

基于 COFDM 的实时无线图传系统设计与实现^{*}

刘成凯¹ 孙运强¹ 姚爱琴¹ 彭东升¹ 石喜玲²

(1. 中北大学信息与通信工程学院 太原 030051; 2. 中北大学电气与控制工程学院 太原 030051)

摘要:随着无线图像传输的兴起,相关传输技术也得到大力发展,但在山区、海面、密集城区等复杂无线通信环境中,WiFi、ZigBee、4G/5G 等技术图传性能较差,而编码正交频分复用(COFDM)技术以其传输速率高,抗干扰能力强等特点,成为当前研究热点。为满足复杂无线通信环境下无线图传的大速率、低时延和高可靠的性能需求,缩短无线图传通信产品的设计周期,在 COFDM 技术的基础上,搭建了基于通用硬件外设 USRP 和软件无线电平台 GNU Radio 的 COFDM 无线图传系统,该系统采用 Gstreamer 技术对摄像头视频流进行采集与处理,实现 720 P 视频图像实时传输,视频传输速率 4 000 Kbit/s。结果表明,该系统实现了长时间且稳定的无线视频实时传输,说明了系统设计的灵活性和方案设计的有效性。

关键词:软件无线电;COFDM;无线图传;实时传输;GNU Radio

中图分类号: TN914.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Design and implementation of real-time wireless graph transmission system based on COFDM

Liu Chengkai¹ Sun Yunqiang¹ Yao Aiqin¹ Peng Dongsheng¹ Shi Xiling²

(1. School of Communication and Information Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: With the rise of wireless image transmission, related transmission technologies have also been greatly developed. However, in complex wireless communication environments such as mountains, sea surfaces, and densely populated urban areas, WiFi, ZigBee, 4G/5G, etc. have poor transmission performance, while the coding orthogonal frequency division multiplexing (COFDM) technology has become a research hotspot due to its high transmission rate, strong anti-interference ability, etc. To meet the performance requirements of high transmission rate, low latency, and high reliability in complex wireless communication environments for wireless image transmission, and to shorten the design cycle of wireless image transmission communication products, this paper analyzed and studied the COFDM technology and built a COFDM wireless image transmission system based on the general hardware peripheral USRP and software radio platform GNU Radio. The system uses Gstreamer technology to collect and process the video stream from the camera and achieves real-time transmission of 720 P video images at a video transmission rate of 4 000 Kbit/s. The results show that the system has achieved long-term and stable wireless video real-time transmission, which demonstrates the flexibility of the system design and the effectiveness of the scheme design.

Keywords: software defined radio; COFDM; wireless video transmission; real-time transmission; GNU Radio

0 引言

随着科技的飞速发展,无线图传通信设备在公安监控、工业控制、电力巡检、灾害应急响应等领域中的应用日

益广泛^[1-2]。无线图传通信设备能够快速准确采集传输图像,为决策者提供直观、实时的现场情况。目前无线视频传输的技术包括 ZigBee 图传技术、WiFi 图传技术、4G/5G 图传技术、编码正交频分复用(coded orthogonal frequency

收稿日期:2024-06-26

^{*} 基金项目:山西省基础研究计划(20210302123062)项目资助

division multiplexing, COFDM) 图传技术等^[3-4]。其中 ZigBee 图传技术传输距离短,数据传输速率低,在传输大量数据时,会导致数据传输延迟。WiFi 图传技术需要双向握手机制,任何一个字节的丢失都会导致整个数据包重新发送,出现图像延时,这导致 WiFi 图传不能在移动状态下实现数据正常传输^[5]。4G/5G 图传技术图传延时低,传输距离远,但是会受到基站数量影响,在山区、海面等基站覆盖率低的区域,图传性能差^[6]。COFDM 图传技术具有传输距离远、抗干扰能力强、频谱利用率高、传输速率高等特点,可适用于山区、海面、密集城区等复杂无线通信环境,解决非视距移动无线实时视频传输问题,成为无线图传设备应用的研究热点^[7-8]。

针对 COFDM 无线图传方面,文献[9]基于 ZYNQ 平台完成基带信号处理部分,配合射频前端 AD9361 与视频编码芯片 Hi3516A 实现 COFDM 无线视频发射系统。文献[10]基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)平台完成信源编码和 COFDM 调制部分,配合射频电路与摄像头 OV5640 实现图像采集传输系统。文献[11]基于数字信号处理器(digital signal processor, DSP)和 FPGA 平台完成信道编码和 COFDM 调制解调部分,实现现有视频的无线传输。以上研究采用硬件实现无线视频传输系统的设计与验证,然而一个新的硬件系统的设计搭建过程往往开发周期长、难度大、成本高,难以满足无线通信系统的快速开发和验证。

软件无线电技术是一种新型的无线电体系结构,具有可重配置、可编程的能力,基于信号处理平台和通用的射频前端,通过软件编程来实现通信系统中的数据组包和调制解调等功能。在软件无线电平台中搭建通信系统,可灵活调整基带电路结构,降低产品开发成本并缩短设计周期,为基于特定通信协议的专用集成电路设计提供算法基础^[12]。本文通过软件无线电平台 GNU Radio 与通用硬件外设(universal software radio peripheral, USRP)搭建 COFDM 通信系统,完成无线视频采集发射与接收,降低了开发难度,能够灵活调整系统功能需求。

1 软硬件平台

该系统采用的 GNU Radio 和 USRP 平台,如图 1 所示,在 GNU Radio 软件上实现基带信号处理部分,在 USRP 母板和子板上实现数字中频和射频部分。

GNU Radio 是一个开源软件开发平台,通过结合通用硬件平台如 USRP、RTLSDR、HackRF 等,在计算机上利用软件编程来实现无线电通信的各种功能,以构建无线电通信系统^[13]。GNU Radio 由 Python 和 C++ 联合开发,Python 和 C++ 语言之间的接口是通过简化封装和接口生成器(simplified wrapper and interface generator, SWIG)来实现的。使用 C++/Python 编写信号处理模块,比如编解码器模块、调制解调模块、数据滤波模块等,模块具有输入和输出端口以及可配置参数,用户通过拖拽

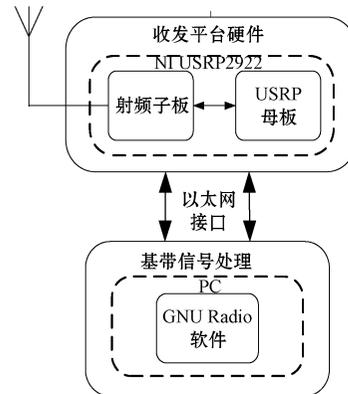


图 1 通信系统结构

Fig. 1 Communication system structure diagram

和连接模块可方便的构建各类通信系统框架流程图。由模块构成的流程图编译成功后,生成相应的 Python 脚本,由系统调用脚本完成流程图运行^[14]。

USRP 设备由母板和射频子板组成:母板通常实现基带信号和中频信号的数据处理,而射频子板在收发流程中功能不一。在发射过程中,子板负责将信号上变频至射频,并通过天线发射至无线信道。在接收过程中,子板需观测特定频段的信号,并下变频至合适频段,交由 USRP 母板处理^[15]。USRP 通过 GNU Radio 中的 UHD 模块,与 GNU Radio 建立通信,用户可以在 UHD 模块中调整采样率、发射频率等参数。

2 系统原理

COFDM 技术是结合了信道编码技术的正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术^[16]。OFDM 是一种多载波调制系统,把高速串行数据流串并转换成 N 路并行数据流,在 N 个正交子载波上进行调制发射,通过多个正交子载波实现了大带宽数据传输^[17]。当 N 个子载波并行传输时,每个子信道的符号周期扩大为原来的 N 倍,可降低产生子载波间干扰的概率,提高系统抗多径衰落性能。虽然 OFDM 良好地解决了多径环境中的信道选择性衰落,但对信道平坦性衰落,尚未得到较好的克服^[18]。为解决信道平坦性衰落问题,在 OFDM 的基础上加入信道编码即为 COFDM,COFDM 采用信息在时频域扩展的思想,通过信道编码使各单元码信号受到的衰落近似于统计独立,从而消除平坦性衰落及多普勒频移的影响,可有效应对信道的频率选择性衰落和各种干扰^[19]。数字地面电视广播系统(digital video broadcasting-terrestrial, DVB-T)采用 COFDM 编码调制技术,可作为良好的参考对象。

COFDM 发射原理框图如图 2 所示。首先进行信道编码生成编码数据,编码部分采用两层前向纠错机制,主要包括加扰、外编码、内编码、内交织,以提高数据传输的可靠性;其次对编码数据进行星座映射,并对星座映射后

的数据符号流并插入导频和传输参数信令组成 OFDM 帧;然后使用快速傅里叶逆变换 (inverse fast Fourier transform, IFFT) 将经过组帧的 OFDM 符号进行串并转换,然后在调制后的数据中插入循环前缀作为保护间隔,生成基带的 I/Q 数据。最后,通过 USRP 将基带信号的频谱搬移到射频段,并通过天线发射出去。

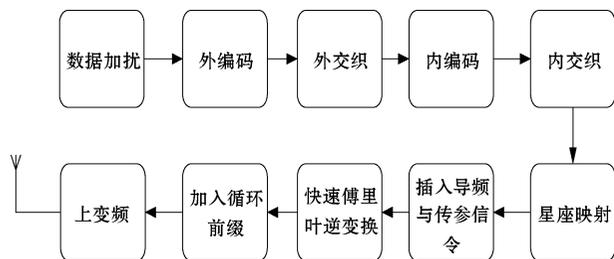


图 2 COFDM 发射原理框图

Fig. 2 Block diagram of COFDM transmission principle

DVB-T COFDM 系统中的信道编码,外编码采用里德-所罗门 (Reed-Solomon, RS) 码,内编码采用卷积码,并通过删余操作得到不同的码率。为提高系统的抗突发错误能力并降低接收数据中连续突发错误,在外编码后加外交织器,在内编码后加内交织器,内交织由比特交织和符号交织器组成。在 DVB-T COFDM 系统中支持三种星座映射方式,分别是 QPSK、16QAM 和 64QAM。每个 OFDM 符号包含有效信息数据、导频和传输参数信令。导频信号有助于信道均衡和信道估计,从而实现信号的准确恢复。传输参数信令则提供接收端所需的载波模式 (2 K 或 8 K)、帧序号、星座映射模式、循环前缀长度等参数信息。

COFDM 接收原理框图如图 3 所示。首先利用 USRP 将射频信号接收并下变频到基带信号,然后对基带信号进行频率与定时同步、快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT)、提取导频与传输参数信令,根据提取到的传输信令提供的参数信息,对有效信息数据进行星座解映射,最后把解映射后的数据进行解内交织、卷积码译码、解外交织、RS 译码、解扰处理,恢复原始发送数据。



图 3 COFDM 接收原理框图

Fig. 3 Block diagram of the COFDM receiving principle

3 系统设计与实现

为了实现真实信道的无线视频采集传输,采用 Gstreamer 技术对视频流进行采集与处理,通过在 GNU Radio 中搭建 GRC 流程图并以 USRP 为硬件平台,在 PC 端进行基带信号处理,并通过 USRP 完成射频信号与基带信号的转换。系统总体设计框架如图 4 所示。

Gstreamer 是用 C 语言编写的用于视频处理的软件框架,可以实现捕获、编码、解码、渲染、添加文本覆盖等一站式媒体解决方案。其架构主要基于插件和管道,框架中的功能模块实现为可连接的组件,可以轻松实现各种管道,从而利用现有的各种插件“组装”出一个全功能的流媒体应用^[20]。

在 Linux 系统中搭建 Gstreamer 环境,执行 `gst-launch-1.0` 命令开启摄像头,完成视频采集初始化,将摄像头从真实环境中实时采集的数据流转化为 `ts` 格式,并将视频放入 `video.ts` 管道。初始化主要包括:设置视频帧率、分辨率、颜色、文本覆盖及压缩格式等。由于采集回来的视频数据量过大,需要对视频流进行压缩,为保证视频传输的实时性,采用 H.264 压缩编码,再将经编码的视频数据封装进 MPEG-TS 容器中,最后将已经编码好的视频导入管道 `video.ts`。GNURadio 通过程序对管道 `video.ts` 数据读取,对数据进行信道编码,OFDM 调制,输入到 UHD 模块,由 USRP 发射。接收端则进行大致相反的处理,由 USRP 接收,OFDM 解调,信道解码,导入管道 `RX_video.ts`,进行视频解码播放。

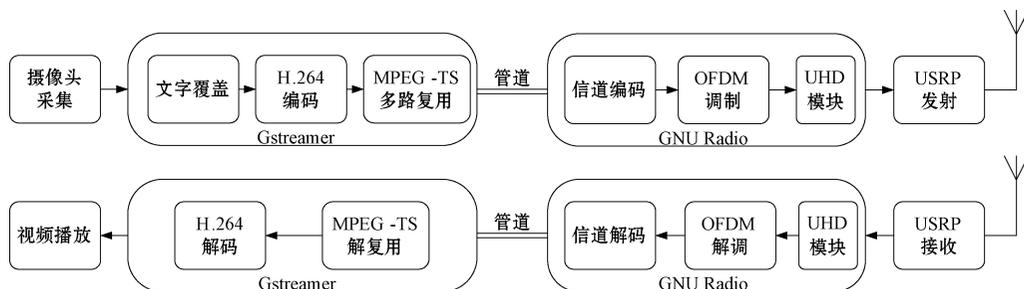


图 4 系统总体设计框架

Fig. 4 Overall design framework of the system

执行 gnuradio-companion 打开 GNU Radio 图形化界面,构建 COFDM 发射接收流程,发射端 GRC 流程、接收

端 GRC 流程如图 5 和 6 所示,实现上参考 DVB-T 数字电视标准。

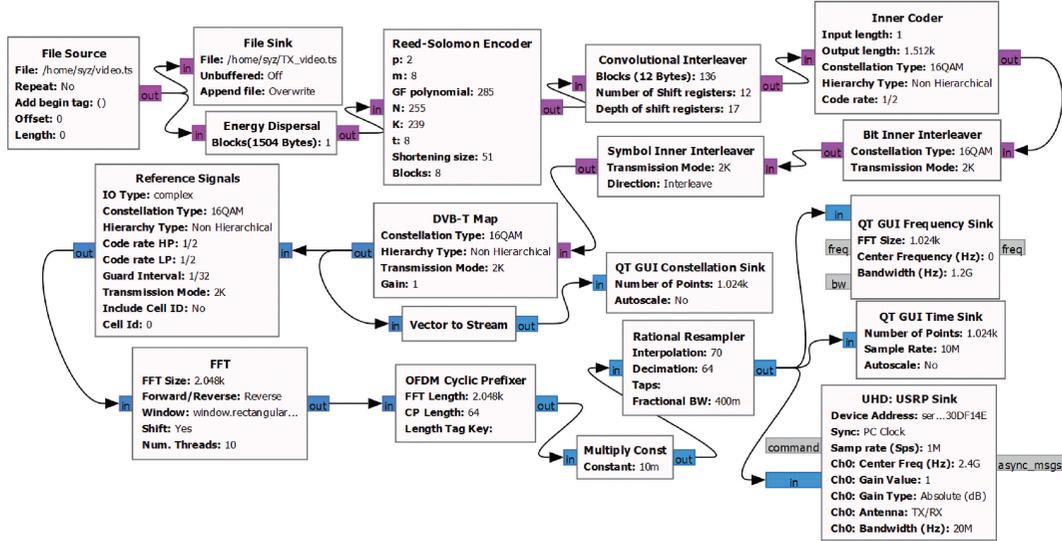


图 5 发射端 GRC 流程

Fig. 5 Flow chart of GRC at the transmitter

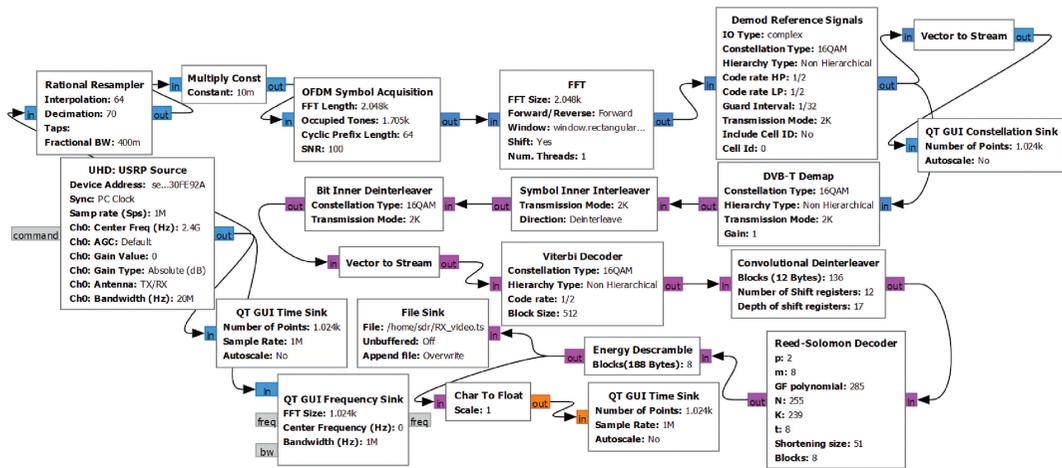


图 6 接收端 GRC 流程

Fig. 6 Flow chart of GRC at the receiver

图 5 中,“File Source”模块设置好管道文件 video. ts 接收 TS 流,“File Sink”模块设置管道文件 TX_video. ts 将摄像头捕获的视频流在发射端显示,以便发射接收视频对比。“Energy Dispersal”模块用于对输入视频流进行加扰操作实现对输入视频流的随机化处理。“Reed-solomon Encoder”模块采用 RS 编码对加扰后的字节流进行字节层面的纠错编码,“Convolutional interleaver”模块卷积交织采用实现分散传输连续的字节错误,“inner Coder”模块采用卷积编码实现卷积交织后的比特流进行比特层面的纠错编码,“Bit inner interleaver”模块采用比特交织实现分散传输连续的比特错误,“Symbol inner interleaver”模块

采用符号交织实现对比特交织后输出的符号比特组进行交织,分散连续符号错误。“DVB-T Map”模块实现把内交织后产生的数据比特组进行星座映射,映射成复数符号。“Reference Signals”模块用于向经过星座映射后的数据符号流中插入离散导频、连续导频和传输指令。“FFT”模块配置为执行 IFFT,用于对系统帧结构形成后的符号数据进行处理,生成 OFDM 符号。“OFDM Cyclic Prefixer”模块将 OFDM 符号的尾部数据复制到其前端,以实现循环前缀的插入。

图 6 中,“OFDM Symbol Acquisition”模块实现载波同步和符号同步,去除循环前缀得到 OFDM 符号。

“Demod Reference Signals”模块提取导频符号和传输指令,得到数据传给“DVB-T Map”模块进行解映射。后续经解码、解交织等操作,通过“File Sink”模块设置好管道文件接收视频流。连接“QT GUI Time Sink”模块显示解码后的数据流时域波形。

4 结果与分析

本文使用两台 USRP 设备搭建了 COFDM 系统,进行视频实时传输测试,视频源为 720 P,10 帧的 TS 格式摄像头视频流,视频传输速率 4 000 Kbit/s。发射端 GRC 流程中,在“DVB Map”数据星座映射模块后连接“QT GUI Constellation Sink”模块显示发射端数据星座图,如图 7 所示,发射端星座映射方式为 16QAM。接收端 GRC 流程中,在“Demod Reference Signals”模块后连接“QT GUI Constellation Sink”接收端数据星座图,如图 8 所示。

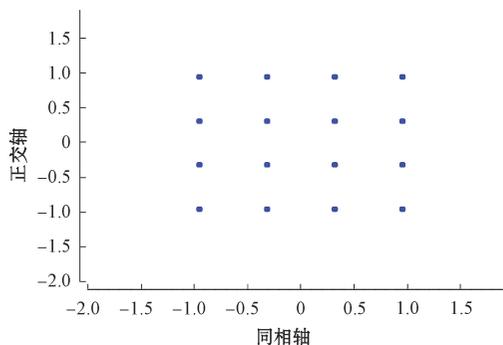


图 7 发射端数据星座图

Fig. 7 Data constellation diagram at the transmitter

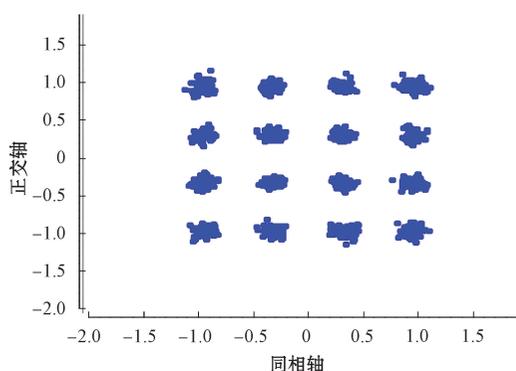


图 8 接收端数据星座图

Fig. 8 Data constellation diagram at the receiver

发射端与接收端频谱图如图 9 和 10 所示,说明发射端成功发射信号,接收端成功接收到信号,由于真实信道中存在噪声信号,接收端频谱图中相对增益减小,但不影响本地信号的恢复。

基于真实信道的无线视频采集传输如图 11 所示,左侧是发射端,右侧是接收端。发射端采集视频后在发射端实时播放,接收端接收视频后实时播放,在视频窗口左上

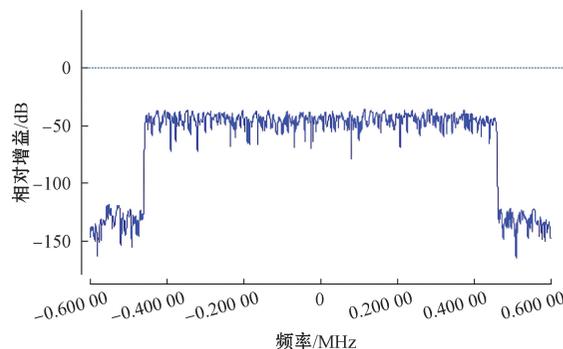


图 9 发射端频谱图

Fig. 9 Spectrogram of the transmitter

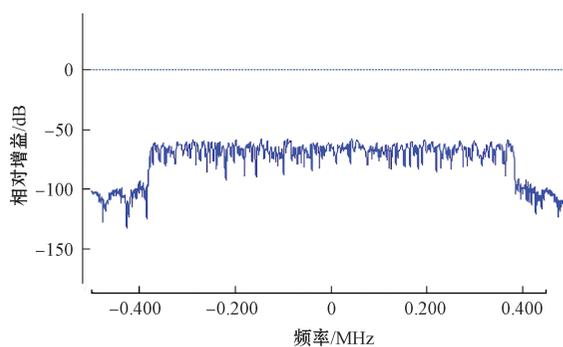


图 10 接收端频谱图

Fig. 10 Spectrogram of the receiver



图 11 基于真实信道的无线视频采集传输

Fig. 11 Wireless video acquisition transmission based on real channel

角通过 Gstreamer 添加的文本覆盖,即时间戳显示,可以看到接收端视频与发射端视频相比无明显延迟,并且无明显花屏断流现象,能够稳定流畅采集并传输视频。

5 结论

利用数字摄像头捕捉视频信号,经过发射端编码和调制处理,送入射频前端进行上变频和放大,通过天线发送。在接收端,射频前端接收到无线信号后进行放大和下变

频,然后交由接收端的基带进行解调和解码处理,最终将视频信号显示出来,实现了视频信号的实时无线传输。该系统具有成本低、复杂度低、设计灵活、可扩展性强的特点,可对理论分析结果进行实时性验证。同时该技术可推广应用于复杂环境下无人远程作业中的无线图像采集传输。通过对无线视频采集传输系统的搭建为后续进行无线视频采集传输的研究提供了可验证的平台。

参考文献

- [1] 潘宏锋,林静,宋川云,等.无线应急图传装备及平台在南宁轨道交通应急救援中的应用研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(S1):188-192.
PAN H F, LIN J, SONG CH Y, et al. Application research of wireless emergency image transmission equipment and platform in emergency rescue of Nanning rail transit [J]. China Safety Production Science and Technology, 2023, 19(S1): 188-192.
- [2] 彭军,黄小春,毛鹏鹏,等.基于5G技术的无人机电力巡检应用探索[J].长江信息通信,2023,36(10):201-203.
PENG J, HUANG X CH, MAO P P, et al. ExpLoRation of unmanned aerial vehicle power inspection application based on 5G technology [J]. Changjiang Information and Communication, 2023, 36(10): 201-203.
- [3] 陈昱,王世法,谭屈山,等.高速公路无线施工视频监控、图像处理及编码技术综述[J].无线电工程,2023,53(8):1815-1828.
CHEN K, WANG SH F, TAN Q SH, et al. Review of video surveillance, image processing and coding technology for highway wireless construction [J]. Radio Engineering, 2023, 53(8): 1815-1828.
- [4] 谢尧庆,邓继忠,叶家杭,等.基于5G的无人机图传及在植保无人机的应用展望[J].中国农机化学报,2022,43(1):135-141.
XIE Y Q, DENG J ZH, YE J H, et al. Uav image transmission based on 5G and its application in plant protection UAV [J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2022, 43(1): 135-141.
- [5] 王猛,刘进涛,刘冲伟,等.无线图传技术无人机在大宗商品水尺计重中的应用[J].中国口岸科学技术,2022,4(7):25-29.
WANG M, LIU J T, LIU CH W, et al. Application of wireless image transmission technology UAV in bulk commodity water gauge weighing [J]. China Port Science and Technology, 2022, 4(7): 25-29.
- [6] 汪兵兵,陈惠敏,党元晓,等.基于5G技术的无人机校园巡视系统的研究[J].南方农机,2022,53(22):122-125.
WANG B B, CHEN H M, DANG Y X, et al. Research on the 5G-based UAV campus patrol system [J]. Southern Agricultural Machinery, 2022, 53(22): 122-125.
- [7] 曾伟.基于COFDM技术的瓦斯抽采视频监控系
统[J].煤矿安全,2018,49(12):83-85.
ZENG W. Gas extraction video monitoring system based on COFDM technology[J]. Coal Mine Safety, 2018, 49(12): 83-85.
- [8] 李德伟.应急领域中基于COFDM的无线传输系统研究和应用[J].无线电工程,2019,49(8):695-698.
LI D W. Research and application of wireless transmission system based on COFDM in emergency field [J]. Radio Engineering, 2019, 49(8): 695-698.
- [9] 王国栋.基于COFDM的无线高清视频发射系统研究[D].成都:电子科技大学,2019.
WANG G D. Research on wireless high-definition video transmission system based on COFDM [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [10] 朱永乾.基于COFDM的无人机图像传输系统设计[D].青岛:山东科技大学,2018.
ZHU Y Q. Design of UAV image transmission system based on COFDM [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [11] AKHTAR M W, JUNAID M, AHMAD H, et al. A hybrid approach to develop a real time COFDM based data link using TI C64xx DSP and XC5VSX95T FPGA [C]. 2017 14th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). IEEE, 2017: 799-804.
- [12] 罗攀,孙毅刚.基于软件无线电的甚高频数据链模式4收发机设计[J].国外电子测量技术,2020,39(5):49-54.
LUO P, SUN Y G. Design of VHF datalink mode 4 transceiver based on software defined radio [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(5): 49-54.
- [13] 王晓丽,赵树波,王锐,等.基于GNU Radio与HackRF的无线通信系统实现[J].国外电子测量技术,2018,37(3):13-17.
WANG X L, ZHAO SH B, WANG R, et al. Implementation of wireless communication system based on GNU Radio and HackRF [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(3): 13-17.
- [14] 廖海华,王晖,张胜利,等.基于GNU Radio的多径信道测量系统设计[J].电子测量技术,2020,43(7):148-152.

- LIAO H H, WANG H, ZHANG SH L, et al. Design of multipath channel measurement system based on GNU Radio [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(7): 148-152.
- [15] 王威,杨露,宁国勇,等. 基于软件无线电的天线阵列研究[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(19): 96-99.
- WANG W, YANG L, NING G Y, et al. Research on antenna array based on software defined radio [J]. *Electronic Measurement Technique*, 2018, 41(19): 96-99.
- [16] BELLO N, OBASOHAN O. Design and implementation of a digital video broadcasting system using software-defined radio [J]. *Journal of Science and Technology Research*, 2022, 4(4): 120-136.
- [17] ALIM I S, ALAO O D, MUMUNI Q A. An overview of orthogonal frequency division multiplexing principles, architecture, and its application [J]. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 2022, 12(1): 120-130.
- [18] 杨辉莲. 基于软件无线电的 OFDM 系统误码率研究[J]. *国外电子测量技术*, 2018, 37(10): 56-60.
- YANG H L. Research on bit error rate of OFDM system based on software radio [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2018, 37(10): 56-60.
- [19] THAKUR A, RATTAN M. Implementation of convolution coded OFDM through different channel models on SDR platform [J]. *International Journal of Information Technology*, 2021, 13(6): 2561-2568.
- [20] SATAT M N, VARGAS-ALFONSO E, DAI R, et al. QoE-driven cross-layer design for video communication over software-defined radio [C]. 2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). IEEE, 2021: 1-9.

作者简介

刘成凯, 硕士研究生, 主要研究方向为软件无线电。

E-mail: 2538121550@qq.com

孙运强(通信作者), 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为软件无线电、信息探测与信号处理。

E-mail: syq@nuc.edu.cn