

基于口袋化的软件无线电通信实践教学创新

刘奕彤, 尹良, 郑平, 顾仁涛, 杨鸿文
(北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876)



摘要:以5G为代表的现代通信技术的发展对通信教学创新提出了更高的要求。面向新工科,面向未来,通信领域人才培养将更强调建模能力、仿真能力的培养,重视理论知识的应用,加强对现代工具的掌握。介绍了基于低成本口袋化软件无线电设备通信教学实验的设计与实践。通过软件无线电将现实中真实的通信信号结合到通信理论建模及通信仿真中,通过常态化的虚实结合、线上线下混合、校园内外结合、课堂翻转等手段,实现了泛在的通信实验教学,取得了良好的效果。

关键词:通信原理;建模;仿真;软件无线电;口袋化;泛在实验室

中图分类号:G 642.0

文献标志码:A

文章编号:1006-7167(2022)09-0204-04

Practice Teaching Innovation of Communication Based on Portable SDR

LIU Yitong, YIN Liang, ZHENG Ping, GU Rentao, YANG Hongwen

(School of Communication and Information Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: With the rapid development of modern communication technology represented by 5G, higher requirements are urgently put forward for the innovation in education of the communication systems. Facing the new engineering and future, the cultivation of talents in the field of communication engineering should emphasize the capability of modeling, simulation, the implementation of theoretical engineering, and strengthen the mastery of modern tools. This paper introduces authors' innovation in communication experiment teaching based on low cost pocket software radio equipment. By combining the real communication signals in reality with theoretical model and simulation, and introducing practical signals and corresponding engineering problems through the combined means such as virtual and real, online and offline, inside and outside campus, flipped classroom, and others, the effective and ubiquitous communication experiment teaching can be realized.

Key words: principles of communications; modeling; simulation; software definition radio (SDR); portable; ubiquitous lab

收稿日期:2021-10-04

基金项目:教育部高等学校电子信息类专业教指委教学改革研究重点项目(2020-ZD-01);北京邮电大学校级教改项目(2021KCSZ03)

作者简介:刘奕彤(1982-),女,天津人,博士,高级工程师,主要从事无线通信、图像处理、机器学习相关的研究与教学工作。

Tel.:010-62283233;E-mail:liuyitong@bupt.edu.cn

通信作者:杨鸿文(1964-),男,甘肃岷县人,博士,教授,主要从事无线通信相关的研究与教学工作。

Tel.:010-62283233;E-mail:yanghong@bupt.edu.cn

0 引言

从2G到5G,通信系统的研发过程越来越依赖于大量的建模、仿真工作。面向未来的通信人才不仅需要理论基础扎实、动手能力强,同时还必须能够将理论变成现实,并能从实际问题中抽象出理论。为了适应5G乃至后5G时代对高素质创新人才培养的需要,我校通信工程专业通过长期探索,设置了一门深度融合理论教学与实践教学、聚焦通信中复杂工程问题的专业基础课——通信系统仿真与建模,通过教学创新特

别是实验教学创新,解决经典通信理论的工程落地问题,对接当前工业界真实的研发过程,让学生掌握现代工具,面向高阶性、创新性与挑战度,培养具有时代使命感和社会责任感的通信领军人才。

1 面临的挑战

在通信原理教学中,如何更好地实现理论与实验融合是教学界长期关注的问题^[1-6]。传统教学常使用 Matlab、C 语言等进行调制解调、编解码的仿真^[7-11],或使用 TIMS、FPGA 模块进行验证。近年来越来越多的高校尝试基于 USRP 等软件无线电平台的半实物仿真。对于我校的教学改革,具体面临这样一些挑战:

(1) 面对大规模必修课,国内外尚无全面引入软件无线电的成功作业可抄,引入全新教学内容和实验平台有风险。目前参考了英国斯特拉斯克莱德大学、美国马里兰大学的通信原理实验课程,并结合课程组科研实践以及产业界共建伙伴的工程实例,在国家一流课程通信原理和多年的软件无线电通信实验教学的基础上,首先进行了小规模开课和课外创新活动试点。

(2) 虽然现在很多高校已经逐步采用 USRP 等软件无线电平台,但实验方式大多还是软件编程,学生不能体会到操控真实信号的感觉,对无线信号的形态缺少基本认识。其结果是,虽然通信在生活中无处不在,但通信专业学生的理论学习与工业应用相距甚远,学生常有“不知道自己在学什么”的感觉,对学习缺少兴趣和激情。

(3) 对本科生而言,通信专业上的创新门槛较高,难以进行通信创新实验。一方面是因为通信是个复杂的系统工程,导致很难找到合适的创新实验题目,或者一些题目对硬件模块的掌握程度要求很高;另一方面则是受限于本科生的理论储备水平,导致目前的通信原理实验基本上以验证型为主,难以开展综合设计型特别是创新型实验。

(4) 课容量巨大。以前仿真类课程的考核主要评判上机报告、仿真结果和验收代码。如何防止抄袭、设置合理的难度层次、进行个性化培养等对指导教师来说都是巨大的挑战和海量的工作。

总而言之,需要在实验教学中体现出建模、仿真以及现代工具,需要结合实际信号,实打实完成从理论到实际的跨越。在教学内容和教学设计上,需要考虑开放性和前瞻性。此外,还必须考虑面向 500 多人时,实际教学活动中的可行性和可操作性。

2 教学设计

2.1 平台设计

从 2009 年起,我校引入 USRP 和 PXI 软件无线电设备,尝试探索了纯软件、硬件“黑盒”、半实物通信仿真等方式。但由于设备较为昂贵,实验室虽已配备 60

余台 USRP 设备,仍然难以支撑通信工程专业 500 多人的课容量要求。只能依赖高密度的场地和设备复用,由此带来的设备发放、回收、故障维护工作量相当可观,对授课教师、管理人员和教务排课都有巨大压力。另一方面,扩充实验场地对大多数高校不具现实意义,即便配备容量足够的场地,设备投入成本也难以继。

针对这一问题,本课程引入口袋化软件无线电 RTL-SDR (Register transfer level-software definition radio, 暂存器转移层次软件定义无线电)^[12-15] (见图 1)。低廉的成本可以实现学生人手一台,随时随地对空中实际信号进行接收分析。同时还可以结合 USRP、PXI、OAI 等其他软件无线电平台^[15-16],进行特定无线信号仿真、发送和接收链路建模、搭建。另一方面,配合高端通信测试仪表,还能拓展学生嗅探频谱的范围,引导学生了解更广泛的实际工程问题。

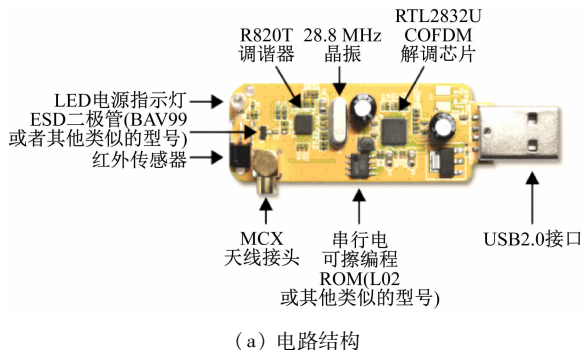


图 1 口袋化软件无线电 RTL-SDR

RTL-SDR 具有简易、低廉的优点。它由 R820T 调谐芯片、RTL2832U 解调芯片两个核心芯片组成,频率范围在 25 MHz ~ 1.75 GHz 之间,经过改造可以拓展到 100 kHz ~ 1.75 GHz,覆盖无线广播电台、ADS-B、蜂窝网络等常用系统。为了支持基于 RTL-SDR 的频谱探索,Matlab 推出专门的硬件支持包,支撑其对采集的无线信号进行处理分析,使用 RTL 进行频谱扫描和测量,其基本功能可与昂贵的高档频谱仪相近。

2.2 内容设计

需要解决的问题是如何通过真实的通信,使学生内化学过的理论,进而转化为建模与仿真能力。例如,通信原理的大部分理论原理均基于连续时间和连续频率,而目前数字化的通信硬件中,均采用了基于离散时间和离散频率的实现方式,初学者难以将理论原理映射到通信的数字实现上。引入软件无线电系统和真实

信号后,课堂可以着眼于实际系统中的具体问题,既有理论建模,又有通信仿真,并通过建模设计和软件无线电链路搭建,可以打通各个知识节点,夯实对理论的理解,提升综合能力。

以图 2 所示的“载波同步”为例。学生在通信原理理论课中已经学过载波同步的概念及其理论原理。教师先回顾理论课对载波同步的理论建模,分析其影响,然后给出解决该问题的设计,最后进行仿真并结合真实信号搭建真实链路。用类似这样的例子打通理论与实验,融合虚拟仿真与真实信号,填补传统课程不易达到的能力培养洼地。

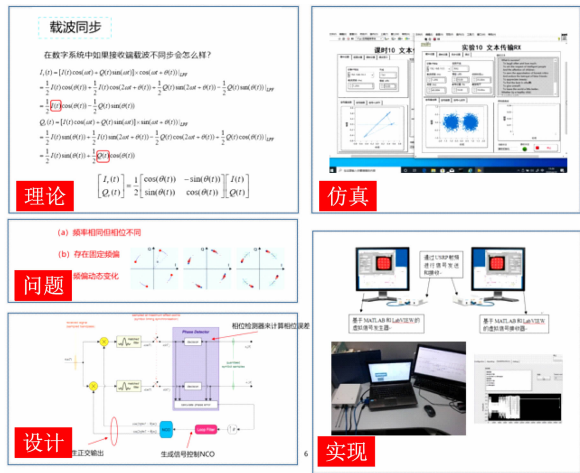


图 2 理论与实验密切结合的实例(同步问题)

此外,通过产教融合引入了大量的工程实例,由教师引导学生对实际生活中的案例抽茧剥丝分析问题、解决问题。例如,图 3 所示的教学案例是分析雷达信号频谱引出本振泄露,图 4 所示为北京某小区停车门禁干扰 GSM 上行的案例。

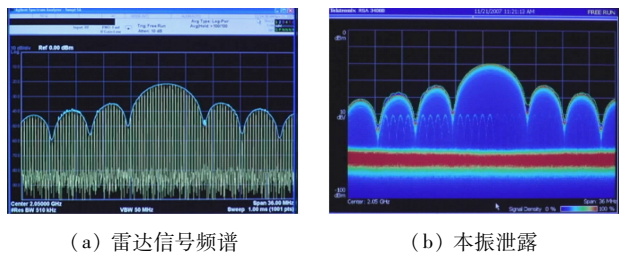


图 3 真实雷达信号频谱和本振泄露案例分析

学生主动学习、自主探究。在大规模引入口袋软件无线电后,对传统的课堂教学进行多维扩展,将实践环节完全融入理论教学环节之中。

(1) 泛在实验和常态化的混合式教学。强调“学中做,做中学”,打通第 1 和第 2 课堂。学生不再受实验室空间、时间的限制,可以自由携带、操作,随时有想法,随时做实验,不但可以对理论知识进行直观验证,加深理解,辅助学习,也可以应用于小组讨论、问题导向学习和创新项目之中。

这种“泛在”的实验可以自然对接线上线下混合式教学。理论讲解无需拘泥于线上或线下,而是侧重于学生完成知识内化后,对实际链路的搭建和实际信号的分析。在线下课堂中,广泛应用了智慧互动教室,实现收发互动、形成活跃讨论气氛,改变教学枯燥、单向的局面,显著增加了课堂互动和教学翻转,提升了学习主动性。

(2) 现场对抗式考核和“积分制”过程评价方法。基于人手 1 台的软件无线电设备,可以实现师生、学生通信收发互动或通信对抗,增加了竞争和趣味性,同时也带来了考核的新方式。传统考试普遍是一张试卷限时答题,虽然能很好地测评理论掌握程度,但难以体现学生将理论知识应用于真实工程实践的能力。同时,传统考试的一个痼疾是部分学生存在刷题、内卷现象。

为此,改革考虑用实在的真实信号测评学生的实在能力。期末考评使用老师发送信号,学生对特定通信信号进行软件无线电接收并分析。以“调制方式甄别”实验为例,教师现场使用 USRP 发送一个未知信号,学生独立进行接收、分析,推测该信号的解调方式乃至发送内容。教师根据学生甄别结果的正确率、完成速度、记录和分析情况进行打分。这个实验还可以升级为户外户内结合、红蓝对抗的竞争性活动,通过竞争比赛实现考核。

最终考核设置采取“积分制”“闯关制”,强调过程管理,同时对学生不同方面的能力具有兼容性。以“积分制”为例,期末分数包括各个过程项目的积分、附加分、现场考核分等多个得分项。过程项目在教学过程中实时发布,发布时告知截止提交时间、分值、要求,学生可以根据个人要求、兴趣特长有所侧重。这种“积分制”对任何分项都不做强制要求,强调个性化,兼顾不同学生的学习基础和发展要求;现场对抗提升考核质量,减少抄袭现象。

3 教学效果

3.1 学生获得感高

通过转换学习主体,以学生探究为主,充分结合日常实际,显著提升了学生的参与度和获得感。在具备一定的难度系数和严格考核下,学生仍表现出了巨大

2.3 教学模式设计

教学设计需要提升学生兴趣,创新实验方式,引导

图 4 北京某小区 RFID 门禁 915 MHz 系统干扰 GSM 上行

热情和较高的自我认可。学生问卷分析表明,课程的整体满意度达到94.8%,认为自己能力得到提升的比例为100%。与此同时,高满意度并不是因为课程难度放水,学生认为自己没有“划水”的程度达到90.6%,认为“作业能自我探究和展现能力”为91.6%,对课程内容的挑战度评级达到87.6%,独立思考和创新质疑达到97.4%。学生对作业的难度评级为73.6%,对助教和过程管理依赖度高达97.4%。在对混合式教学的反馈中,线上理论教学的效果得分82.6%,主要受益于理论问题的反复咀嚼,但是有相当比例的学生苦于节奏快于课堂教学。教学互动受益得分高达98%。

学生普遍有正面感受,获得感强。具体主观反馈例如“保持现在既有理论深度,又有接地气的实验风格,而且理论不是深不可测,而是确实可操作、直观可理解且有趣”“这门课给我的帮助非常大,学习到了很多干货,是非常有价值又愉快的课程”“这门课是最有收获的课”。

特别值得一提的是,有学生认为“这个好像比王者荣耀有意思多了”,这实际上也是一种课程思政的效果。说明本课程激发了学生的学习兴趣,提高了学习热情,实现了“让学生动起来,让课堂活起来”。

3.2 实现了泛在学习

2020年春季学期开课正值新冠疫情肆虐之时,本课程“泛在实验”的特点发挥了突出的优势。虽然学生分散在全国各地,但每个城市都有大量的真实无线信号可以作为实验资源。比如解析机场塔台对话、分析无线车钥匙、对讲机等。学生可以就地通过口袋化的软件无线电设备对当地实际信号进行录制、分析等。还鼓励学生积极调试自己的设备,用设备收听中国无线电协会发起的无线电爱好者抗疫活动。学生们调代码、调设备,既是为本课程中的实验任务调测着急,也是为疫情揪心。

4 结 语

为了使通信原理理论教学所学的原理工程落地,对标5G/B5G通信人才需求,通过软件无线电建设了“通信系统建模与仿真”这样一门理论高度融合实践的课程,旨在使学生建立通信“系统”的概念,掌握通信建模与仿真基本方法,通过软件仿真、硬件实物/半实物仿真,完成对特定通信模型的搭建。教学改革的主要特点包括:①运用建模与仿真来分析研究空中真实无线电信号,打通理论与实验,融合虚拟仿真与真实信号,填补了传统教学存在的能力培养洼地;②通过实际环境中的信号、教师发出的任意信号,以相互收发、通信对抗等方式实现了深度的教学互动;③基于

口袋化的软件无线电设备以及无处不在的真实无线电信号,实现了泛在学习;④通过积分制、闯关制、现场识别、现场对抗、线上实验库等,构建了多维的考核方式。

致谢:在此感谢NI、Mathwork、曾益慧创、泰克、华为、中国移动研究院等单位提供的帮助和支持。感谢Mathwork公司Mike McLerno先生和马里兰大学Steve Tretter教授对教学建设做出的指导。

参考文献(References):

- [1] 傅志中,李晓峰,曹永盛,等. 通信原理实验教学改革与探索[J]. 实验室研究与探索, 2020,39(5):156-159.
- [2] 徐彦凯,双凯,姜珊. 通信原理实验教学的探索[J]. 实验室研究与探索, 2011,30(6):329-331,348.
- [3] 杨克虎. 虚实结合的分层次通信原理实验教学体系探讨[J]. 实验技术与管理, 2017,34(7):162-165.
- [4] 刘云飞,田华明,黄子革,等. 通信原理与系统实验室建设与实践[J]. 实验技术与管理, 2018,35(1):256-258.
- [5] 李莉,赵蓉,项东. 通信原理综合实验教学改革的实践[J]. 实验室研究与探索, 2015,34(8):179-181.
- [6] 程春霞,宫锦文,高建宁. 通信原理设计型实验的探索与实践[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(3):55-58.
- [7] 孙爱晶,刘毓. 基于软件仿真的通信原理实验教学[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(1):141-143.
- [8] 屈代明,徐争光,李玮. 虚拟仿真与在线实境技术在通信原理实验教学中的应用[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(12):213-217.
- [9] 魏建军,刘乃安,陈付龙,等. 基于半实物仿真的“通信理论与技术”实验[J]. 电气电子教学学报, 2018,40(4):128-131.
- [10] 杨宇红,袁焱,田砾,等. 基于软件无线电平台的通信实验教学[J]. 实验室研究与探索, 2015,34(4):186-188.
- [11] 许晓荣,李光球,章坚武. 无线信道仿真在通信原理实验教学中的研究[J]. 实验室研究与探索, 2012,31(4):262-266,291.
- [12] Shravan M, Rakshit R, Sanjana P, et al. RTL SDR ADS-B data analysis for predicting airports and ATS routes [C]//2020 International Conference for Emerging Technology (INCET). Belgaum, India: IEEE. 2020: 1-7.
- [13] Stewart R W, Barlee K W, Atkinson D S W, et al. Software defined radio using Matlab & simulink and the RTL-SDR [M]. Glasgow, UK:Strathclyde Academic Media, 2015.
- [14] Fanan A, Riley N, Mehdawi M, et al. Comparison of spectrum occupancy measurements using software defined radio RTL-SDR with a conventional spectrum analyzer approach [C]//2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR). Serbia, Belgrade: IEEE, 2015: 200-203.
- [15] 王晓丽,鲁旭涛,孙运强,等. 基于NI USRP与RTL-SDR的无线通信收发系统的实现[J]. 国外电子测量技术, 2017,36(10):81-85.
- [16] 王子凡,温向明,陈亚文,等. 面向5G无缝连接的云无线接入网系统及实现[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(5):143-148,158.