



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

信息与通信工程

Communication Principles and Exploration Lab Using
the NI USRP™ Platform

通信原理实验教程

——基于NI软件无线电教学平台

杨宇红 袁焱 田砾 编著

Yang Yuhong Yuan Yan Tian Li



清华大学出版社





教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会
高等学校电子信息类专业系列教材

Communication Principles and Exploration Lab
Using the NI USRP™ Platform

通信原理实验教程

—— 基于NI软件无线电教学平台

杨宇红 袁焱 田砾 编著

Yang Yuhong Yuan Yan Tian Li

清华大学出版社

内 容 简 介

本书描述了采用 NI 公司的软件无线电教学平台进行通信实验的内容,包括实验目的及原理、实验方法和步骤等。全书共分为三个部分:第一部分介绍实验基础知识,包括软件无线电的概念和 NI 软件无线电教学平台的软硬件设备;同时,简单介绍实验的基本过程和方法。第二部分为基础实验篇,提供 9 个实验,以通信原理教学大纲为主导,并结合工程实践,以构建 AM 和 FM 调制解调系统以及 BPSK/4-QAM 数字调制解调系统的主要算法模块为实验内容。最后的扩展实验篇对实验内容进行了拓展,不局限于通信原理的内容,而是需要对无线通信理论以及其他数字信号处理方法有更深入的了解,希望发挥学生的主观能动性和开拓创新能力。

本书内容翔实,将通信理论和工程实践紧密结合,借鉴了国际领先的实践教学经验。将当前流行的软件无线电技术很好地应用于通信原理的实践教学,让学生不仅加深了对基本概念的理解,而且在实验室的环境中就能够快速构建完整真实的通信系统。

本书可作为高等院校电子信息类专业的通信实验教程,也可供相关领域的科研和工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

通信原理实验教程:基于 NI 软件无线电教学平台/杨宇红,袁焱,田砾编著.--北京:清华大学出版社,2015
高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-40061-5

I. ①通… II. ①杨…②袁…③田… III. 通信理论—高等学校—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 149281 号



责任编辑:梁颖 薛阳

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:三河市君旺印务有限公司

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:9.25

字 数:228 千字

版 次:2015 年 9 月第 1 版

印 次:2015 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:25.00 元

产品编号:054641-01

高等学校电子信息类专业系列教材

一 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

一 编审委员会

主任 吕志伟 哈尔滨工业大学

副主任 刘旭 浙江大学
隆克平 北京科技大学
秦石乔 国防科学技术大学
刘向东 浙江大学

委员 王志华 清华大学
韩焱 中北大学
殷福亮 大连理工大学
张朝柱 哈尔滨工程大学
洪伟 东南大学
杨明武 合肥工业大学
王忠勇 郑州大学
曾云 湖南大学
陈前斌 重庆邮电大学
谢泉 贵州大学
吴瑛 解放军信息工程大学
金伟其 北京理工大学
胡秀珍 内蒙古工业大学
贾宏志 上海理工大学
李振华 南京理工大学
李晖 福建师范大学
何平安 武汉大学
郭永彩 重庆大学
刘缠牢 西安工业大学
赵尚弘 空军工程大学
蒋晓瑜 装甲兵工程学院
仲顺安 北京理工大学
黄翊东 清华大学
李勇朝 西安电子科技大学
章毓晋 清华大学
刘铁根 天津大学
王艳芬 中国矿业大学
苑立波 哈尔滨工程大学

王志军 北京大学
葛宝臻 天津大学
何伟明 哈尔滨工业大学

宋梅 北京邮电大学
张雪英 太原理工大学
赵晓晖 吉林大学
刘兴钊 上海交通大学
陈鹤鸣 南京邮电大学
袁东风 山东大学
程文青 华中科技大学
李思敏 桂林电子科技大学
张怀武 电子科技大学
卞树檀 第二炮兵工程大学
刘纯亮 西安交通大学
毕卫红 燕山大学
付跃刚 长春理工大学
顾济华 苏州大学
韩正甫 中国科学技术大学
何兴道 南昌航空大学
张新亮 华中科技大学
曹益平 四川大学
李儒新 中科院上海光学精密机械研究所
董友梅 京东方科技集团
蔡毅 中国兵器科学研究院
冯其波 北京交通大学
张有光 北京航空航天大学
江毅 北京理工大学
张伟刚 南开大学
宋峰 南开大学
靳伟 香港理工大学

丛书责任编辑 盛东亮 清华大学出版社

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

随着无线电通信电路的集成化和通信系统的小型化、数字化、智能化和网络化,无线电通信已经开始从模拟转向数字,而且正在向软件型方向发展。软件无线电通信是无线通信系统和计算技术结合的产物。目前已经广泛应用于移动通信、卫星通信和军事等领域。受传统实验条件和实验教材的限制,目前在大学开展基于软件无线电平台的通信原理实验的院校并不多,但从通信领域教学研讨会反馈的信息来看,很多院校目前也在调研和选择教材着手进行通信原理实验的改革,以跟进时代的发展变化。

“通信原理”和“无线通信”等课程在大学本科和研究生水平的电气工程课程中被广泛教授,都采用抽象的讲授方法,更加强调理论。这些典型课程中的抽象理论与实践中的具体应用之间的差异越来越大。这种差异在无线通信系统中尤其明显,随着课程理论越来越抽象,也越来越依赖模拟教学的方式来验证理论。典型的模拟教学,通常基于一定的简化假设条件,因此对一些重要的实际问题未能有所体现。理论和实践之间的差异日趋明显,加上对模拟教学的日趋依赖,导致现在很多学生无法将学到的知识迅速应用于一个真正的通信系统当中。为了尽快克服这样的问题,我们建立了开放性的软件无线电实验教学平台,使得学生能够在实验室的环境下快速构建验证自行设计的通信系统,而且通过软件的交互性界面帮助学生更形象地理解概念,并能够从零散知识点的灌输发展到建立“系统”的概念。

LabVIEW 软件编程语言在工程中应用极其广泛,其图形化的编程思想更符合工程师的理念,同时具备灵活的用户界面与强大的交互性,使 LabVIEW 亦成为工程教育的领先工具。越来越多的美国大学开始使用 LabVIEW 作为通信教学的软件仿真工具。美国国家仪器公司(National Instruments)的通用软件无线电外设(Universal Software Radio Peripheral, USRP),可以将基于 LabVIEW 的软件仿真系统无缝地融合到硬件平台上,构建“真实”的通信系统,而且具有更灵活的操作方式,尺寸小巧,成本较低,可用以太网线连接主机,即可以兼容“基于真实信号的课堂实验”。在这种软件无线电教学平台上可以用虚拟仪表测量时域、频域、误码等性能,可以验证文本信息及音视频的实时通信效果,或为当前及未来无线通信系统构建仿真测试平台。使用软件无线电教学平台设备,学生可以专注于算法本身,但同时也能接触到无线系统的工程实践,而不必担心复杂的模拟前端以及 RF 电路设计问题。这是因为当硬件平台中出现了灵活的 RF 上变频器和下变频器以及相匹配的高速 DAC 和 ADC 后,促进了软件定义无线电概念的发展,终于有一种方法能够以高品质和可重复性来创建和处理波形。

本教材共分为三个部分:

第一部分为实验基础知识,在软件无线电及实验平台一节中讲述了软件无线电的概念和相应的软硬件设备,接下来的环节中重点介绍了本教材所采用的 NI 公司的软件无线电

教学平台,即 LabVIEW 图形化编程语言和 USRP 硬件设备的组合,以及所采用的实验设备的型号配置等。同时,还讲述了实验的基本过程,在实验的每个环节中应完成的基本任务及意义。最后,因为对数字通信系统是划分为多个不同的功能模块分别进行实验的,因此,为使实验者对这部分有一个整体的了解,将相对应的几个实验的实验方法进行了整体的说明。

第二部分基础实验篇与通信原理理论课程的教学紧密结合,通过对模块的设计以及对整体系统的构建等实践内容加深对通信基本算法理论的认识和理解,其中包括了几个基本的通信系统链路设计实验,如用 LabVIEW 语言分别构建 AM 及 FM 发送和接收链路,在基于 USRP 的软件无线电平台上运行;以及构建单载波的 BPSK/4-QAM 数字调制解调基本链路,即发送端采用二进制频移键控(BPSK)或正交幅度调制(QAM)和升余弦脉冲整形及信道编码;接收机功能设计上增加了一定的难度,除了匹配滤波、解调、信道解码和检测之外,还包括信道估计与时域均衡、各级同步等相关的内容。这部分内容有的与通信原理理论教材中所讲授的方法有很大的不同,甚至没有包含在理论教程中,但在实际工程中却是非常重要的内容,对于在信道中受损的无线信号完整有效地接收起着不可或缺的作用。

基础篇中的每个实验都描述了实验目的和实验原理,希望能在实验前仔细阅读,结合所提供的参考教材和资料真正理解相关的理论知识。实验原理部分从实践的角度介绍通信原理乃至无线通信课程的相关内容,不仅仅包含一些处理实际问题的理论,更希望学生能够真正知道如何发送和接收实际的通信波形。

第三部分扩展实验篇中对系统进行了扩展,不仅仅局限于通信原理的内容,而是需要对无线通信理论有更广泛或更深入的了解,以及与其他数字信号处理方法相结合的能力。而且,通过这部分实验旨在引入开放创新的实验教学方式,发挥学生的主观能动性,积极深入拓展,将多方面的知识融会贯通,因此,在该部分的实验内容撰写上较为简化,希望学生能够根据对实验目的和实验原理的了解,参考实验内容的部分示例,进行深入探索,使用软件无线电平台及较高级的设计方法,结合实际无线信号和真实通信系统开发构建更为复杂的仿真系统或者完整的通信链路,力求使整个系统的综合性能更佳、代码更为优化以及界面更为美观。

这部分包括 6 个独立的实验内容:

实验 10 为数字锁相位同步提取的 LabVIEW 仿真,是用 LabVIEW 语言模拟数字锁相环的位同步提取过程。位同步提取在接收机电路中非常重要,关系到接收信号的正确与否。在工程实践中通常采用数字锁相法从接收到的数字基带信号中提取位同步信号,系统的主要性能指标,如恢复得到的位同步时钟信号的相位抖动,系统的捕捉带宽、捕捉时间等,相互之间存在一定的天然对立。其中一种指标的改善,往往会以另一种指标的折损为代价。这些性能指标的相互关系是值得探究的课题。但在实体电路实验中,这些指标都表现为某种形式的随机变化量。要精确测量它们是一件比较复杂的事,通常要使用特别专门的测量仪器和测量方式。而利用 LabVIEW 编程,可以建立符合前述理论原理和逻辑设计方案的动态仿真模型。通过这种仿真模型,可以方便地获得主要性能指标的各种统计测量结果,这就为开展相关问题研究提供了一条可行的技术路径。

实验 11 的内容为添加了自动请求重传机制的文本信息传输。由于噪声或同步不准确等多种因素的影响,在 SNR 大于 1 时也常常会有丢包或错误的包。因此,在通信系统中添加 CRC 校验及重传机制可保证数据包较可靠地传输,降低丢包率,本实验中接收端根据接

收包的校验结果回复 ACK 信号,而发送端则根据 ACK 回复信息决定是否重新发送前一个包或继续进行下一个包的发送。本实验的拓展部分为设计一个定制的通信协议,实现点对点的无线通信链路满足协议要求。

实验 12 的内容是在文本信息传输系统中采用高灵敏度的包捕获方法。包捕获机制的灵敏度关系到信息的最远传输距离或者说在固定的传输距离下发送信号增益的强度,高灵敏度的包检测方法必将带来更远的传输距离或者可以适当降低发送信号的增益强度。本实验的目的是实现参考资料中给出的一种新的包捕获机制,与已提供的文本传输链路中的仅仅根据接收信号能量进行包捕获的方法相比较,体会高灵敏度包捕获方法的效果。本实验的拓展部分希望实验者能够进一步尝试基于相关性的包捕获方法。

实验 13、实验 14 和实验 15 都可基于已给的文本信息传输链路,修订代码,或者是添加语音或视频的信源编解码,或者是变为直序扩频或跳频传输,除了相关的信号处理及通信理论知识外,还要重点讨论的问题是程序模块的并行性设计以降低传输时延,保证信息传输的实时性和有效性。

当前诸多的商业通信协议中都采用了多载波的 OFDM 调制,包括无线 LAN 标准,如 IEEE 802.11g、IEEE 802.11a 和 IEEE 802.11n; 宽带无线接入,包括 IEEE 802.16(WiFi); 移动宽带无线 IEEE 802.20; 数字视频广播 DVB(用于欧洲)以及 3GPP 蜂窝标准的几个版本等。因此,在实验 16 和实验 17 中分别将 OFDM 调制解调和频域均衡设计以及载波频偏估计和帧同步作为实验内容。

本书及实验教程的开发得到了美国国家仪器公司的支持和授权,提供了包括美国德州大学奥斯汀分校以及斯坦福大学和加州大学圣地亚哥分校等多所大学的无线通信实验内容作为参考。本教材基础实验篇中实验 3 直到实验 9 以及扩展实验篇中实验 16 和实验 17 的大部分内容都直接采用了文献[1]的相关部分,它们是德州大学奥斯汀分校 Robert W. Heath Jr. 教授所讲授的数字无线通信(Introduction to Wireless Digital Communication: A Signal Processing Perspective)的内容,对这些内容更多的是进行了翻译,但对实验顺序的安排进行了一些调整,并根据上海交通大学通信原理教学课程大纲的要求添加了一些内容,如基于循环码的信道编解码等。这部分内容的发表也已经征得了 Robert W. Heath Jr. 教授的同意。美国国家仪器公司与上海交通大学电子工程系实验中心合作建立的“大学生创新实践基地——图形化系统设计实验室”让本课程得以实施,NI 同时提供了专业技术支持和国际领先的实践教学经验分享,进一步加快了 NI 软件无线电平台与中国本地通信实践教学的融合,衷心感谢他们的支持。

同时感谢上海交通大学电子工程系实验中心的多位老师和研究生助教以及多届参与课程设计学生的帮助,使得这本实验教材得以最终完成,其中包括:陈大华老师撰写了信道编解码实验中循环码部分的初稿;李安琪老师对码元同步恢复的资料翻译和整理并提供了扩展实验中位同步提取的演示程序;李立安助教对部分扩展实验内容的添加和修订;顾之诚、黄森洪等多位同学设计了音视频通信等的程序代码及前面板示例等。在此衷心感谢所有人的帮助。

编者

2015年6月

目录

CONTENTS

第一部分 实验基础知识

0.1 软件无线电及实验平台介绍	3
0.2 LabVIEW 图形化编程语言介绍	4
0.2.1 什么是 LabVIEW	4
0.2.2 LabVIEW 工具包	7
0.2.3 LabVIEW 语言编程风格	7
0.3 NI-USRP 硬件设备及应用示例	8
0.3.1 NI-USRP 的构成原理和性能指标	8
0.3.2 NI-USRP 硬件驱动及函数库	10
0.3.3 NI-USRP 的一个应用示例	16
0.4 实验设备要求及实验基本步骤	19
0.5 数字调制解调系统的实验说明	20

第二部分 基础实验篇

实验 1 模拟 AM 调制解调系统	25
1.1 实验目的	25
1.2 实验原理	25
1.3 实验内容	27
实验 2 模拟 FM 调制解调系统	32
2.1 实验目的	32
2.2 实验原理	32
2.3 实验准备	33
2.4 实验操作	36
2.5 实验拓展	36
实验 3 创建 AWGN/ISI 信道模型及 m 序列产生	37
3.1 实验目的	37
3.2 实验原理	37
3.3 实验内容	42
实验 4 数字通信系统中 BPSK/4-QAM 调制与脉冲成型滤波	45
4.1 实验目的	45

4.2	实验原理	45
4.3	实验准备	48
4.4	实验操作	49
实验 5	数字通信系统中匹配滤波、BPSK/4-QAM 解调及检测接收	50
5.1	实验目的	50
5.2	实验原理	50
5.3	实验准备	51
5.4	实验操作	53
实验 6	数字通信系统中窄带信道中的码元定时恢复	54
6.1	实验目的	54
6.2	实验原理	54
6.3	实验准备	57
6.4	实验操作	58
实验 7	数字通信系统中的帧检测和频偏校正	60
7.1	实验目的	60
7.2	实验原理	60
7.3	实验准备	64
7.4	实验操作	66
实验 8	数字通信系统中的信道估计和时域均衡	68
8.1	实验目的	68
8.2	实验原理	68
8.3	实验准备	72
8.4	实验操作	75
实验 9	数字通信系统中的信道编解码	78
9.1	实验目的	78
9.2	实验原理	78
9.3	实验准备	82
9.4	实验操作	83

第三部分 扩展实验篇

实验 10	数字锁相位同步提取的 LabVIEW 仿真	87
10.1	实验目的	87
10.2	实验原理	87
10.3	实验内容	89
10.4	实验拓展	89
实验 11	基于自动请求重传的文本信息传输	90
11.1	实验目的	90
11.2	实验原理	90

11.3 实验内容	91
11.4 拓展实验	93
实验 12 高灵敏度的包捕获方法对文本信息传输的影响	95
12.1 实验目的	95
12.2 实验原理	95
12.3 实验内容	97
12.4 实验拓展	98
实验 13 语音、视频实时通信系统	99
13.1 实验目的	99
13.2 实验原理	99
13.3 实验内容	100
实验 14 扩频通信系统	104
14.1 实验目的	104
14.2 实验原理	104
14.3 实验内容	105
实验 15 跳频通信系统	106
15.1 实验目的	106
15.2 实验原理	106
15.3 实验内容	106
15.4 实验拓展	107
实验 16 OFDM 调制和频域均衡	108
16.1 实验目的	108
16.2 实验原理	108
16.3 实验准备	110
16.4 实验操作	112
16.5 实验拓展	115
实验 17 采用 Schmidl-Cox 算法实现 OFDM 系统的帧和频率同步	116
17.1 实验目的	116
17.2 实验原理	116
17.3 实验准备	119
17.4 实验操作	120
附录 A 数字锁相法符号位同步时钟恢复参考设计	123
A1 数字锁相环位同步恢复建模	123
A2 参考界面设计	125
A3 有/无匹配滤波器的结果比较	126
附录 B AM 调制解调检测表	128
附录 C FM 调制解调检测表	129
附录 D QAM 调制解调系统检测表	130
参考文献	132

第一部分

PART

实验基础知识

0.1 软件无线电及实验平台介绍

正如文献[2]中所描述的那样,在不远的将来,世界各地的无线带宽会越来越无法满足消费者的需求,促使相关部门和研究者不断提出新的想法来迎接这种挑战。虽然新的概念和理论并不缺乏,然而从概念到仿真再过渡到部署在一个真正的网络可能需要许多年的时间,特别是从基本是软件完成的概念/模拟仿真过渡到带有真实信号和波形的工作原型需要广泛的时间和金钱的投资,这已经成为利用新技术缓解无线带宽危机的一个障碍。当今,许多研究人员主要依靠软件模拟来测试他们的理论,采用简化的信道模型(如 AWGN)来粗略地模仿现实世界的情况,如果加入衰落模型,如 Rayleigh 或 Ricean,则可以改进对移动场景的模拟,然而这些模型很难准确地描述所有的网络条件,也难以获悉采用某种模型的可行性。此外,更复杂的网络拓扑结构,如多用户 MIMO(MU-MIMO)和协同多点(CoMP)很难准确建模。

软件无线电(SDR)可以加速原型构建,因为研究人员可以利用软件固有的可重构性和系统的灵活性,较传统方式更快、更容易地开发、部署、测试和迭代新的信号处理算法和/或系统软件,已成为下一代无线研究的一个可行的原型选择。SDR 采用具有射频前端的并行处理架构,能够反映真正的移动设备和/或蜂窝基站。但特别要注意的是,今天的无线系统的信号处理块在并行异构计算引擎中进行划分是非常困难的,甚至会令人生畏。如果没有透彻地理解处理、延迟和吞吐量,研究人员可能会陷入无休止的循环试验和错误之中。同时还要注意,尽管 SDR 承诺为无线研究者加速获取实验结果,但如果采用的是松散的硬件/软件衔接并且还要用多个分开的软件开发工具,则实际的系统开发和集成就需要花费比较多的时间。因此,谨慎地选择工具和 SDR 平台才可以显著减少从模拟到原型的过渡成本。

软件无线电技术以现代通信理论为基础,以数字信号处理为核心,以微电子技术为支撑,突破了传统的无线电设计以功能单一、可扩展性差的硬件为核心的设计局限性,强调以可编程的硬件作为通用平台,尽量用可升级、可重配置的软件来实现各种无线电功能的设计新思路,其重要价值在于传统的硬件无线电通信设备只是作为无线通信的基本平台,而许多的通信功能则由软件来实现,打破了有史以来设备的通信功能的实现仅仅依赖于硬件发展的格局。软件无线电技术的出现是通信领域继固定通信到移动通信、模拟通信到数字通信之后的第三次革命。它的基本思想就是使宽带模数变换器(A/D)及数模变换器(D/A)尽可能地靠近射频天线,建立一个具有 A/D-DSP-D/A 模型的通用的、开放的硬件平台,在这个硬件平台上尽量利用软件技术来实现系统链路的各种功能组件,包括滤波器、编码器、调制器和解调器等。因为这些组件是在软件中定义的,可以根据需要调整软件无线电系统,而不必在硬件上做大的改动。由于现在的计算机可以有非常快速的处理器和高速的接口,所以能够利用这些优点,在计算机上快速地实现软件无线电的设计^{[3][4][5][24]}。

软件无线电技术一经提出,就得到了广泛的关注,并成为未来通信系统的发展方向,在工程实践中的应用也越来越广泛。多家公司相继开发了基于软件无线电技术的开发平台和设备。其中,虚拟仪器行业龙头美国国家仪器公司(National Instruments)开发了通用软件无线电硬件设备(USRP)和图形化编程语言 LabVIEW。这种无线通信平台推动了软件无

线电概念的建立。

LabVIEW 是一种灵活高效的设计语言,目前,世界各地有成千上万的工程师应用 LabVIEW 来进行小型、中型甚至系统级的项目设计。从 1986 年诞生以来,它的功能不断增加,融合各种最新的技术发展,效率也不断提升,内置许多简化编程复杂度的功能和函数; LabVIEW 设计方式采用基于数据流的自然思维方式,也支持文本语言代码调用,还支持连接各种硬件。使用 LabVIEW 将软件仿真的通信系统无缝地融合到 NI-USRP 等通用无线硬件平台上,构建“真实”的通信系统。

NI 公司专为射频通信物理层教学定制的通用软件无线电外设(USRP)硬件设备带有灵活的射频上转换器和下转换器,与高速的数模和模数转换器相匹配,用作射频信号的发送和接收。作为发送器时可以接收主机的信号波形,采样率高达 25M/s,将信号上变换到射频然后送到放大器发射到空中; NI-USRP 接收器则将载频下变换到复 IQ 基带信号,采样率为 100MS/s,再进一步下变换到用户指定的速率,然后送到主机进行处理。

结合 NI-USRP 硬件和 NI LabVIEW 软件的优势,在通用硬件平台上运行软件模块,用于实现无线功能。提供了满足多功能需求且灵活性强的快速通信原型平台,适用于物理层设计、无线信号录制与回放、通信情报、算法验证等应用。

在通信原理课程中注重理论研究,旨在介绍通信系统的基本算法,通信原理实验则在基于软件无线电的教学平台上进行物理层系统设计和算法的验证,“无线电的一些或全部的物理层功能由软件定义”^[5],使得学生不必过多考虑模拟前端和和射频电路设计问题就能够接触到实际的无线系统工程,有效地进行通信系统的物理层实现。

下面两节分别介绍 LabVIEW 软件开发环境和 NI-USRP 硬件,其中软件部分主要介绍什么是 NI LabVIEW,以及 LabVIEW 的一些高级工具并简单介绍 LabVIEW 的编程风格;而硬件部分介绍 NI-USRP 的组成,NI-USRP 驱动函数库以及如何在 LabVIEW 环境中对其进行配置和控制它的相关参数,从而实现射频信号的发送和接收功能。

0.2 LabVIEW 图形化编程语言介绍

0.2.1 什么是 LabVIEW

LabVIEW 是美国国家仪器公司(NI)开发的图形化(G)编程环境,最新的版本是 LabVIEW 2014,由于本课程的实验都是在基于 LabVIEW 2012 的版本下完成的,因此本节中关于 LabVIEW 的介绍基于 LabVIEW 2012 版本。

LabVIEW 的基本构建模块是虚拟仪器(VI),VI 类似于常规编程语言中的过程或函数,如图 0-1 所示。每个 VI 由一个程序框图(Block Diagram)和一个前面板(Front Panel)组成。程序框图为编程界面,描述了 VI 的功能,可以通过在程序框图上添加众多子功能和子例程,来搭建满足自身需求的程序,达到想要的功能。另外,LabVIEW 自带了许多预定义的功能,用户也可以通过对这些预定义功能的组合重用,来节省搭建模型和访问硬件设备的时间。框图的背景为白色。前面板是 VI 的顶层接口,背景色为灰色。用户或者操作者可以通过在前面板上添加控件、旋钮、开关、图形、图表和发光二极管等器件来进行程序控制。VI 的这种组成结构提供了两点好处:代码重用和模块化,而且图形化的编程



还提供了另外一个好处是使开发者容易直观地看到所设计的数据流。NI称之为图形化系统设计。LabVIEW是成熟的数据流编程语言,有大量的文档、工具包和设计实例可供开发者使用。

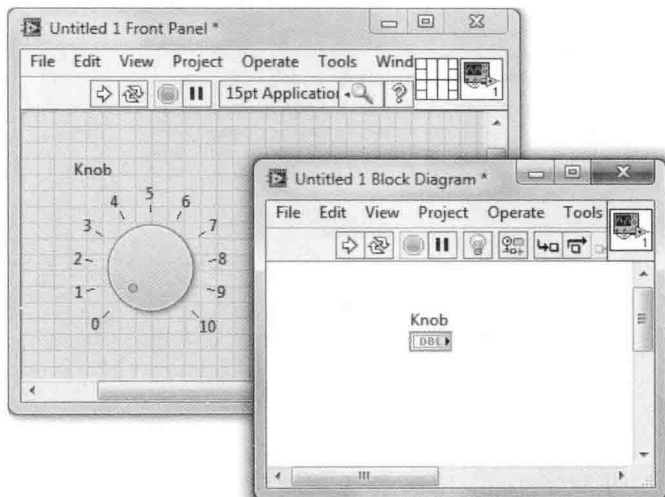


图 0-1 前面板(左上)和程序框图(右下)示意图

LabVIEW 还提供了配置和操作外部输入输出设备,包括 NI 射频硬件如 USRP 的简单接口,这也是采用 LabVIEW 作为实验编程语言的原因之一。实验中的所有算法也可以用其他编程语言,如 C/C++、汇编或 VHDL,在 DSP、微控制器或 FPGA 平台上实现,而选用 NI 的 LabVIEW 软件和 USRP 射频硬件的软件无线电教学平台是最为方便的一种,而且当前在国内外应用较为广泛。

应在本课程中熟悉 LabVIEW 语言及其帮助信息。以下提供的指导和参考信息非常有助于学习 LabVIEW。

(1) LabVIEW 101^[6],是一个免费的在线学习中心,对 LabVIEW 的初学者来说是个很好的工具。它是完全免费的,在 LabVIEW 101 可以找到关于 LabVIEW 的视频、教程、测验、项目和考试。该学习中心是专门面向学生的,也包含了可以供任何类型初学者共同学习的内容。

(2) LabVIEW Fundamentals from National Instruments^{[7][8]}。

(3) online LabVIEW tutorials from NI^{[9][10]}。

LabVIEW 开发环境中提供了即时帮助和详细帮助两种形式的帮助。

1. 即时帮助

当光标移动到每一个 LabVIEW 对象上时,即时帮助窗口都会显示该对象的基本信息。选择帮助→显示即时帮助,或者按下 Ctrl+H。

当光标移至前面板和程序框图对象上时,即时帮助对话框将显示子 VI、函数、常量、输入控件和显示控件的图标,以及每个接线端上的连线。当光标移至对话框选项上时,即时帮助对话框将显示这些选项的说明。

如果即时帮助对话框所描述的这个对象存在对应的详细帮助,会出现一个蓝色的“详细帮助”链接(如图 0-2 所示)。单击链接就可以得到关于该对象的更多信息。