



# 基于 GNURadio 与 USRP 的 OFDM 无线通信系统实验

武 畅<sup>1</sup>, 焦曙阳<sup>1</sup>, 钱程东<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学 信息与通信工程学院, 成都 611731; 2. 飞腾信息技术有限公司, 天津 300450)

**摘要:** 针对目前无线通信课程内容侧重讲述基本理论推导, 相关实验多关注模块功能仿真, 缺乏系统性和真实场景的问题, 提出了以 GNURadio 软件和通用软件无线电外设(USRP)硬件平台为基础的正交频分复用(OFDM)无线通信系统实验。该实验内容包括掌握 OFDM 的基本原理、搭建 OFDM 收发系统、分析相关通信性能和完成硬件系统, 最后在实际无线通信场景中完成测试, 实现实时视频传输。通过软件系统和硬件平台的协同, 学生能充分了解无线通信的基本原理、各通信模块的使用、无线通信系统的架构以及相关的性能分析方法, 完成从理论基础到工程应用、从模块验证到系统实现、从理想环境仿真到实际场景测试的跨越, 从而全面提升工程素养。

**关键词:** GNURadio; 通用软件无线电外设; 正交频分复用; 无线通信; 视频传输

中图分类号: TN85

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20230520](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20230520)

## OFDM Wireless Communication System Experiment Based on GNURadio and USRP

WU Chang<sup>1</sup>, JIAO Shuyang<sup>1</sup>, QIAN Chengdong<sup>2</sup>

(1. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Phytium Information Technology Co. Ltd. Tianjin 300450, China)

**Abstract:** In response to the lack of systematic and realistic scenarios in the current wireless communication course, which only focuses on basic theoretical derivation and module function simulation, an orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) wireless communication system experiment based on GNURadio software and universal software radio peripheral (USRP) hardware platform is proposed. The experiment includes mastering the basic principles of OFDM, building an OFDM transceiver system, analyzing relevant communication performance, completing the hardware system, and finally conducting real wireless communication tests to achieve real-time video transmission. Through the synergy of software systems and hardware platforms, students can fully understand the basic principles of wireless communication, the use of various communication modules, the architecture of wireless communication systems, and related performance analysis methods. This experiment spans from theoretical foundation to engineering application, from module verification to system implementation, from ideal environment simulation to actual scenario testing, and comprehensively improves engineering literacy.

**Key words:** GNURadio; USRP; OFDM; wireless communications; video transmission

自从进入信息化时代以来, 无线通信技术迅猛发展, 其相关应用已经深入到国民经济的各个层面。无线通信系统已经成为信息与通信大类学科教学中的重要内容, 是学生从理论知识进入工程实践的重要枢纽和桥梁, 掌握无线通信系统的原理、架构、功能和实现, 对培养合格的信息与通信工程人才十分重要<sup>[1-2]</sup>。

由于无线通信系统覆盖的知识面广、系统性强, 需要将数字信号处理、通信原理、移动通信等课程的内容进行综合, 所以对相关知识的熟练掌握程度和工程实践能力的要求很高。目前的无线通信实验主要存在两个问题: 一是内容比较零散, 多局限于书本上具体知识点的学习和验证, 系统性不强; 二是缺少使用简单、扩展性好的实

收稿日期: 2023-11-08; 修回日期: 2023-12-14

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(202002274001); 电子科技大学研究生教研教改重点项目(JYJG2021401)。

作者简介: 武畅(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要从事信号与信息处理、通信系统、软件无线电与导航定位方面的研究。E-mail: [changwu@uestc.edu.cn](mailto:changwu@uestc.edu.cn)

验平台，特别是能够兼顾软件仿真、性能分析和硬件实现的软硬件协同集成实验系统。这就导致了在当下通信工程专业教学中，多数实验教学只停留在理论和仿真层面的实验操作，无法让学生深入地理解通信过程，掌握对完整通信系统的配置、优化和测试方法。

为了加深学生对通信过程的总体认知，提升对无线通信技术的系统性理解，强化软件仿真分析与硬件实现的综合工程能力，本实验设计了一个基于 GNURadio 与 USRP 软硬件协同的 OFDM 无线通信系统实验。依托软件无线电的思想，本实验首先通过软件无线电平台 GNURadio 对信号进行诸如调制、传输与解调等仿真实验。在仿真分析相关性能之后，学生将 USRP 连接到电脑，将硬件平台与之前所做的软件仿真结合来实现基于真实环境下的通信链路，对数字信号的传输和处理达到更深层次的理解。

### 1 GNURadio 软件与 USRP 平台

软件无线电 (software defined radio, SDR) 是一种实现无线通信的新概念和体制<sup>[3]</sup>，是一种基于软件定义的无线通信技术，目前在无线通信领域已经被广泛应用。它通过编程和配置灵活的硬件平台来实现无线通信功能。其核心思想是通过软件对无线通信系统的信号处理和调制解调过程进行控制和配置，在无须更换硬件的情况下适应新的通信标准或协议，为通信系统提供更高的灵活性和可升级性<sup>[4]</sup>。

GNURadio 是一个专为软件无线电应用而设计的开源软件开发工具包。它提供了丰富的信号处理模块和工具，支持多种通信标准和协议，包括调制解调、信道编解码、信号生成和处理等功能。其特点主要体现在以下 3 个方面：一是具有充足的灵活性和可扩展性，使学生能够基于该软件轻松地开发、模拟和实现各种无线通信系统；二是作为一个世界范围的开源工具包，具有便利的开放性和可定制性<sup>[5]</sup>，使学生能够充分利用网络资源进行学习，加速对无线通信系统在无线通信领域的研究进展；三是具备友好的图形用户界面，使学生能够轻松上手，通过拖放、连接模块的形式，实现对复杂通信系统的构建，并通过可视化图形的方式完成对通信信号的实时监测和分析<sup>[6]</sup>。

为了充分体现软硬件结合及工程实现，实验将使用 USRP 平台作为系统的硬件基础。USRP 是一种开源的软件无线电硬件平台，由于结合了高性能的硬件前端和可编程的数字信号处理平台，学生可以在无线通信系统的实验中进行实时的软件定义无线电处理，并灵活地设计和实现各种通信系统。USRP 作为实验平台，为学生提供了实践探索无线通信领域的机会，并培养了他们在实际工程项目中的实践能力和创新思维。

本实验选用基于 Ubuntu 系统下运行的 GNU-Radio3.9 版本，USRP 则选用 B210 型号。在该版本中，GNURadio 对之前版本中的部分模块进行整合修改，使得软件运行更加稳定<sup>[7]</sup>。GNURadio 的软件架构如图 1 所示。

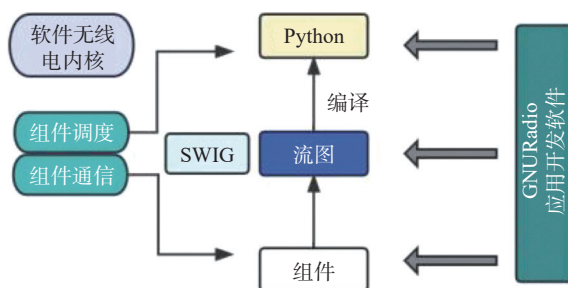


图 1 GNURadio 架构图

USRP B210 的实体如图 2 所示，在设计中将射频前端集成在 AD9361 的主板上，通过单片机的布置实现收发器的直接转换，能够提供 56 MHz 的实时带宽。借助于 AD9361 的信号链，B210 具有相干多进多出 (multiple input multiple output, MIMO) 能力<sup>[8]</sup>。

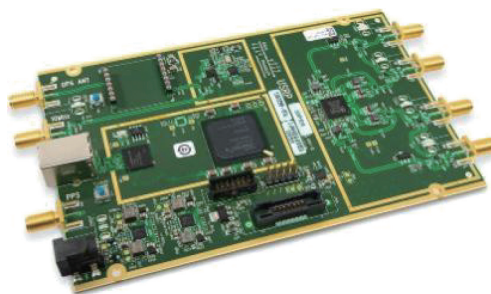


图 2 USRP B210 实体图

### 2 实验方案

视频信号作为当下多媒体传输的第一大类，在计算机终端播放已不成问题，关键在于信号的传输技术。如传输 MPG-1 方式的普通电视信号，要求速率为 120~140 kbit/s；传输相当于 S-

VSH 的 MPG-2 电视信号, 要求速率为 500 kbit/s。另外, 延迟及延迟抖动在视频传输领域也具有更高的要求。所以, 在拥有充足带宽的同时, 足够的稳定性和抗干扰能力都是视频传输中不可忽视的重点。当下无线视频传输中广泛普及的标准: DVB-H、T-DMB 以及 DMB-T 等都是基于 DAB 标准进行一定的演进。因此, 本次实验的物理层结构根据 DAB 来进行设计。

OFDM 作为多载波调制的一种, 通过频分复用将高速率的串行数据改为低速的并行传输模式。OFDM 信号具有多种调制方案, 而目前计算复杂度最低, 适用范围最广的一种是通过快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 及其逆变换

(inverse fast Fourier transform, IFFT) 来实现其调制解调<sup>[9]</sup>。它具有较好的抗多径衰落的能力, 宽频段的特性使其可支持多用户接入。而且可以采用 IFFT/FFT 技术来实现, 易于在 DSP 上实现, 因此试验中既包括了基于 OFDM 的调制解调, 也包括完整的通信链路的搭建及实现。实验所采用的通信收发系统如图 3 所示。由于 DAB 在制定之初主要面向音频信号的传输, 较低的数据量以及人们对音频信号的适应能力让它仅通过卷积编码就可以实现稳定传输。但是, 当传输的媒体形式为视频时, 单纯的卷积编码已经不能达到纠错要求, 所以需要选择多层编码技术联合纠错的级联码方案来满足传输要求。

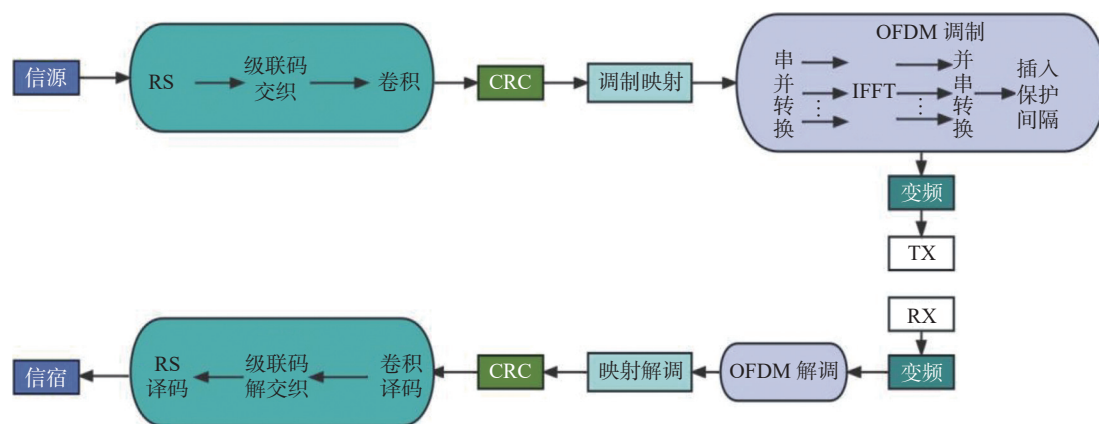


图 3 通信收发链路结构图

## 2.1 发射端实现

由于实验传输的是视频信号, 这就要求系统有较低的误码率。由信道编码定理可知, 译码的错误概率随着码长  $n$  的增长成指数接近零, 而低误码率意味着码长的增加。1966 年 Forney 提出了级联码<sup>[10]</sup>。不同于前人只选用一种编码方式来降低误码率, 级联码把编码的过程分成多级的形式来完成, 这就意味着我们只需要在每一级添加较短的码长, 再通过多级链接来让编码具有长码的纠错能力。所以在实验中采用由 RS、交织和卷积所组成的级联码结构, 如图 4 所示。当信道只产生随机差错, 且在内码卷积码的纠错范围内, 通过内码可以完成纠错处理。当信道产生的差错超过了卷积码的纠错能力, 将会发生突发性的译码错误, 这时可以通过外码 RS 码来完成纠错。

此外, 为了进一步降低突发错误出现的概率,

利用交织的技术原理, 我们将本身连续的数据打散, 将其分散到较远的位置上。这意味着当数据传输时, 如果发生了大段数据出错, 就可以通过接收端的交织将这些错误拆分成短的突发差错乃至随机差错<sup>[11]</sup>。

在经过信道编码之后, 为了将数据流转化成易于处理的帧结构, 我们需要让数据先进入数据流标记模块。该模块实现的功能是将输入随机数据流进行打包, 形成一定长度的帧数据流, 并给数据贴上标签。该模块按设定长度输出打包好的帧数据流。成帧后我们利用模块 stream CRC32 对输入的每帧数据形成校验位。该模块的工作原理是将输入数据流分成一个个的数据块, 然后对每个数据块进行 CRC32 计算。计算过程中, 模块会生成一个 32 位的校验码, 附加在数据块的末尾, 作为数据的一部分进行传输, 即处理后的数据的长度相较输入之前会多出 4 字节<sup>[12]</sup>。



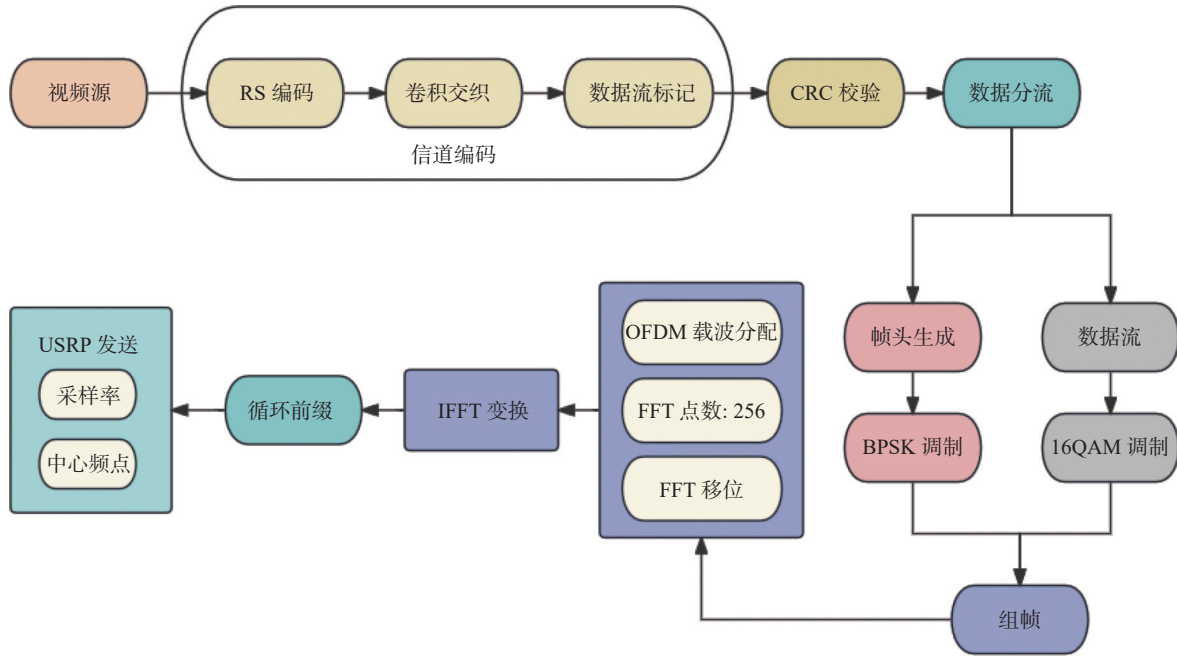


图 4 OFDM 发射端实现结构图

在接收端，CRC32 数据流模块会重新对接收到的数据进行 CRC32 计算，并将计算结果与接收到的校验码进行比较。如果两个值不一致，说明数据传输过程中出现了错误，需要进行相应的处理，如重新发送数据或者进行错误恢复等。

需要注意的是，CRC32 数据流模块的计算结果取决于数据的内容和格式。因此，在进行 CRC32 计算之前，需要先确定数据的格式和规则，以便正确地计算校验码并检测错误。

在完成数据的预处理之后，数据分成两路，其中一路通过帧头生成模块为发送数据创建帧头，方便接收端进行帧的同步处理。在创建帧头后我们对数据和帧头分别进行 BPSK 和 16QAM 调制。组帧之后，只需要完成 OFDM 调制就可以将信息传输出去。首先通过 OFDM 子载波分配模块，即串并转换模块。

这里设总载波个数为 256，载波类型包括以下几种：数据子载波(occupied carriers)、导频子载波(pilot carriers)、虚拟子载波(virtual carriers)和直流子载波(DC carrier)。其中数据子载波可以用来携带数据和同步字，导频子载波用于发射特定符号数据，空载波的值默认为 0，其作用是为了减少带外功率和抑制 ACI<sup>[13]</sup>。需要注意的是 FFT 模块中参数 shift 的设置：它表示傅里叶变换后是否将频率点(下标)移动，这里需要注意的是在接收端

FFT 模块中需要做同样的设置，否则无法正常解调信号。

完成串并转换后对已分配好的子载波符号进行傅里叶逆变换，完成 OFDM 调制。此外，为了抵制符号间干扰(inter symbol interference, ISI)，在每个 OFDM 符号前插入循环前缀作为保护间隔(guard interval, GI)。需要注意的是，OFDM 循环前缀模块中的 rolloff 参数用于控制循环前缀的长度。rolloff 参数决定了循环前缀的长度，也就是复制的部分占整个 OFDM 符号的比例。rolloff 参数的选择取决于实际应用场景中的信道条件和系统要求。在信道条件较好的情况下，可以减小 rolloff 参数的值，以增加系统容量；在信道条件较差的情况下，可以增大 rolloff 参数的值，以增强对多径干扰的抑制能力。

完成 OFDM 调制后，通过 UHD:USRP sink 模块就可以将数据发射出去。本实验中 USRP 的任务是通过数模转换器(digital to analog converter, DAC)将数字信号转换为模拟信号并将模拟信号传输到 USRP 设备的发射端口。USRP 设备对模拟信号进行进一步的处理，包括射频前端处理、射频传输线传输等，最终将信号以无线电波的形式发送出去。值得注意的是，需要在 usrp\_addr 中输入 USRP 设备的地址，通常一台设备对应一个 IP 地址，其储存在芯片 EPROM 中，主机通过寻找该

地址来实现通信。另外, UHD:USRP sink 模块的中心频点和发射功率是两个重要的参数, 它们的功能分别是控制信号的频率和调整信号的强度, 从而影响无线通信系统的性能和干扰情况。用户可以根据实际应用场景选择合适的中心频点和发射功率, 以实现最佳的通信效果。

在这里为了防止调制好的 OFDM 信号在进入功率放大器后产生非线性失真, 需要将输入信号乘以一个小于 1 的常数。当数据无法正常解调的时候, 大概率是接收信号失真严重, 可以酌情调节常数, 来降低失真。

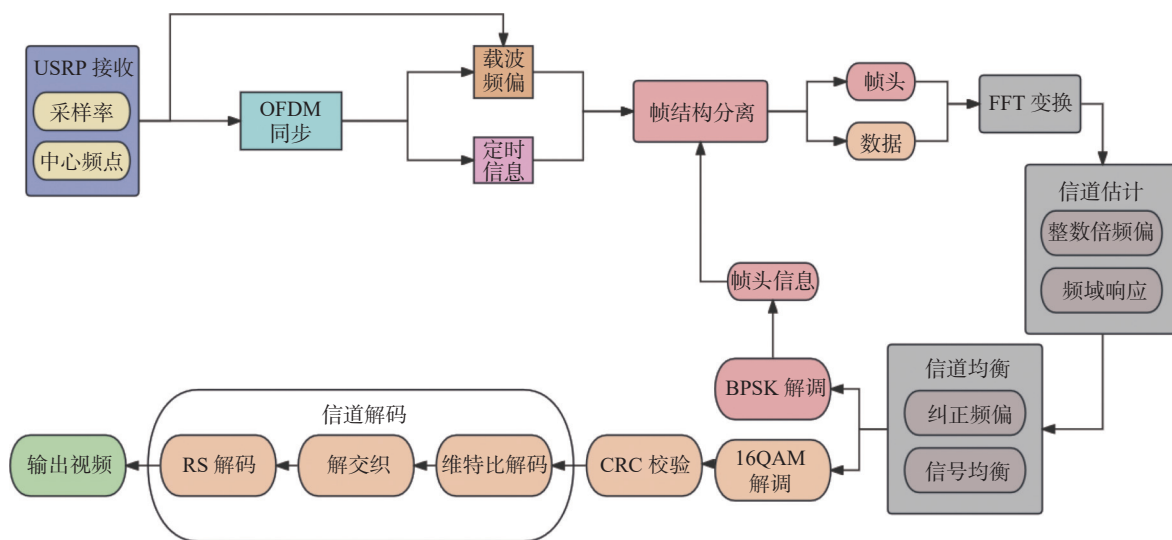


图 5 OFDM 接收端实现结构图

具体来说, OFDM 同步模块首先在接收到的 OFDM 信号中搜索训练序列, 该训练序列是预先在发送端插入的。通过对比训练序列和接收端检测到的训练序列, 算法可以估计出信号的频率偏差和相位偏差。然后, 这些偏差被用于调整接收机的本地振荡器, 以实现 OFDM 信号的同步。这种算法具有计算简单、容易实现、高同步精度的优点。

该模块具有两个输出, 一个是载波频偏(小数倍), 另一个是定时信息。其中小数倍的载波频偏是经过归一化的:

$$\varepsilon = 2.0 \times \Delta f / F \quad (1)$$

式中:  $\Delta f$  为原始载波频偏,  $F$  为 fft 点数,  $\varepsilon$  为归一化后的小数倍频偏。可以得到  $\varepsilon$  的变化范围为  $[-\pi, \pi]$ 。这意味着由于频率被归一化为了相位变化, 那么不在此范围内的载波频偏便无法

## 2.2 接收端实现

通过 UHD:USRP source 模块将数据引入如图 5 所示的接收端流图中后, 首先进入 OFDM 同步模块。该模块是一种基于正交频分复用的信号同步技术, 它是由 Schmidl 和 Cox 于 1997 年提出的一种用于 OFDM 同步的频率和相位同步算法<sup>[14]</sup>。该算法的主要思想是在 OFDM 信号的半径边缘处插入一个固定的训练序列, 然后利用该序列的自相关性来实现对 OFDM 信号的同步。通过该算法, 可以实现对 OFDM 信号的频率偏差和相位偏差的估计和校正。

纠正。

而定时信息则是一串和数据等长的 0,1 序列, 起始点对应的地方设为 1, 其他为 0。在得到载波频偏之后, 通过频率调制产生一个和载波频偏对应的序列, 进而将该序列和接收的数据流相乘, 达到去除载波频偏的目的。它的工作原理是通过将输入信号的瞬时相位与灵敏度和输入幅度成正比, 从而实现信号的频率调制。更具体地说, 该模块会取一个实数基带信号作为输入, 然后输出一个调频信号。其中, 输入参数是频率偏差, 而输出信号的瞬时相位则与输入幅度和频率偏差成正比。

频率调制模块的输出信号瞬时相位与灵敏度和输入幅度之间的关系表示为:

$$\Delta \theta = a(t)\varphi \quad (2)$$

式中:  $\Delta \theta$  表示信号的瞬时相位变化量,  $a(t)$  表示

输入幅度， $\varphi$  表示灵敏度参数。

总的来说，频率调制模块通过将输入信号的瞬时相位与灵敏度和输入幅度成正比，实现了对信号的频率调制。

在去除载波频偏之后，通过帧结构分离模块来分离帧头。该模块是根据定时信息和帧头信息，将复合在一起的帧头和数据进行分离：首先，将 3 个输入端口从上到下编号为 0、1、2，输出端编号类似。0 号端口连续输入去除载波频偏的数据流，当 1 号端口(定时信息)输入 1 时，也就是功能被触发，则输出端口 0 输出帧头，而有效数据则保持不动。直到输入端口 2 接收到解码后的帧头信息，输出端口才有数据输出，输出数据为帧头和有效数据的合并数据，也就是说输出端口 1 中的信息包含一帧数据中的完整信息。

提取到数据之后，我们对其进行 FFT 变换以及信道估计与均衡。模块 OFDM 信道估计实现两个功能，得到整数倍频偏和系统频域响应(即信道的频率响应)。它使用在发射端进行载波分配时预设的同步字 2 里面的奇数载波来计算起始点和载波频偏。并且由于它在 FFT 模块之后，因此实现的是信道频域估计，得到的是信道的频域响应  $H(k)$ <sup>[15]</sup>。综上，该模块的工作原理是根据同步字 1 和 2 来获取整数倍频偏和信道的频率响应，并将这两个值作为标签传递到之后的所有模块中，并不在此做处理。

均衡模块 OFDM 均衡顾名思义，实现两个功能，第一纠正整数倍频偏，第二对接收信号进行均衡。具体来说，OFDM 均衡模块的均衡处理通常包括以下步骤。

1) 载波偏移消除

通过检测 OFDM 帧中的导频符号，确定载波偏移的大小和方向，然后对其进行校正和消除。

2) 一维均衡

对 OFDM 帧的每个子载波进行均衡处理，通过调整每个子载波的相位和幅度来减轻信道对信号的影响。

3) 二维均衡

在完成一维均衡后，对 OFDM 帧进行二维均衡处理。二维均衡通常包括时间均衡和频率均衡两个方面。时间均衡通过对信号在不同时间上的响应进行校正，以减轻多径效应和时变信道的影

响校正，以减轻信道的频率选择性衰落。

通过以上步骤，OFDM 均衡模块可以有效地对 OFDM 帧进行均衡处理，提高信号的质量和可靠性。需要注意的是，实际的均衡效果和复杂度取决于多种因素，如信道的特性、多径效应的严重程度、信号的调制方式等。因此，OFDM 均衡模块的具体实现和参数调整需要根据实际应用场景进行优化和设计。

最后，通过逆 OFDM 子载波分配模块，也称为并串转换模块，完成发送端 OFDM 子载波分配模块的逆过程<sup>[16]</sup>。在流图的最后，完成 16QAM 解调等与发射端相对应的操作后就可以得到要传输的视频文件。

2.3 软件仿真结果

在系统搭建完成后，利用 GNURadio 平台对基于 OFDM 的无线收发系统进行性能仿真，然后在此基础上完成基于 USRP 的硬件系统实现和测试。

为了先行验证实验的可行性，我们利用如图 6 所示的信道模型模块来模拟信道。该模块允许用户设置 AWGN 噪声源、标准化处理后的频率偏移、采样定时偏移等参数，以随机化或再现 AWGN 噪声源。此外，在此模型中，可以通过使用带有参数的多径延迟曲线的 FIR 滤波器来模拟多径效应<sup>[17]</sup>。在接收端我们可以获取如图 7 所示的频域波形图，根据波形图我们可以直观地观察到前文中提到的各个参数对 OFDM 波形的影响。

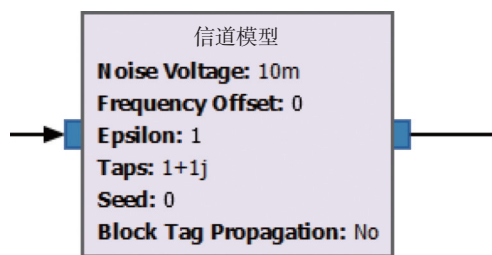


图 6 信道模型模块

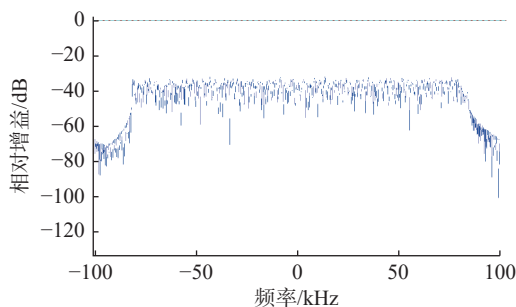


图 7 接收端频谱图



对该系统进行仿真模拟可得到如图 8 所示的误码率曲线。

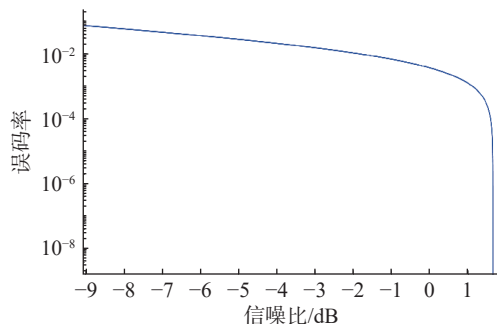


图 8 误码率统计

### 3 硬件测试

完成仿真验证后, 我们通过 USRP 实现了该系统在真实环境下的视频收发实验。如图 9 所示, 在发射端我们使用一台电脑和一台 USRP B210 作为发送端, 并通过外接天线将信号发出。



图 9 OFDM 系统发射端实现

为了检验系统的可靠性, 我们选取如图 10 所示的存在大量折射、绕射现象的多径效应较为严重的室内作为传输环境。



图 10 实际无线信道情况(约 50 米)

最后, 在接收端使用一台电脑配合 USRP 将收到的数据进行处理, 得到发送端摄像头拍摄到的影像, 如图 11 所示。



图 11 OFDM 系统接收端实现

如图 12 所示, 我们通过接收信号的星座图可以看出信号明显存在频偏现象。当频偏存在时, 星座图会发生旋转, 这是因为频偏会导致基带信号的相位移动。具体来说, 如果载波频率存在偏差, 那么信号的相位就会发生变化, 从而引起星座图的旋转。这种旋转是由于频偏导致的相位移动造成的。

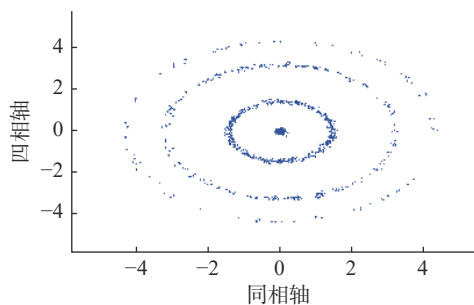


图 12 未均衡星座图

在经过频偏校正之后, 可以得到如图 13 所示的带有噪声信息的实际接收端星座图。

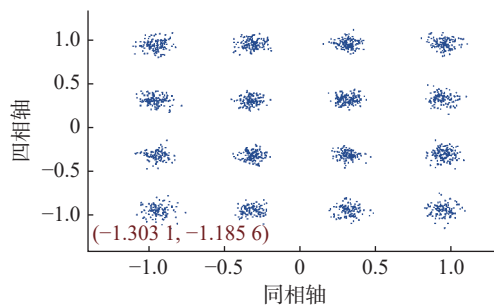


图 13 实际接收端星座图

通过如图 14 所示的视频对比可以看到, 接收端的视频相比于发送端, 基本不存在明显的误码情况, 证明了实验的硬件可操作性。

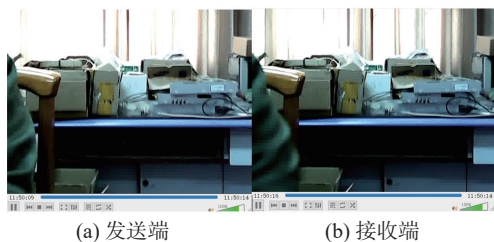


图 14 发送端与接收端视频对比图

## 4 结束语

实验通过基于 GNURadio 与 USRP 的 OFDM 无线通信系统的搭建,完成了相关的软件仿真与硬件实现,在 16QAM 高阶调制的基础上,对系统性能进行了分析和测试,接收端能够收到实时视频并进行显示。该实验加深了学生对无线通信全过程及 OFDM 的理解与认知。

实验方式和结果表明,基于软硬件协同的无线通信系统,既能满足对通信各个模块的功能和性能验证,又能强化对无线通信的系统性理解,还能真实环境中的通信过程提供验证。该实验的灵活与便利为其未来在无线通信教学中推广并扩展到其他无线通信系统,提供了良好的支撑。

## 参考文献

- [1] SPEIRS P J, UMMENHOFER M, SCHÜPBACH C, et al. Comparison of DVB-T passive radar simulated and measured bistatic RCS values for a pilatus PC-12 aircraft[J]. *Sensors*, 2022, 22(7): 2766–2774.
- [2] FARHAN M. COFDM system: An overview[J]. *Journal of Computer Science, Information Technology and Telecommunication Engineering*, 2023, 4(2): 458–464.
- [3] 陈洪, 吴逢章. 数字信号处理技术在通信领域的应用[J]. *电子通信与计算机科学*, 2023, 5(5): 170–172.
- [4] MOLLA D M, BADIS H, GEORGE L, et al. Software defined radio platforms for wireless technologies[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 26203–26229.
- [5] 冉洁, 司宾强. 认知无线电频谱感知技术综述[C]//第十四届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集. 北京: 中国高科技产业化研究会, 2021: 164–174.
- [6] AMEEN M J M, KADHIM H J. The efficient interleaving of digital-video-broadcasting-satellite 2nd generations system[J]. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 2020, 18(5): 2362–2370.
- [7] FAULKNER E, YUN Z L, ZHOU S L, et al. An advanced gnu radio receiver of IEEE 802.15. 4 OQPSK physical layer[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(11): 9206–9218.
- [8] DIOUF C, JANSSEN G J M, DUN H, et al. A USRP-based testbed for wideband ranging and positioning signal acquisition[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1–15.
- [9] 李海洋. OFDM 移动通信技术原理与应用分析[J]. *大众标准化*, 2021(10): 162–164.
- [10] GAO J, ZHANG W, LIU Y, et al. High-performance concatenation decoding of Reed-solomon codes with SPC codes[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2021, 29(9): 1670–1674.
- [11] PRESS W H, HAWKINS J A, JONES Jr S K, et al. HEDGES error-correcting code for DNA storage corrects indels and allows sequence constraints[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(31): 18489–18496.
- [12] HUSSEIN Al-Delfi H A, HASAN F S. Hybrid ciphering and frequency domain scrambling for secure speech transmission through MIMO-OFDM system[J]. *International Journal of Intelligent Engineering & Systems*, 2022, 15(6): 563–575.
- [13] 薛凤凤, 曹帅, 叶立庭, 等. OFDM 调制解调系统设计与仿真[J]. *电子制作*, 2021(19): 42–44.
- [14] DE FILOMENO M L, DE OLIVEIRA L G, CAMPONOGARA Â, et al. Joint channel estimation and Schmidl & Cox synchronization for OCDM-based systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(8): 1878–1882.
- [15] HUANG M N, CHEN J, FENG S L. Synchronization for OFDM-based satellite communication system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(6): 5693–5702.
- [16] 孙立炜, 钟石根, 游陈盛. 基于 MATLAB 的量子通信课程教学研究[J]. *科技资讯*, 2020, 18(5): 11–12.
- [17] MAREY M, MOSTAFA H. Turbo modulation identification algorithm for OFDM software-defined radios[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(5): 1707–1711.

编辑 葛晋