内协议栈除增加数据报重映射的路由转发外,基本与主控板的协议类似,在此不再赘述。

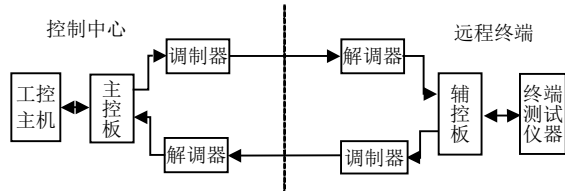


图1 远程测量系统

基于前述的应用目标,硬件以高性能TMS320C6415为主要的微处理器,软件系统采用实时操作系统(RTOS)、TCP/IP/PPP协议栈为基本结构,实现数据传输和对多设备的控制。RTOS采用 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 用于任务管理和调度。 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 支持存储资源稀少、结构紧凑、适合实时性要求高的多任务系统;具有良好的移植性,主要用C语言实现,提供便利的函数接口,可移植到很多处理器上,如x86、ARM、PowerPC等CPU;能够实时处理I/O任务,完成数据传输和设备控制。采用RTOS使得设计协议栈时可避免用复杂的状态机来支持多任务处理,从而减小复杂度和提高可维护性,有利于系统升级和扩展。

采用IP协议便于多种设备互联,实现设备输出数据以All Over IP方式有效封装和寻址。传输层采用TCP而非UDP,可增加传输的可靠性。虽然网络传输距离长,但网络设备少且未采用复杂的路由转发,TCP连接和断开并不频繁,TCP开销总体小。支持TCP/IP网络协议栈中,LwIP具有较好特性<sup>[5]</sup>:(1)结构轻巧紧凑,适用于嵌入式系统应用,包含了内存管理、接口模拟层及应用程序编程接口。(2)支持标准网络协议和自定义协议,如TCP/IP、ARP、FTP等主流的标准协议。(3)支持多平台。广泛应用于嵌入式系统,支持多种底层网络接口。(4)良好的API接口。为应用程序提供了可兼容Socket和回调函数的两种API接口,具有较高运行效率。

基本的PPP协议包含链路配置协议(LCP)、认证协议(PAP/CHAP)、网络控制协议(NCP)3个子协议<sup>[6]</sup>,其经过待机停止、协商链路连接、身份认证、网络协商、终止等多个阶段运行,有完整的状态转换。PPP协议与一般局域网协议相比有如下优点:(1)传输效率高。PPP协议帧结构比以太网帧结构更加精

简,兼容HDLC,支持多种网络层协议的数据封装、支持宽范围的码率传输,可转发以太网数据帧。(2)支持广域传输。相比传统的以太网标准,扩大了网络通信范围,避免了管理共享信道带来的效率下降。配置适合的参数可使PPP协议在广域传输中具有较高的传输率。(3)协议性能稳定。PPP协议能自动维护协议状态机的工作,支持3个子协议中参数协商,为上层协议提供稳定的透明传输。

基于以上分析,通信协议栈的层次结构如图2所示。电缆和DSP工作在物理层的各个子层,图2中网络通信协议栈包括链路层、网络层、传输层、会话层,而主机应用程序实现了表示层和应用层的功能,完成对每支测量仪器的命令和数据进行处理。

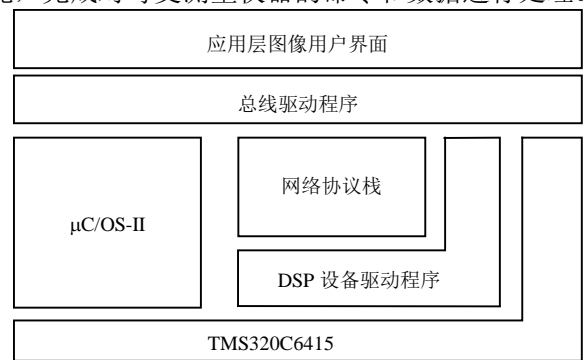


图2 全协议栈层次结构图

$\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 为协议栈提供时钟计数、同步控制、队列管理、调度控制适配等功能。驱动程序也可看作协议栈的特殊子层,完成数据的封装、解封、设备控制和消息的传递,作为协议层间的访问控制点。图2中结构层次分明,模块功能明确,衔接整合清晰,具有较好的可扩展性、可维护性等特点。

## 2 全协议栈的实现

### 2.1 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 的DSP实现

操作系统的DSP实现主要包括以下几个方面:选择进入和退出临界区域的控制方式;声明基本数据类型(OS\_CPU.H),须与CPU的位数一致;用C语言实现时钟服务函数,用DSP汇编实现任务调度切换时CPU寄存器状态值的出入栈处理;用DSP汇编定义中断向量表,实现中断的开关。具体为:(1)TickInit.c定义和实现用于启动时钟定时器的OSTickInit函数。(2)OS\_CPU.H定义基本数据类型和声明几个汇编函数的C语言名称。(3)OS\_CPU\_A.ASM实现移植 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 到C6415上的重要的汇编函数,包括OSIntCtxSw等任务调度时需要调用的保存上下文的汇编函数。(4)OS\_CPU\_C.c实现移植

μC/OS-II到C6415处理器的重要的C函数。(5) vectors.asm 文件定义中断向量表,包括MCBSP-EDMA、PCI和时钟等中断,中断函数均在C文件中。平台接口函数是μC/OS-II中要求实现的与CPU密切相关的重要函数<sup>[7]</sup>。

### 2.2 TCP/IP/PPP协议栈的实现

操作系统模拟层作为TCP/IP协议栈的适配层,实现协议内部同步控制,同时提供定时器、进程同步及消息传递机制等系统服务<sup>[5]</sup>。协议栈用到的时间间隔大于200 ms,超时定时器由操作系统模拟层提供,一旦时间超时就调用超时处理函数。进程同步机制采用信号量来实现,其中消息传递使用μC/OS-II邮箱实现。邮箱支持创建、邮递、提取和释放等操作。对邮箱的操作不会阻塞进程,投递到邮箱的消息被模拟层放到队列中,直至其他进程取出。

实现TCP/IP协议栈主要包括:在sys\_arch.h中定义与模拟层所需要的数据类型,声明宏函数,sys\_arch.c和sys.c实现sys\_arch.h声明的函数。这些变量用于协议栈初始化、协议栈内部同步、定时超时、交换数据、新建任务使用以及准备新任务的堆栈空间。在sys.h中声明一些函数,包括系统初始化、超时管理、信号量管理的函数,如sys\_init、sys\_timeout、sys\_untimeout、sys\_sem\_new、sys\_sem\_free、sys\_sem\_signal等。

为了提高遥测系统传输效率,链路层通信采用经过裁剪的PPP协议。主要剪裁掉认证、协议数据压缩,改IP地址动态分配为固定IP地址。这是因为测量系统是固定的通信两端,无需进行验证和分配,减少中间环节,提高协议的效率。位于TCP层之上的协议实体在5层的TCP/IP协议栈来看属于应用层,在本通信协议栈中属于会话层。它创建和维护TCP连接,为上层软件提供可靠的连接端到端的通路,调用下层TCP软件的回调函数,为上层提供SessionSetUp、SessionWrite、SessionRead、SessionRelease接口服务,负责建立和关闭会话,收发数据。

### 2.3 网络接口层的设计

协议软件采用DSP的McBSP口作为网络接口实现物理层与数据链路交换。与McBSP相关的是EDMA数据传输<sup>[8]</sup>、接口驱动实现McBSP参数配置,EDMA参数配置和端口关联、物理帧数据处理、EDMA中断处理。为适应信道传输采用的OFDM同步帧调制方式和减少EDMA中断次数,定义了物理

帧,其结构如图3所示,各字段说明如表1所示。



图3 物理帧结构

表1 物理帧结构字段说明

字段名	长度/Byte	作用和取值
SYN	1	帧同步标记,取值为0x47
LC	1	有效载荷长度或类型
PLAYLOAD	1~110	有效载荷数据
PADDING	0~109	补足数据

物理帧包括帧头和数据段,总长为112字节,其中帧头为两字节,包括同步标记和帧长码LC。LC是为适应信道OFDM符号长度和物理信道状态控制以及通告而定义的。当LC=0x01~0x6E时,载荷为承载的链路层PPP数据的长度。当LC=0x70~0x75时,载荷为信道状态请求帧,分别为对6块DSP工作状态的请求,载荷中可指定请求的信道状态部分不带值条目,或者带值条目或者全为空。当收到带值的条目时表示控制中心希望DSP按照设定的条目值工作。当LC=0xF0~0xF5时,载荷为6块中该DSP返回的状态帧,LC的其余取值为保留。信道状态条目按照(SID,SV)两字段组成,用来标识如信道的信噪比S/N、编码率、卷积类型、子载波个数、上下行链路带宽分配等状态量。SID是占1Byte的状态码标号,SV为占1~2 Byte的值,SV的长度由SID决定。多个(SID,SV)顺次连接构成状态数据帧,其状态链长度可以计算出,故无需在长度码中指明。当PLAYLOAD不足110 Byte时,用全零的补足字段PADDING补足。

协议栈的验证平台如图4所示,信道调制包含了上行和下行的两个单向信道。DSP驱动程序将链路层PDU数据封装成物理帧并逐一发送。当收到输入数据时,去头帧并提取数据后压入链路层输入缓冲区。而物理信道状态帧沿着与传送数据链路层PDU的物理帧不同的特殊路径传输,即DSP4和DSP5直接与DSP6交换,而其余的沿着DSP6、DSP4、DSP2、DSP1、DSP3、DSP5、DSP6环路传输。每次启动EDMA通过MCBSP传送一帧数据。当收到DSP到物理信道状态请求帧时,直接通过状态帧通路向主控板返回状态响应帧。主控板收到状态返回帧后,直接通过主机驱动交给应用程序。物理状态帧在DSP间直接通过McBSP-EDMA交换,而不再传递给链路层PPP协议软件处理,从而解决了多DSP互连的通信和控制。DSP驱动模块还实现初始化MCBSP-EDMA,

启动数据收发,为数据链路层提供标准的接口sio\_read、sio\_write、sio\_open、sio\_close等功能。

## 2.4 cPCI驱动设计

cPCI是紧凑的稳定性极高的工业用总线接口,是基本PCI总线的扩展。C6415的PCI接口包括3类寄存器:配置寄存器、PCI I/O寄存器及映射在DSP存储空间的寄存器。通过配置空间的3个基地址实现对PCI的访问和控制,提供外设配置标识信息<sup>[9]</sup>,对I/O寄存器的访问包括HSR、HDCR、DSPP寄存器。其作用是判断DSP-HOST中断状态,主机向DSP发中断信号,确定访问DSP内部存储器起始地址。本文采用基地址0中的DSPP寄存器配置主机对DSP内4 MB可预取空间的访问,实现DSP与主机间的数据交换。

cPCI的WDM驱动采用Driver Studio设计和调试<sup>[10]</sup>。本文中cPCI工作在从模式,用变量KioRange m\_IoPortRange1访问基地址2,用该寄存器处理中断和配置DSSP,用变量KmemoryRange m\_MemoryRang1访问基地址0,实现PC访问DSP的存储器。映射在DSP存储空间的寄存器能够被DSP和主机访问。当需要访问时,须改变DSPP值来重新映射,访问该空间的寄存器,主要用RSTSRC和PCIEN寄存器,用于开启中断和判断中断。PCI自举指DSP上电后,其内部运行的可执行代码通过PCI接口从PC主机上下载。通过PCI加载可以减小硬件设计复杂度,节省Flash存储器的使用,减少ROM二级加载的软件设计,同时可灵活更新和配置DSP的程序。本文中DSP6采用PCI自举,其余为ROM加载。

全通信协议栈包括应用层、会话层、TCP、IP、PPP协议和驱动模块,其发送数据过程中模块间通信调用为: Application → cPCI\_Write → PCI\_output → SessionWrite → tcp\_write → tcp\_enqueue → tcp\_output → ip\_output\_if → netif\_output → pppifoutput → nPut → sio\_write → Framing → McBSP\_output。接收数据过程中模块间通信调用为: EDMA\_Interrupt → McBSP\_Deframing → sio\_read → pppInproc → pppInput → ip\_input → tcp\_input → tcp\_process → tcp\_receive → SessionRead → PCI\_input → cPCI\_Read → Application,从而形成全协议栈的完整数据处理。

## 3 实验结果及其分析

用于测试协议栈性能的实验平台,也是远程测量系统样机的框图,如图4所示。它由6片C6415组成,调制解调器间用模拟电缆对连,DSP间用McBSP互

连通信。DSP1多种接口的测量仪器采集数据,如以太网接口设备。远程终端和控制中心的长距电缆在实验环境下采用信道模拟器连接来模拟7 km无中继测井深衰信道。测试方式包括两种:利用控制中心的DSP4、DSP5、DSP6之间用McBSP接口构成回路验证协议性能;利用协议对等性,在DSP1和工控主机之间构成全程回路,接受发送到的数据。测试主要包括协议时间开销和传输速率。在控制中心端利用日志记录方式得到全协议最长的启动时间小于30 s,其中包括信道通信的建立,而通过控制中心3块DSP互连的启动时间小于22 s,数据传输延迟最大小于1s。通过控制中心3块DSP互连构成的回路测试的速率不低于2 Mb/s,通过模拟信道的上行传输速率不低于800 kb/s,下行不低于20 kb/s。实验结果表明协议栈的设计取得了较好的预期效果。

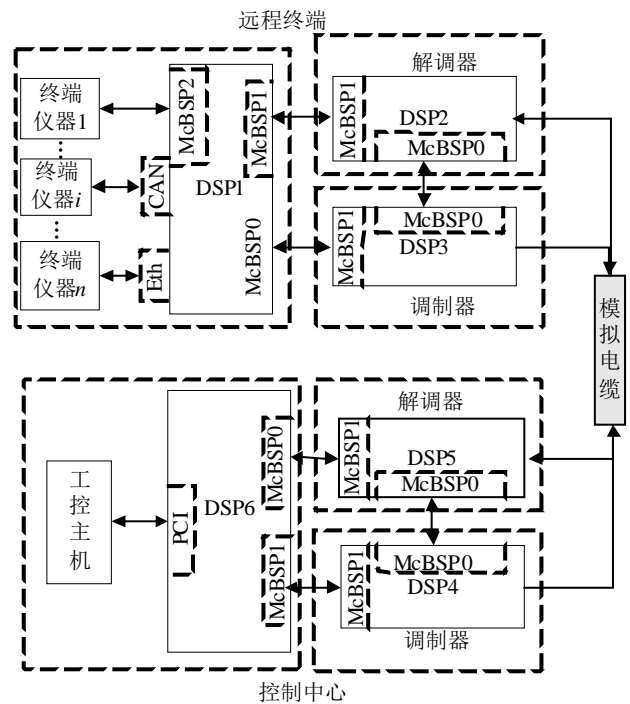


图4 协议栈验证平台框图

## 4 结论

在分析远程测量通信系统特点和要求的基础上,综合运用TCP/IP/PPP协议栈、cPCI总线,设计了会话管理层和采用McBSP-EDMA接口交换数据的物理帧,构建了基于OFDM同步传输的全协议栈,并在DSP上实现了该嵌入式协议栈。该通信协议栈结构紧凑,体系结构设计合理,在模拟电缆上经过长时间测试,上下行链路的速率达到了设计目标,数据传输延迟小,运行良好。

## 参 考 文 献

- [1] 杨建军, 林兴春, 郝秀权, 等. 测井电缆通信系统综述[J]. 石油仪器, 2007, 21(3): 1-4.  
YANG Jian-jun, LIN Xing-chun, HAO Xiu-quan, et al. Review of wireline communication system[J]. Petroleum Instruments, 2007, 21(3): 1-4.
- [2] 肖立志, 谢然红, 柴细元, 等. 新世纪的测井技术——网络测井及其技术体系初探[J]. 测井技术, 2003, 27(1): 6-10.  
XIAO Li-zhi, XIE Ran-hong, CAI Xi-yuan, et al. Well logging technology for the new century: network-based logging technology[J]. Well Logging Technology, 2003, 27(1): 6-10.
- [3] ZHANG Wei, SHI Yi-bing, TANG Jing-yuan. Application of an improved ADSL technique in the high-speed wireline logging telemetry system, electronic measurement and instruments[C]//ICEMI '07. [S. l.]: IEEE Press, 2007, (2): 108-112.
- [4] 覃复维. ADSL网络技术在测井工程中的应用[J]. 江汉石油职工大学学报, 2007, 20(4): 90-92.  
QIN Fu-wei. Application of ADSL network technology in well logging engineering[J]. Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers, 2007, 20(4): 90-92.
- [5] ADAM D. Design and implementation of the LwIP TCP/IP Stack[EB/OL]. [2007-09-01]. <http://www.sics.se/~adam/lwip/>.
- [6] SIMPSON W. The point-to-point protocol (RFC1661, July1994.)[EB/OL]. [2007-06-12] <http://www.ietf.org/rfc/rfc1661.txt>.
- [7] JEAN J L. MicroC/OS-II the real-time kernel[M]. (2nd ed)CMP Media LLC: CMP Books, 2002.
- [8] Texas Instruments. TMS320C6000 DSP multichannel buffered serial port reference guide[EB/OL]. [2007-03-12]. [http://ee.yeditepe.edu.tr/labs/ee468/index\\_files/documents/spru580g.pdf](http://ee.yeditepe.edu.tr/labs/ee468/index_files/documents/spru580g.pdf).
- [9] Texas Instruments. TMS320C6000 DSP peripheral component interconnect reference guide[EB/OL]. [2007-5-2]. <http://focus.ti.com.cn/cn/lit/ug/spru581c/spru581c.pdf>.
- [10] 袁魏华, 季鹏, 乔卫民. 基于WDM模型的PCI卡驱动程序设计[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(2): 537-539.  
YUAN Wei-hua, JI Peng, QIAO Wei-min. Design of device driver for PCI cards based on WDM[J]. Computer Engineering and Design, 2005, 26(2), 537-539.

编辑 张俊

(上接第348页)

适用于MIMO系统的AM算法, 在满足总发送功率和BER限制的条件下利用不精确的CSI使系统信息传输速率最大化。该算法不仅可以在CSI存在显著误差的情况下保证BER满足系统要求, 为系统提供有效性和可靠性的良好折中, 而且在相同BER条件下可以提供更高的频谱效率。

## 参 考 文 献

- [1] 罗振东, 高宏, 刘元安, 等. MIMO信道容量公式及其渐近界[J]. 北京邮电大学学报, 2006, 29(6): 72-76.  
LUO Zhen-dong, GAO Hong, LIU Yuan-an, et al. Formula and asymptotic bound of MIMO channel capacity[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006, 29(6): 72-76.
- [2] HUO Yong-qing, PENG Qi-cong, SHAO Huai-zong. Adaptive power and bit allocation in multicarrier systems[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2007, 5(1): 13-17.
- [3] ZHOU Zhen-dong, VUCETIC B, DOHLER M, et al. MIMO systems with adaptive modulation[J]. IEEE Trans on Veh Tech, 2005, 54(5): 1828-1842.
- [4] FAN Ling-yang, HE Chen, WANG Zhi-ying, et al. Transmit power and bit allocation for the MIMO systems[C]//GLOBECOM'05. [S.l.]: IEEE Press, 2005, 5(28): 2881-2884.
- [5] LAI S K, CHENG R S, LETIEF K B, et al. Adaptive trellis coded MQAM and power optimization for OFDM transmission[C]//VTC 1999. Houston: IEEE Press, 1999: 290-294.
- [6] ZHOU Sheng-li, GIANNAKIS G B. How accurate channel predictions needs to be for transmit-beamforming with adaptive modulation over Rayleigh MIMO channels[J]. IEEE Trans on Wireless Comm, 2004, 3(4): 1285-1294.
- [7] WANG Zhi-ying, HE Chen, HE An. Robust AM-MIMO based on minimized transmission power[J]. IEEE Commun Letters, 2006, 10(6): 432-434.
- [8] ZHANG Ran-ran, YANG Ai-min, XIE Gang, et al. Optimal robust bit and power allocation for MIMO systems [C]//ISCIT 2007. Sydney: IEEE Press, 2007.
- [9] ZHOU Zheng-dong, VUCETIC B. Design of adaptive modulation using imperfect CSI in MIMO systems[J]. IEE Electronics Letters, 2004, 40(17): 1073-1075.
- [10] GOLUB G H, VAN LOAN C F. Matrix computations[M]. Translated by YUAN Ya-Xiang, 3rd ed. Beijing: Science Press, 2004.
- [11] CHUNG S T, GOLDSMITH A J. Degree of freedom in adaptive modulation: a unified view[J]. IEEE Trans on Commun, 2001, 49(9): 1561-1571.

编辑 漆蓉