



“无线通信原理”实践课程设计

陈平平, 苏宠宠, 郭里婷

(福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350108)

摘要: 针对现有教学以课堂授课为主要形式的状况, 该文对“无线通信原理”的实践课程设计进行了讨论。该课程以二维图像为输入输出的通信系统作为实验对象, 该系统涵盖信源编码、信道编码、调制解调和信道等模块。通过学生自主设计, 深化对信息传输基本流程和不同信道影响的理解, 同时提高实践能力。相对于传统实践课程, 该实践课程更注重整个通信系统的设计, 并引入 5G 时代先进的低密度奇偶校验码技术, 加深学生对通信系统的理解, 并对传输性能有直观的体验, 为无线通信实践型人才培养提供新思路。

关键词: 无线通信; 实践课程; 学生自主设计; 信源编码; 信道编码

中图分类号: TN911

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230620

Practical Course Design in Wireless Communication Principles

CHEN Pingping, SU Chongchong, GUO Liting

(College of Information and Physic, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In response to the predominant issue of traditional classroom-based teaching, this paper discusses the practical course design for “Wireless Communication Principles”. The course focuses on a communication system with two-dimensional images as input and output, covering modules such as source coding, channel coding, modulation and channel modeling. Through student-driven design, it enhances the understanding of the fundamental information transmission processes and the impact of different channels, concurrently improving practical skills. In contrast to conventional practical courses, it emphasizes the design of the entire communication system. It introduces advanced low-density parity check(LDPC) coding technology from the 5G era, which deepens students’ understanding of communication systems and provides an intuitive experience of transmission performance. This approach offers new perspectives for cultivating practical talents in wireless communication.

Key words: wireless communication; practical course; student-driven design; source coding; channel coding

无线通信原理是研究通过无线介质传递信息的基本规律和技术原理的课程。随着 5G 技术商用推广和 6G 技术研发, 无线通信取得显著进展, 实现更高速数据传输、更低时延和更多设备连接。无线通信原理在物联网、手机通信、智能家居、自动驾驶等领域广泛应用; 在医疗、农业、教育等领域扩展, 为社会创新和数字化转型提供强大支持, 推动新一轮科技革命和产业升级。因此, 无线通信的技术型人才培养、促进学生无线通信原理的实践, 是中国工科高校研究生综合培养体系的重要任务^[1-4]。

近年来, 无线通信原理的实践课程发展势头

强劲, 但强调的重点、具体的内容覆盖范围和实际组件方面存在差异。文献 [5-6] 提出网络拓扑规划、容量规划等信道规划的虚拟仿真无线通信实验平台, 致力于促进学生理解各种通信环境和无线网络参数对用户业务质量的影响, 从而按照要求进行性能优化。文献 [7] 针对实验教学资源不足、设备昂贵、维护困难以及学生对通信系统缺乏全面理解等问题, 设计了“无线通信系统设计与性能分析”的虚拟仿真实验, 通过模拟实验需要的各种仪器和真实的信道环境, 促使学生通过调试仿真的硬件获得各类信道数据, 从而对信道环境有直观的了解。文献 [8-9] 在模拟信道环境的

收稿日期: 2023-12-25; 修回日期: 2024-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(62171135); 福建省教育厅重点攻关项目(2023XQ004); 福建省自然科学基金项目(2023J01399); 福州大学优质课程建设项目《无线通信原理》(2021 年 11 月)。

作者简介: 陈平平(1986-), 男, 博士, 教授, 主要从事 5G 无线通信方面的研究。E-mail: ppchen.xm@gmail.com

基础上加入信源、调制与解调 3 个模块, 研究不同通信场景下接收端的误码率来促进学生理解信道环境对通信的影响, 为无线通信实践型人才培养提供构建系统的新思路。

综上所述, 目前国内外关于无线通信原理的实验实践课程侧重于信道的模拟, 对传输、信源编解码与信道编解码的整体系统实验不多; 且传送信息多为简单的二进制字符, 实验结果不够形象; 使用的编码方式较简单, 如采用经典汉明码等线性分组码, 实验的先进性不足。信源编解码、信道编解码是通信系统的必备模块, 分别提高传输的有效性和可靠性。因此本文实验系统选用联合图像专家组(Joint Photographic Experts Group, JPEG)和低密度奇偶校验(low-density parity check, LDPC)码分别作为信源编码方法和信道编码方法, 接收端进行相应的解码, 从而对典型的通信信号处理流程进行基于 MATLAB 平台的仿真设计。这使得修读这门课程的同学通过实验过程和实验结果的分析, 理解信源编解码和信道编解码的原理、作用和性能。此外, 本文实验系统选用图像作为信源, 实验结果更加直观、形象, 更利于学生观察和体验编码性能。

1 二维图像的无线传输系统

一个无线通信系统的基本组成包括信源、信源编码、信道编码、调制、无线信道、解调、信道解码、信源解码和信宿。信源负责生成数字信号, 通过信源编码减少信息冗余、提高数据传输效率。信道编码通过添加冗余提高数据传输的可靠性。调制将数字信号转换为模拟信号, 适应无线信道的传输特性。在无线信道中, 信号可能受到衰减、干扰等影响, 是系统设计的重要挑战。解调阶段负责还原模拟信号, 经过信道解码还原为数字信号。最终, 信源解码还原原始信号, 送达信宿。

完整的系统设计如图 1 所示。通信系统中涉及的二维图像格式众多, 包括 JPEG、便携式网络图像(portable network graphics, PNG)和位图(bitmap, BMP)等。由于 JPEG 和 PNG 本身已经是压缩过的图像格式, 再次进行压缩可能导致信息损失或对比效果不显著。因此, 本课程使用 BMP 格式进行图像传输。BMP 图像保留原始的二进制数据, 可通过 JPEG 压缩进行信源编码。

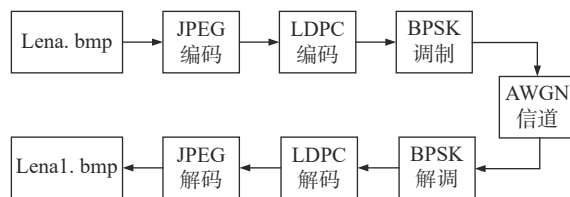


图 1 无线通信系统框图

无线通信环境相对于有线环境, 噪声和干扰更加严重, 并且信号传输存在多径传播的特性, 对发送信号产生更加严重的影响, 接收误比特率更高, 传统的、较简单的线性分组码、循环码或卷积码的纠错能力不足。因此本实验采用更先进的信道编码 LDPC 作为纠错码, 以应对无线通信环境下的高错误率。LDPC 码编码方式与简单线性分组码相似, 而解码算法将会在课程中给出相应的理论解释和具体的解码公式。进行信道编码后, 还需要进行调制。为降低与信道编码的结合难度, 本文实验选择二进制相移键控调制(binary phase shift keying, BPSK)方式。

真实场景中的信道环境呈现出多样性和复杂性。多径效应导致信号的多个路径传播, 引起时变性和幅度相位变化。阴影衰落由建筑、地形等引起, 导致信号强度不均匀。衰落和噪声是信号传播过程中常见的影响因素。本文实验所模拟的信道是含有加性高斯白噪声(additive white gaussian noise, AWGN)和一个衰落因子的信道。

2 系统实现

2.1 信源与信宿

在无线通信系统传输的二维图像有多种格式, 在本课程中使用的是较为简单的 BMP 图像。BMP 是一种无损图像文件格式, 以像素为基础, 将图像以二进制形式存储, 保留所有像素信息。BMP 文件通常包含图像的颜色表和像素数据, 支持单色、16 色、256 色和真彩色图像。

在实验设计的系统中, 信源先对该图像进行数据分析, 使用串并转换将二维数据转化为一维比特流发送。相应地, 信宿在接收到经过恢复的一维比特流后, 也需要将其转化为二维数据并且生成图像。信源与信宿图像的显著对比, 能够使学生在实验过程中获得更加直观的系统性能判断。

2.2 信源编解码

信源编码是将信息源输出进行编码以减小传输或存储的技术。为提高系统传输 BMP 图像

的有效性, 本文实验采取了 JPEG 编码。文献 [10] 给出 JPEG 的基本编解码过程, 如图 2 所示。其编码过程包括将图像转换至亮度分量与色度分量 (luminance (Y) and chrominance (Cb and Cr), YCbCr) 颜色空间, 进行亮度和色度分量的采样, 接着通过离散余弦变换 (direct cosine transform, DCT) 将图像变换到频域, 然后进行量化和熵编码。在量化中, 高频部分的系数被量化为较小的值, 引入了信息损失, 随后进行熵编码。最终, 生成 JPEG 文件存储图像信息、采样方式、量化表和编码数据。JPEG 的解码过程则涵盖从 JPEG 文件中读取信息, 进行熵解码、逆量化和逆 DCT, 最终得到还原后的图像, 尽管在压缩和解压缩过程中存在信息损失。整个过程旨在实现高效的图像压缩和还原。

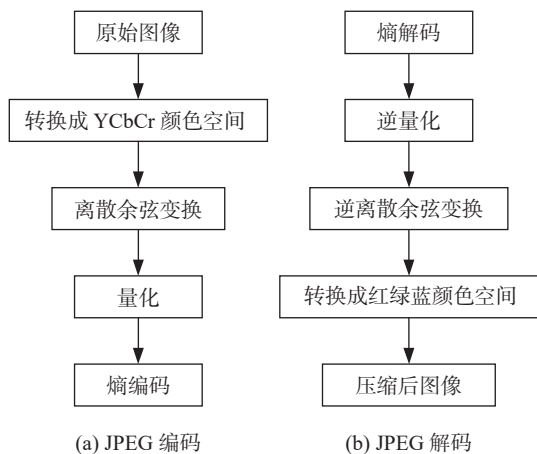


图 2 JPEG 编解码图

JPEG 编码和解码是一套复杂而精确的过程, 通过颜色空间转换、离散余弦变换、量化和熵编码等步骤, 在保持图像质量的同时实现了显著的压缩。这一标准广泛应用于数字图像的存储和传输, 为平衡图像质量和文件大小提供了有效的解决方案。

2.3 信道编解码

信道编码是通过添加冗余信息以提高数据传输可靠性的技术。常见的信道编码包括 LDPC 码、Polar 码、Turbo 码等, 这些编码方法在差错纠正方面具有多样性, 并根据通信环境的需求提供了灵活的选择。由于 LDPC 码逼近香农限^[11]且与线性分组码编码方式相近, 因此本实验选用 LDPC 码进行信道编码。

假设系统欲将 k 位信息编码成为 n 位码字, 则 LDPC 码编码首先生成一个 $(n-k) \times n$ 的稀疏矩阵并

且对该矩阵进行消除短环处理。其次, 以该稀疏矩阵为校验矩阵, 根据线性分组码中校验矩阵和生成矩阵的结构关系产生生成矩阵。接着, 对生成矩阵进行系统化, 确保码字中包含完整的原始信息。最后, 将原始信息与生成矩阵相乘, 得到要传输的码字:

$$c = m \cdot G \quad (1)$$

式中: c 是生成的码字, m 是原始信息, G 是根据校验矩阵所形成的生成矩阵。

LDPC 码软判决的基础解码算法分为两类, 一是基于概率域的置信度传播解码算法^[12], 二是基于对数概率域的对数置信度传播 (log-domain belief propagation, Log-BP) 算法^[13]和最小和 (min-sum, MS) 算法^[14-15]。由于 BP 算法和 Log-BP 算法复杂度很高, 因此实验选择性能稍有损失但复杂度低的 MS 算法进行解码。

LDPC 码与其他线性分组码的最大区别在于校验矩阵的低密度性, 为更好利用校验矩阵行列之间的约束关系, 研究人员引入坦纳 (Tanner) 图。如图 3 所示, 一个方形的校验点代表校验矩阵的一行, 一个圆形的变量点代表一列, 连线行与列由矩阵元素 1 所连接, 校验点和变量点之间进行外信息传递。

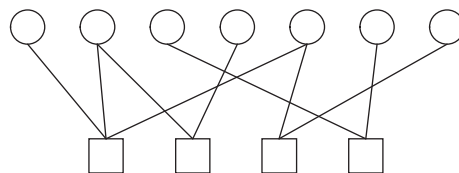


图 3 Tanner 图

当更加正确的外信息在校验点和变量点之间迭代后, 每个变量点都能够获得较为准确的概率信息, 从而提高解码的准确性。其解码步骤分为以下 4 个过程。

1) 信息初始化

假设经过含有衰落因子的 AWGN 信道后, 接收端收到的信号为:

$$y_i = hx_i + n_i, i \in \{1, 2, \dots, k\} \quad (2)$$

式中: y_i 为接收到的信息, i 表示第 i 行, h 为信道衰落因子, x_i 为发送端信息, n_i 为信道噪声。

计算初始信道信息后, 将该信息作为变量点的初始外信息:

$$L_{v_j \rightarrow c_i} = C_{v_j} = 2y_i / \sigma^2, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

式中： $L_{v_j \rightarrow c_i}$ 表示第 j 个变量点传给第 i 个校验点的外信息， C_{v_j} 表示信道信息， σ 是噪声的均方差。

2) 更新校验点外信息

更新校验点的外信息表达式为：

$$L_{c_i \rightarrow v_j} = \prod_{v_b \in N(c_i) \setminus v_j} \text{sign}(L_{v_b \rightarrow c_i}) \min_{v_b \in N(c_i) \setminus v_j} |L_{v_b \rightarrow c_i}| \quad (4)$$

式中： $L_{c_i \rightarrow v_j}$ 表示第 i 个变量点传给第 j 个校验点的外信息； $v_b \in N(c_i) \setminus v_j$ 表示除了第 j 个变量点以外，与第 i 个校验点相连的所有变量点的集合。

3) 更新变量点外信息

更新变量点外信息表达式为：

$$L_{v_j \rightarrow c_i} = \sum_{c_a \in N(v_j) \setminus c_i} L_{c_a \rightarrow v_j} + C_{v_j} \quad (5)$$

式中： $c_a \in N(v_j) \setminus c_i$ 表示除了第 i 个变量点以外，与第 j 个校验点相连的所有变量点的集合。

4) 计算后验概率并判决

计算后验概率表达式为：

$$Ln_{v_j \rightarrow c_i} = \sum_{c_a \in N(v_j)} L_{c_a \rightarrow v_j} + C_{v_j} \quad (6)$$

式中： $Ln_{v_j \rightarrow c_i}$ 表示变量点的后验概率， $c_a \in N(v_j)$ 表示与第 j 个校验点相连的所有变量点的集合。

对后验概率进行判决后，得到的码字若与校验矩阵的转置乘积为零或达到最大迭代次数，则退出迭代，否则返回步骤 2。

2.4 调制与解调

在数字通信系统中，调制可以将数字信号转换为适合传输的模拟信号，常见的数字调制技术有 BPSK、正交相移键控 (quadrature phase shift keying, QPSK)、正交幅度调制 (quadrature amplitude modulation, QAM) 等。BPSK 调制作为一种基础的数字调制技术，实现简单且性能出色，在通信链路中的抗噪声性能表现良好，适用于各种环境，尤其在低信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 条件下仍能实现可靠的数字通信。

BPSK 调制过程中，将数字比特 0 和 1 分别映射到 1 和 -1，表达式为：

$$x_j = 1 - 2c_j \quad (7)$$

式中： x_j 表示调制信号的第 j 个符号， c_j 表示经过信道编码后二进制码字的第 j 个比特。

解调过程则对应将 1 和 -1 映射到 0 和 1，接着进入 LDPC 解码环节。由于 LDPC 解码直接利用未解调的接收端信息计算比特为 0 和 1 初始对

数域先验概率比，故实际程序中无需进行解调。

2.5 信道模拟

在设计无线通信实验时，信道模拟是不可或缺的组成部分，能够帮助学生理解在真实通信环境中信号传输的复杂性。在本文实验中，选择 AWGN 信道和一个衰落因子 h 进行模拟，从而更贴近实际通信环境的特性。

首先，AWGN 信道是一种常见的理想化模型，它考虑了在传输过程中引入的随机噪声，这种噪声主要由环境、设备和其他无线信号引起。通过引入 AWGN，实验旨在模拟这种噪声，使学生在不同信噪比下评估信号的可靠性。其次，衰落因子是模拟信号在传播过程中遭受的衰落效应的关键因素。信号在传输途中可能受到多径传播、多路径衰落等因素的影响，导致信号强度的变化。而衰落因子 h 通常用于瑞利信道中描述信号的衰落情况，它表示了信号在传输过程中受到的随机衰减程度。本实验中衰落因子 $h = 1$ 时表示无衰落，若 $h < 1$ 则衰落因子越小，衰落程度越大。

综合考虑 AWGN 信道和衰落因子，学生将进行一系列实验，如评估不同信噪比下图像的质量和衰落对信号的影响。这样的实验设计不仅培养了学生对无线通信理论的深刻理解，同时锻炼了他们在实际工程中应对不同信道条件的能力。

3 实验结果分析

在通信系统设计的复杂背景下，我们深入研究了不同参数下的图像传输性能，从图像的压缩、JPEG 压缩参数的调整、LDPC 编码的应用，到信道条件下的影响，这一系列实验旨在深刻理解通信系统在现实场景中的运行和优化。

3.1 信源编码性能分析

首先将焦点放在图像压缩与未压缩的对比上，这为我们提供了一个初始的比较基准。如图 4 所示，通过比较 JPEG 压缩后的图像与未经过压缩的图像，我们发现在保持相对高质量的前提下，JPEG 压缩技术能显著减小图像文件的大小，从而实现更为高效的数据传输。

JPEG 编码中的量化步长是指将图像的变换系数量化为离散的值时所采用的步长大小。在 JPEG 压缩中，DCT 被用来将图像转换为频域中的系数，然后通过量化过程将这些系数近似为离散的整数值。量化步长决定了量化过程中的精度，

步长越大表示精度越低, 会导致更多的系数被舍弃, 从而实现图像的压缩。因此, 量化步长在 JPEG 编码中影响着图像的质量和压缩率。为验证 JPEG 压缩过程中量化步长的调整对图像质量的影响, 我们对比不同压缩比下的图像大小和均方误差(mean square error, MSE)。如图 4 和表 1 所示, 量化步长 a 越小, 图像保留的信息越多, MSE 越小, 图像质量越高, 但伴随较大的文件尺寸; 相反, a 越大, MSE 越大, 图像信息减少, 但文件尺寸相对较小。这表明在 JPEG 压缩中需要根据实际需求在图像质量和传输效率之间进行取舍。



图 4 JPEG 压缩前后对比图

表 1 4 种量化步长的图像大小与质量

量化步长	图像大小/KB	MSE
原始图像	769	0.00
2	29	81.14
4	18	298.90
8	11	839.84

3.2 信道编码性能分析

本文实验对比不同信道编码情况、不同信噪比和衰落因子的均方误差值, 如表 2 所示。首先, 无信道编码情况下的图像 MSE 明显高于经过信道编码的图像 MSE, 而使用码长 4096、码率 0.5 的规则 LDPC 码编码后的图像质量略差于同样码长码率的非规则 LDPC 码编码的图像质量。其次, 随着信噪比的增大, 图像 MSE 数值明显减小, 表明图像质量更高。而在码长 4096、码率

0.5 的非规则 LDPC 码编码情况下, 随着衰落因子的减小, 信道衰落程度增大, 图像的 MSE 数值迅速增大, 图像质量下降。

表 2 不同信道编码与信道环境下的图像 MSE

信道编码	信噪比/dB	衰落因子	MSE
无	1	1.00	42424.61
无	5	1.00	30857.64
无	11	1.00	1063.28
无	15	1.00	81.14
规则LDPC	-1	1.00	29231.00
规则LDPC	0	1.00	1085.95
规则LDPC	1	1.00	81.14
非规则LDPC	-1	1.00	22389.50
非规则LDPC	0	1.00	994.63
非规则LDPC	1	1.00	81.64
非规则LDPC	0	0.95	1256.83
非规则LDPC	0	0.90	1494.74
非规则LDPC	0	0.80	39225.83

为更好地验证不同信道编码、信噪比和衰落因子对图像传输的影响, 在无信道编码的传输图像的仿真结果如图 5 所示。随着信噪比增大, 图像的清晰度显著提升, 图像质量更好。如图 6 所示, 规则和非规则 LDPC 码也体现出图像质量随着信噪比增大而提高的趋势。相同的低信噪比下的非规则码比规则 LDPC 码的图像清晰。采用非规则的 LDPC 码编码、信噪比为 0 时, 图像在不同衰落因子的信道中的传输情况如图 7 所示。可以看到, 随着衰落因子的减小, 图像清晰度降低, 图像质量变差。

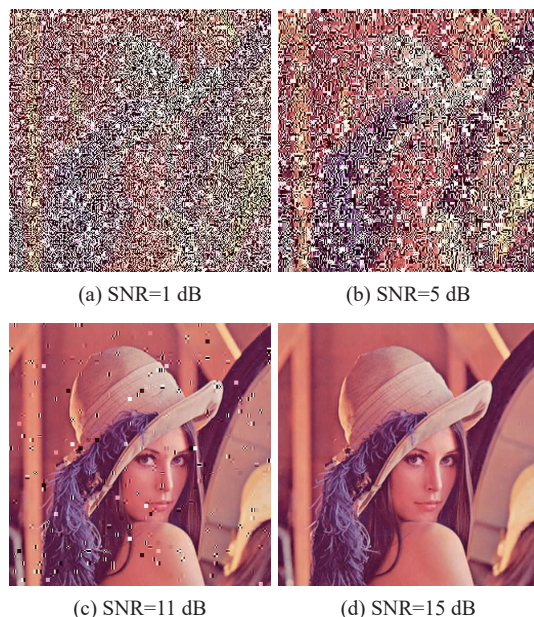


图 5 无 LDPC 编码不同信噪比结果对比图



图 6 规则与非规则 LDPC 编码不同信噪比结果对比图



图 7 非规则 LDPC 编码不同衰落因子结果对比图

通过比较有无 LDPC 码和不同信噪比条件下接收图像的质量，验证了 LDPC 码对提升传输性能的显著作用。信道噪声较大时，经过 LDPC 编码的图像能够更好地维持质量，展现了其强大的纠错能力。通过对比规则与非规则 LDPC 码进行编码的图像质量，验证了不同码型会对译码性能产生影响。而比较不同衰落因子和信噪比条件下接收图像的质量，验证了信道噪声的增大和衰落程度的增大均会对接收图像的质量产生严重影响。

总的来说，本文实验的通信系统设计中涵盖多个关键领域，为学生提供了全面而深入的学习体验，既强化了学生对通信系统理论的理解，同时也培养了实际工程中解决问题和优化系统的能力。

4 实验教学内容设计

由于 MATLAB 平台具有完备的图像处理功能，实验选用该平台进行仿真，锻炼学生编程能力与发现、分析并解决问题的能力。学生在对通信系统进行仿真并考察系统性能的同时，能够深入理解无线通信系统的基本原理与技术，培养搭建、调试和优化无线通信系统的能力，加强其对信道特性、调制解调、信源编解码、信道编解码等关键概念的理解。

根据上述无线通信系统及实现方案，结合教学目的，规划如表 3 所示的实验内容及实验目标。整个课程包含 20 学时，绪论占 2 学时，用于讲解实验意义、系统框架、布置实验任务和安排实验分组等；信号调制与解调实验、信源编解码实验、信道建模实验、信道编解码实验共占 13 学时，是无线通信系统的重要实验；系统综合实验占 5 学时，需要搭建完整的通信系统并且进行性能分析和优化。每个实验学时包括理论讲解、实验操作、数据分析和讨论环节，确保学生在理论和实践中能全面掌握无线通信原理，为未来的学术研究和职业实践夯实基础。实验目标包括深刻理解通信系统原理、领悟信源信道编解码的意义、提高实际操作能力、强化对关键技术的理解和应用，培养解决实际问题和系统优化的能力。

表3 实践课程设计

序号	实验内容	实验目标	学时
1	绪论	讲解实验意义、讲解系统框架、布置实验任务和安排实验分组等	2
2	信道建模实验	了解高斯白噪声信道和瑞利信道的特性及其影响	4
3	信源编解码实验	掌握JPEG的信源编解码原理与过程	3
4	信道编解码实验	掌握LDPC码的编解码的原理与过程	4
5	信号调制解调实验	学习并实践常见的调制技术,如BPSK	2
6	系统综合实验	结合前述知识,搭建完整的无线通信系统并进行性能优化	5

5 结束语

随着5G、6G通信的发展,无线通信原理实践课程已逐渐在国内高校普及,但这些实践课程大多侧重于信道的建模与网络的规划,对整个系统的全面关注较少。因此,本文介绍和探讨无线通信原理实践课程的教学改革,通过对课程内容、教学方法和学生参与度的优化,致力于提升学生的实际操作技能和理论应用能力。在实践课的设计中,充分考虑了学生已有的知识背景和对通信原理的理解水平,通过设置多个有机衔接的实验环节,使学生能够逐步深入学习无线通信系统的核心概念,并给出实验教学设计。

实验教学以有机衔接的方式设计,形成渐进学习过程,通过逐步延伸和深化实验内容,使学生逐步理解和应用无线通信原理的核心概念,构建知识体系,提高学科整合能力。教学注重培养学生实际操作技能,通过搭建无线通信系统、调试参数和性能分析等活动,转化理论知识为实际操作能力,培养学生在工程实践中的独立操作和问题解决能力。教学使用图像作为输入,促使学生更直观地感受通信系统差异。同时引入先进技术和工具,如JPEG压缩和更适合信道传输的LDPC码,使学生了解最新研究进展,培养创新意识,为提升系统性能打下良好的基础,提高对未来通信领域发展趋势的认知。这一全面的实践教学设计旨在为学生提供深入学习体验,使其具备无线通信领域的理论基础和实际操作能力。

参考文献

- [1] 肖振宇. “通信原理”课程的科教融合教学模式探讨[J]. *工业和信息化教育*, 2023(11): 19-23.
- [2] 王勤, 饶文贵, 唐红文. 面向新工科的通信工程专业课程设计教学探索[J]. *中国现代教育装备*, 2023(19): 90-92.
- [3] 李奕彤. 无线通信实验教学设计及其持续改进研究[J]. *科学咨询(科技·管理)*, 2022(7): 47-49.
- [4] 庞玉凤. 基于互联网的无线通信原理课程案例库设计[J]. *集成电路应用*, 2021, 38(10): 176-177.
- [5] 陈美娟, 张颖. 基于虚拟仿真的无线网络优化实验设计[J]. *实验科学与技术*, 2021, 19(6): 49-53.
- [6] 陈美娟, 朱晓荣, 沈建华, 等. 基于成果导向教育理念的无线通信网络实践课程教学模式探索[J]. *实验室研究与探索*, 2020, 39(8): 166-170.
- [7] 李想, 刘乃安, 付卫红. 无线通信系统设计与性能分析虚拟仿真实验教学研究[J]. *工业和信息化教育*, 2022(10): 50-54.
- [8] LIU X, ZHAO H, ZHU X. A personalized online experiment platform for mobile communication course[C]//2023 IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT). Orem, UT, USA: IEEE, 2023: 350-352.
- [9] 刘思聪, 肖亮. 面向5G的“无线通信原理”教学改革探索[J]. *高教学刊*, 2020(35): 132-135.
- [10] 张元伟, 刘彦隆. 基于JPEG标准的静态图像压缩算法研究[J]. *电子设计工程*, 2010, 18(2): 78-80.
- [11] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2001, 5(1): 3-55.
- [12] 邓莉. LDPC编译码算法设计与应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [13] 王若桐. 低密度奇偶校验码译码算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2024.
- [14] 唐锐. LDPC码的编译码算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [15] 曹夏薇. LDPC译码算法的优化与设计[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023.

编辑 钟晓