

基于 SDR 的无线通信系统架构与关键技术探索

肖菊兰 严骏杰 聂源廷

成都工业学院, 四川成都, 611730;

摘要: 随着无线通信、计算机和数字信号处理技术的迅速发展, 无线通信系统被广泛应用于生产生活中。相对传统的无线通信系统, 基于软件无线电 (SDR) 的无线通信系统具有灵活度高和可重构性强的优点。本文首先分析了基于 SDR 的无线通信系统架构, 继而探索灵活、可重构的无线通信系统关键技术路径, 最后搭建基于 SDR 的数字音频无线通信系统, 对所提架构与关键技术可行性进行测试。结果表明所探索的架构能够在保持高度灵活性的同时, 满足高质量数字音频传输要求, 为开发智能自适应无线通信系统提供可参考的技术框架。

关键字: 软件无线电; 数字信号处理; 数字音频通信

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.026

引言

随着 5G 通信和数字信号处理技术的发展, 无线通信系统被广泛用于各行各业。传统无线通信系统一旦设计完成, 其编解码类型、调制与解调方式已固化, 想要更改只能改版硬件, 导致成本增加、设计周期延长^[1]。未来 6G 与泛在智能社会的全新场景与极致性能需求, 基于固定规则的传统无线通信系统将难以满足应用需求, 智能自适应将成为下一代无线通信系统的必然选择。为实现系统的智能和自适应, 系统需具有高度灵活性和可重构性。

SDR 技术采用软件进行数字信号处理, 易于更改, 极大地提高了系统的灵活性和可升级性, 方便用户实现系统智能、自适应。

本文探究基于 SDR、软硬件协同的无线通信系统, 剖析其系统架构及关键技术, 搭建基于 SDR 的数字音频无线通信系统, 并对所提架构与关键技术进行测试与分析。

1 基于 SDR 的无线通信系统

1.1 系统架构

基于 SDR 的无线通信系统, 从信号流向来看它可分为发送通路和接收通路, 从物理结构来看它可分为信源、数字信号处理模块、模数转换(ADC)和数模转换(DAC)模块、射频前端模块及天线。其中, 数字信号处理模块采用软件编程实现信号处理算法。在发送通路, 此模块对待发送的基带信号进行预处理、编码和调制等。在接收通路, 此模块对 ADC 转换后的数字信号进行滤波、解调和解码等^[2]。基于 SDR 的数字信号处理模块具

备可灵活配置的编解码与调制解调机制, 从而为构建灵活、智能的无线通信系统提供了关键支撑。

ADC 和 DAC 模块, 将模拟信号转换为数字信号或者将数字信号转换为模拟信号。此模块的性能 (如分辨率、采样率) 直接决定了系统可处理的信号带宽和动态范围。

射频前端模块负责完成天线接收信号与中频信号之间的转换。发送通路中, 射频前端模块对数字处理后的信号实行上变频、功率放大、滤波和耦合等处理。接收通路中, 射频前端模块对天线接收到的信号开展预滤波、低噪声放大、下变频等处理。为支持宽频通信以适用于多样化的应用, 射频前端模块需突破专用硬件的束缚, 走向通用化与可配置化^[3]。

1.2 数字信号处理模块

数字信号处理中编码可分为信道编码和信源编码。信道编码也称为纠错编码或前向纠错编码, 是数字信号处理关键技术之一, 通过在发送数据中增加冗余信息使接收端能够根据编码规则自动检测和纠正传输中所产生的错误, 可有效提高信道传输可靠性和误码率。

数字调制是用数字比特流控制载波参数, 是数字信号处理关键技术之一。根据所控制的载波参数类型, 基本的数字调制可分为幅移键控 (ASK)、频移键控 (FSK) 和相移键控 (PSK)。三种基本的数字调制方式比较, PSK 的频谱效率和抗噪声性能最好, FSK 居中, ASK 最差。随着数字调制技术发展, 在基本数字调制方式基础上又衍生出一系列数字调制方式, 如抗非线性失真好的幅度相位联合键控 (APSK)、降低带外辐射的高斯频移键控 (GFSK)、适用多环境的自适应调制与编码 (AMC)

等。近年来,随着人工智能的迅速发展,深度学习在数字信号处理领域得到了快速发展^[4]。目前,国内外关于调制方式识别的研究可大致分为三类:基于决策理论的最大似然估计法、基于特征提取的统计模式识别法和基于深度学习的深度特征提取识别法^[4,5]。

1.3 ADC 和 DAC 模块

ADC 和 DAC 模块是连续信号与数字信号之间的物理接口,其分辨率和采样率直接决定了无线通信系统感知边界与精度。分辨率(位数)影响了模拟信号量化的精细程度,决定了量化噪声和动态范围的大小,制约了系统灵敏度与抗干扰能力。

根据奈奎斯特采样定理,想要无失真地恢复一个信号,采样率必须大于等于信号最高频率的两倍。在基于 SDR 的无线通信系统中,为简化射频前端设计,常采用中频或射频采样架构。ADC 和 DAC 模块的采样率则需大于等于中频或射频信号带宽的两倍,因而采样率的大小决定了系统可处理的中频或射频信号的最高频率,所以采样率提升是突破系统带宽瓶颈的必要技术路径。

1.4 射频前端模块

在基于 SDR 的无线通信系统中,射频前端模块的性能直接决定了系统的通信质量、覆盖范围与能效,是实现系统智能的物理基础。具体而言,通信质量的保障主要依赖于可调谐滤波器、线性可调功率放大器及智能干扰抑制技术,以支持动态频谱接入并保持高信噪比与信号完整性;覆盖范围的扩展则通过功率可调放大器与自适应阻抗匹配网络,实现对发射功率与天线效率的动态优化,从而增强链路预算与覆盖能力;系统能效的提升则借助包络跟踪、平均功率跟踪及可重构电源管理等技术,在满足输出性能要求的同时显著提高功率放大器效率,从而降低整体功耗。

为实现智能、灵活的无线通信系统,射频前端模块需具备可重构能力,即能够根据通信需求与信道条件,对射频带宽、中心频率、发射功率等关键参数进行适应性调整,从而在复杂无线环境中维持整体性能的最优平衡。可重构射频前端致力于支持系统在多频段、多标准与多场景下的高性能自适应通信,从而为下一代智能无线系统的实现提供关键的硬件支撑。

2 基于 SDR 的数字音频无线通信系统

2.1 系统搭建

为验证基于 SDR 的无线通信系统数字信号处理模块灵活性和射频前端可配置性,搭建以武汉凌特电子科技有限公司自主研发的 eLabRadio 软件和 eNodeX 10F 硬件平台为主要器件的数字音频无线通信系统。系统包含音频采集和播放模块、数字信号处理模块、ADC 和 DAC 模块、射频收发模块及天线。其中音频采集和播放模块使用计算机自带的音频采集器和播放器。数字信号处理模块采用 eLabRadio 软件,可进行数字信号处理和射频前端收发模块数据配置。ADC 和 DAC 模块为 12 位,射频前端模块频率范围为 70MHz~3GHz,均集成在 eNodeX 10F 硬件平台中,天线采用配套天线。

发射通路中,数字信号处理模块采用连续可变斜率增量调制(CVSD)将数字音频信号转换为适合数字传输的形式;采用差分编码传输相邻信息之间的“变化”(即差值)将已数字化的比特流进行编码,从而提高传输的可靠性;数字调制采用 FSK 调制。接收通路中,数字信号处理模块采用 FSK 解调、差分解码和 CVSD 解码模块。

2.2 系统测试

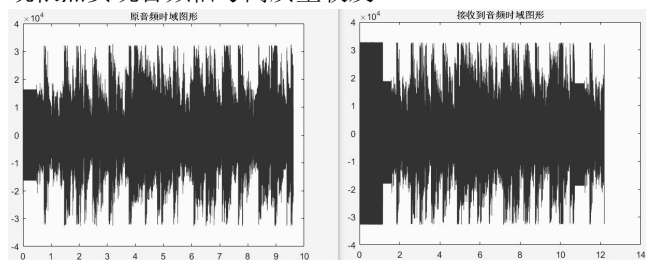
对所搭建的基于 SDR 的数字音频无线通信系统进行测试:(1)完成音频通信;(2)可进行射频前端配置。测试平台主要由两根天线、两台 eNodeX 10F 设备及两台已安装 eLabRadio 软件的笔记本电脑组成。如图 1 所示。



图 1 测试平台

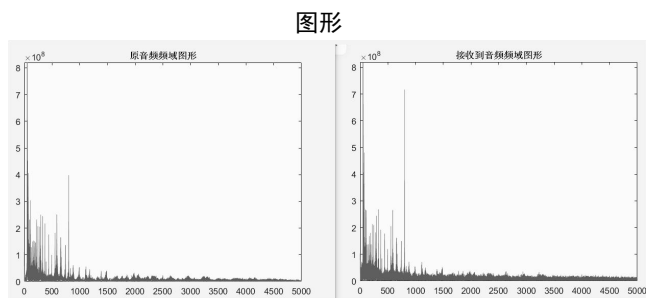
平台搭建过程中,首先在 eLabRadio 软件中搭建系统的数字信号处理模块,并对 eNodeX 10F 硬件平台进行射频参数配置(如:发射功率 0 dBm、带宽 1.2 MHz、收发频率:1.2 GHz)。将一首标准音质的音频文件通过所设计的数字音频无线通信系统,在收发端采用 Matlab 软件对音频收集并做时频域分析,如图 2 所示。通过对比发现,收发端时域和频域图形基本一致,可以证明所搭建的基于 SDR 的数字音频无线通信系统能够高质量完成音频信号的收发。此外,通过电脑自带的播放器,对收发端音频播放,从听觉上感知音频是一致的。然后,改变射频前端配置数据(如:发射功率 10 dBm、带宽 10 MHz、收发频率:1.4GHz),进行音频收发测试,系

统依然实现音频信号高质量收发。



(a) 发送端音频信号时域图形

(b) 接收端音频信号时域图形



(c) 发送端音频信号频域图形

(d) 接收端音频信号频域图形

图形

图2 收发端音频信号对比图

3 结语

随着通信技术的持续演进及应用性能需求的不断提升,无线通信系统正朝着智能自适应方向演进,这一发展趋势要求系统具备高度的灵活性和可重构性。基于SDR的无线通信系统中数字信号处理模块可实现编解码、调制解调等关键技术的灵活调整,可配置射频前端

参数,实现射频前端可重构。本文阐述了基于SDR的无线通信系统架构及其关键技术,以eLabRadio软件与eNodeX 10F硬件及配套天线为核心,设计并构建了一套基于SDR的数字音频无线通信系统原型。通过对所构建系统测试,验证了该架构中数字信号处理模块灵活可变、射频前端可配置,为后续开发智能自适应无线通信系统提供了可参考的技术框架。

参考文献

- [1] 韩烁. 舱体环境下 SDR-TR-MIMO 无线通信系统建模与实现[D]. 电子科技大学, 2019.
- [2] 钟鹏飞. 软件通信体系结构核心框架及监控平台设计实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [3] 叶森龙. 基于 SDR 技术的中波广播信号监测系统优化设计[J]. 电声技术, 2025, 49(08): 14-17.
- [4] 李鑫. 数字信号调制与信道编码方式识别技术研究[D]. 四川大学, 2021.
- [5] 崔潇田, 高勇. 利用指数范数的 QAM 信号调制识别方法[J]. 电讯技术, 2017, 57(11): 1278-1282.

作者简介: 肖菊兰(1985—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电子信息技术。

项目资助: 国家级大学生创新创业训练计划项目(2024 11116030); 成都工业学院校级课程建设项目(2021A04)