

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106532

基于 AD9364 的弹载小型遥测发射系统设计

李超杰^{1,2} 马游春^{1,2} 赵阳^{1,2} 李晋芳^{1,2}

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对传统弹载遥测通信系统所使用的分立元器件占用空间比重较大、移植性差的问题,设计了一款基于 ZYNQ 和 AD9364 的软件无线电零中频遥测发射机系统。该系统可以对采编器采集组帧后的数据进行 DQPSK 调制,利用 PS 端对 AD9364 进行寄存器配置,调制后的数据通过 PL 与 AD9364 之间的 LVDS 高速数据接口进行传输,在 AD9364 芯片内部完成上变频、滤波等处理后,经过功率放大模块,利用所设计的柔性天线将数据发送给地面接收站。最后,搭建了遥测发射机测试系统,对遥测发射机进行了调制通信测试,实现了系统的实地收发数据测试。测试表明,该系统有效降低了弹载遥测系统的体积、功耗和重量,而且依托强大的软件可重构性,不仅简化了硬件设计,还提高了设备通用性,传输距离也大大增加。满足了弹载遥测系统的小型化及通用性需求。

关键词: 软件无线电;弹载遥测;AD9364;DQPSK;柔性天线

中图分类号: TN914.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design of a small telemetry launch system based on AD9364

Li Chaojie^{1,2} Ma Youchun^{1,2} Zhao Yang^{1,2} Li Jinfang^{1,2}

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems that the discrete components used in the traditional missile-borne telemetry communication system occupy a large proportion of space and have poor portability, a software radio zero-IF telemetry transmitter system based on ZYNQ and AD9364 is designed. The system can perform DQPSK modulation on the data collected and framed by the editor, and use the PS terminal to configure the AD9364 registers. The modulated data is transmitted through the LVDS high-speed data interface between the PL and AD9364, and the up-conversion is completed inside the AD9364 chip. After processing, filtering, etc., the data is sent to the ground receiving station using the designed flexible antenna through the power amplifier module. Finally, a telemetering transmitter test system was built, and the telemetering transmitter was tested for modulation and communication, and the system's field data transmission and reception test was realized. Tests show that the system effectively reduces the size, power consumption and weight of the missile-borne telemetry system, and relying on powerful software reconfigurability, not only simplifies the hardware design, but also improves the versatility of the equipment, and the transmission distance is also greatly increased. It meets the miniaturization and versatility requirements of the missile-borne telemetry system.

Keywords: software defined radio; missile-borne telemetry; AD9364; DQPSK; flexible antenna

0 引言

遥测体制要突破传统无线电通信、计算机等技术的界限,形成技术上的统一,对平台可编程、可重复配置等技术提出了更复杂的设计要求^[1]。随着集成电路的发展和應用,遥测系统的发展方向逐渐趋近于小型化、标准化和模块化,特别是对于弹上遥测设备,系统的小型化和标准化的需

求成为了首要选择^[2]。针对传统弹载黑匣子的低回收效率、不稳定性和传统遥测系统的组成设备多、重量大、体积大、接口和电缆网复杂等缺点^[3],基于软件无线电技术的遥测具有显著的几个优点:天线智能化、前端宽带化、硬件通用化、功能软件化、软件构件化^[4]。

目前国内外遥测发射系统主要有两种设计方案。一种是利用分立元器件搭建的遥测发射机硬件平台,这种发射

机系统结构复杂、功耗大、成本高、通用性差^[5]；另一种采用集成化器件搭建的遥测发射硬件平台，遥测数据编码后经过滤波器滤波，滤波后的信号可以直接上变频至射频段，经过放大器和带通滤波器后，经天线发射出去^[6]。本文设计了一款基于 ZYNQ 和 AD9364 的软件无线电零中频遥测发射机系统，此系统集成度高、故障率低、功耗小、成本低、通用性强，能够适应于多种工作频段和工作场合，更加适用于小型化的弹载测试系统。

1 总体设计方案

弹载遥测系统一般分为弹上遥测设备和地面接收站^[7]，前者主要通过传感器将采集到的炮弹状况和采编器组帧过的数据发送给遥测发射机的数字基带处理部分进行调制，再传送给射频发射部分经过混频和一系列的滤波处理，然后通过功率放大器和天线发射出去，后者地面接收站主要是实时接收弹上发送的遥测信号，并完成后续的数据处理。本文主要研究的是弹载遥测发射机，实现对基带信号的调制、上变频处理，以发送的信号发射。

系统的硬件设计分为数字基带信号处理电路和 AD9364 射频发射电路^[8]。在数字基带信号处理电路中，核心电路为 ZYNQ 电路，ZYNQ 电路选用了 ADI 公司提供的 ZYNQ 芯片系列其型号为 XC7Z020 作为系统的主控芯片，主要负责基带信号的处理以及 AD9364 的配置与控制，它的高性能、低功耗、多核处理能力以及强大的嵌入式和可编程处理能力为软件无线电遥测系统提供了很大的便利。对于射频发射电路，ADI 公司推出的 AD9364 是一款高度集成的射频收发芯片，该芯片的本振工作范围为 47 MHz~6.0 GHz，包含遥测发射的工作频段；支持的通带带宽为 200 kHz~56 MHz，满足遥测数据带宽要求，并且内部提供白校准和自动增益控制系统，可以在变化温度和输入信号条件下保持高性能。系统以 ZYNQ 和 AD9364 为核心，搭配供电电路和时钟电路即可完成整体的硬件设计，因此大大减少了系统体积及功耗。系统原理如图 1 所示。

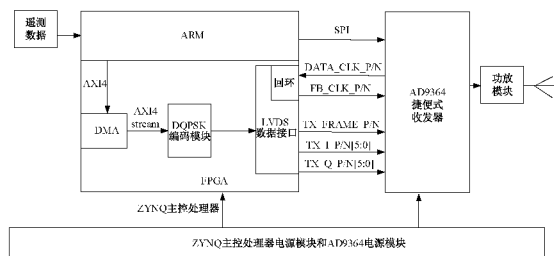


图 1 系统原理

2 系统硬件电路设计

2.1 系统主控模块设计

遥测发射机需要实现数据基带信号处理与调制、基带

部分与射频部分的数据高速传输^[9]，同时还要完成 AD9364 芯片的配置，这些功能都是由主控芯片来完成的，因而需要一个内部资源十分丰富的主控芯片才能够实现各项要求。虽然单独使用 FPGA 可以实现发射机的要求，但是这种发射机的性能不高，而且不能很好地适应不同的工作场合。

针对需要提高发射机性能，方便实现发射机的通用性，选择赛灵思公司提供的 ZYNQ-7020 作为系统的主控，这款芯片集成了 ARM 处理器 (PS) 和 FPGA 可编程逻辑 (PL)，其中 ARM 处理器可以满足系统多核处理，提供大量的外设接口^[10]；FPGA 采用 Artix7 架构，具有丰富的逻辑资源，可以满足数据的高速并行处理与传输。开发环境使用赛灵思提供的 VIVADO，在 VITIS 平台对 ARM 侧开发控制程序和基带算法，VIVADO 平台在 FPGA 侧实现逻辑功能模块和高速数据接口，ARM 与 FPGA 之间可通过片内高速 AXI4 总线接口实现大容量数据传输。此外，用户还可以直接使用多用途管脚 (MIO) 以及拓展多用途管脚 (EMIO) 来完成对 ZYNQ 处理器更多外设接口的控制。系统主控模块原理如图 2 所示。

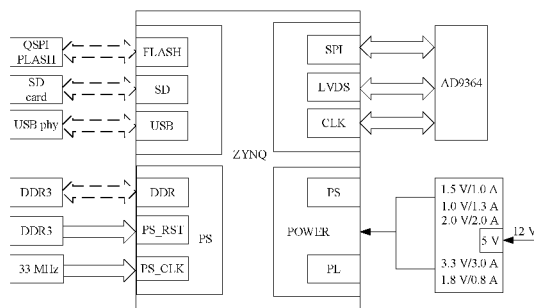


图 2 系统主控模块原理

2.2 射频发射电路设计

射频发射电路的设计是以集成式 RF 收发芯片为核心芯片进行的设计，主要包括 AD9364 的射频接口、时钟接口、LVDS 高速数字接口、SPI 控制接口和电源接口设计^[11]。AD9364 射频电路原理如图 3 所示。

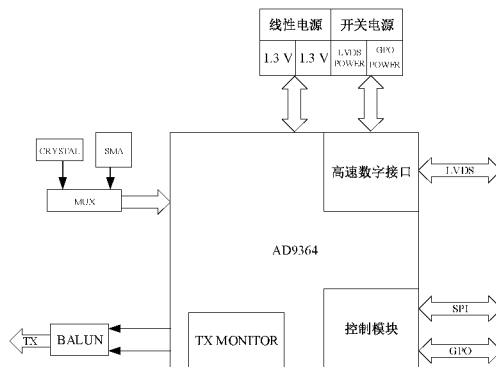


图 3 AD9364 射频电路原理

1) AD9364 射频接口设计

AD9364 射频接口包括一个接收路径和发射路径。发

射路径有两个发射输出(A和B)端口,输出端口需要外部阻抗匹配网络^[12]。

考虑到射频输入输出端口采用的为SMA接口,为了完成输入输出信号的单端和差分转换,因此需要添加一个巴伦,本文选用了TCM1-63AX+,它是Mini-circuits公司出品的,其工作频段为10~6 000 MHz它的带内插损在1.1~1.8 dB^[13],因此应用于此次设计中。在射频输出端口,差分信号由AD9364发射器经过一系列的滤波、D/A转换、混频、放大处理后,再由滤波电路滤波,最终通过巴伦将信号转换为单端信号从SMA接口输出。

2) 时钟接口设计

对于AD9364的时钟接口设计,在需要更加稳定时钟信号的时候,选择了频率为40 MHz外部输入时钟源将其连接至XTALN引脚,同时XTALP引脚保持断开状态,以保证AD9364芯片内部的RFPLL和BBPLL可以正常工作。

3) AD9364电源电路设计

AD9364必须通过如下3种电源供电:模拟电源、接口电源和GPO电源^[14]。考虑到发射机应用到小型化弹载上,因此不仅仅考虑到模拟电源的噪声,还要考虑到电路板的空间大小、便携式设备电池的容量、寿命。

在AD9364的3个不同的电源域中,模拟电源是芯片主要部分供电电压,需要为射频部分和功放部分提供电压,并且因为不同的电源域都具有不同的电源噪声抑制特性(PSRR);接口电源为独立电源,是为AD9364提供数字接口电压,系统采用数字接口采用高速的LVDS数据接口,因而将接口电源电压设置为1.8 V;VDD_GPO的输入电压范围为1.3~3.3 V,而VDD_GPO的上升速度必须快于1.3 V电源域,故在此我们将其电压设置为3.3 V。

电源模块选取ADI公司的ADP5040芯片,该芯片内部集成一个降压调节器和两个低压降稳压器,降压调节器的高开关频率可以为使用微型多层外部组件提供了环境,同时减少了电路板的空间,低压降稳压器的使用能够延长了发射机的电池寿命。因为需要重点关注模拟电源噪声,而不太注重需要考虑接口电源和GPO电源噪声。因此,如图4所示,在设计AD9364电源模块是,增加一个ADP1755电源芯片,用来降低电源噪声的影响,实现AD9364最佳性能。

4) 功率放大电路设计

功率放大电路主要用于将发射激励信号放大至发射所需的功率^[15],根据方案要求,遥测发射机的发射功率为1 W,且需选择高线性度功率放大器并且保证其工作频率在1.7~2.7 GHz之间,由dBm与W的对应公式可求得,发射功率为30 dBm。因此设计了驱动放大电路和末级功率放大电路来达到设计要求。

选择ADI公司的ADL5324驱动放大芯片,在工作频率为2 140 MHz时,其输出功率大于17 dBm。该芯片共有

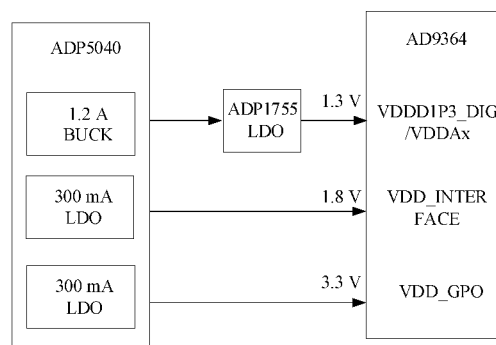


图4 AD9364电源方案图

射频输入RFIN、GND和射频输出RFOUT三个引脚。在设计中,对于电感 L_1 所处的射频输出引脚,使用5 V的直流偏置电压。对于两级放大电路,都是用了ADL5324芯片,第1级的驱动放大电路输出功率为12 dBm,而该芯片的放大倍数为14.6 dB,因此同样选择该芯片设计末级功率放大电路与上一级的驱动放大电路进行级联,达到了30 dBm的输出功率。

2.3 共形天线的设计

共形天线是一种与载体平台外形保持一致的天线。通常测试弹体会安装多种天线,用来实现弹体的导航,雷达监测等功能,这些天线会给弹体造成一定的阻力,因此在设计时需要将天线集成到弹体外侧^[16]。对于弹载共形天线而言,为了保证导弹的气动力学特性,要求天线具有较低的剖面高度,而如何在实现与载体表面共形后还能保持良好的性能成为关键技术。本文设计了一种小型化共形天线,同时为了保证地面能够接收到弹上遥测信号,系统的遥测天线采用两片天线共形安装在弹体两边,共形天线与弹体建模模型如图5所示。

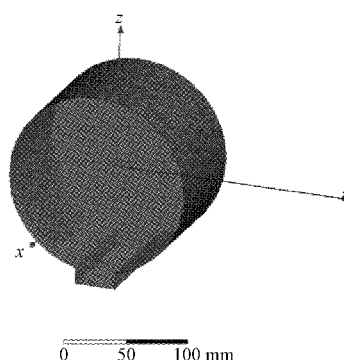


图5 共形天线与弹体建模模型

3 系统软件设计及仿真

3.1 LVDS数据接口设计

为了提高AD9364与基带部分的数据传输速率,AD9364数据接口设置为LVDS格式双端口双倍数据速率模式。因此需要再次调用Xilinx官方原语将差分信号转变

为单端信号。在 LVDS 模式下,采用 1R1T、FDD 模式需要两个时钟才能完成一个 12 位数据的发送,DATA_CLK_P 信号的上升沿和下降沿分别发出了 TX 信号的 I、Q 两路数据。在 TX_FRAME_P 为高电平时发出 I、Q 两路的高 6 位信号,为低电平时发出 I、Q 两路的低 6 位信号。

传输数据(TX_D[5:0])、FB_CLK 和 TX_FRAME 是由 BBP 驱动的,在 TX_FRAME 为高时,开始发送 I 路与 Q 路的高 6 位,为低时发送低 6 位,在每个字中,TX_D[5] 是最高位数据,而 TX_D[0] 是最低位数据。Tx 数字数据接口的时序在 Vivado 仿真结果分别如图 6 所示。

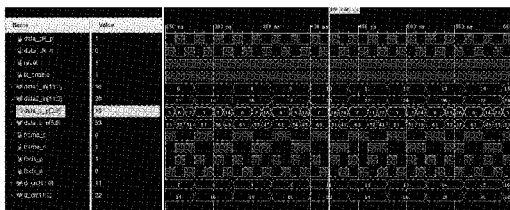


图 6 AD9364 数字数据接口的时序仿真图

3.2 AD9364 数据发送

1) AD9364 寄存器配置

AD9364 内部有许多个寄存器,用户可以通过配置其寄存器值来设定其收发方式、本振频率、基带锁相环频率、TX 通路 FIR 滤波器系数、TX 增益等。虽然 ADI 公司提供一个配置寄存器软件来获取需要配置的寄存器值,用户可以通过 SPI 总线协议,使用 Verilog 代码编写来配置 AD9364,当需要更改 AD9364 工作方式时,还需工程师做二次开发,通过部分自定义实现特定应用,可移植性差。

为了更加方便地配置 AD9364 寄存器,可以选择使用 PS 端来进行寄存器配置。AD9364 提供一个 SPI 接口来配置内部的寄存器,因此在配置时,首先需要初始化 SPI 和初始化 AD9364,初始化完成后就可以通过 SPI 接口将需要配置的寄存器数值配置进去。依次打开使能 TX 滤波器、配置滤波器参数、设置采样频率、本振频率、TX 发射带宽、TX 衰减等重要参数。重要寄存器配置函数与说明如表 1 所示。

表 1 AD9364 重要寄存器配置函数

函数名称	函数
TX 滤波器使能函数	ad9361_set_tx_fir_en_dis
TX 滤波器配置参数	ad9361_set_tx_fir_config
TX 采样频率	ad9361_set_tx_sampling_freq
TX 本振频率	ad9361_set_tx_lo_freq
TX 射频带宽	ad9361_set_tx_rf_bandwidth
TX 发射衰减	ad9361_set_tx_attenuation

2) DQPSK 调制信号发送

为了不出现在信号传输和解调过程中发生相位翻转,接收机无法准确得到原始数据,发射机采用相对相移键控

(DQPSK)的调制方式。这种调制方式与 QPSK 相比,只需要在发射端将遥测数据原始绝对码转成相对码,在接收端将遥测数据相对码转成绝对码即可。

DQPSK 调制系统如图 7 所示,先将遥测单比特数据进行串/并转换、绝对码转相对码、低通滤波器滤波、载波调制,最终完成 DQPSK 调制过程,得到的仿真波形如图 8 所示。

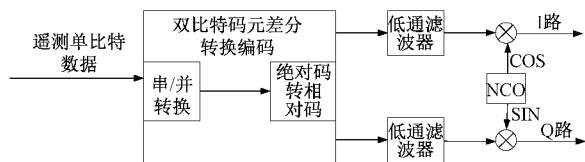


图 7 DQPSK 调制原理



图 8 DQPSK 调制信号图

由仿真图可以得知,绝对码 ab 转换为了相对码 cd 完成了数据的差分编码,通过成形滤波和载波调制后,得到 I、Q 两路信号,实现调制过程。

3.3 遥测共形天线的仿真

对建模的共形天线使用 Ansoft HFSS 软件进行仿真分析,得到其方向图如图 9 所示。

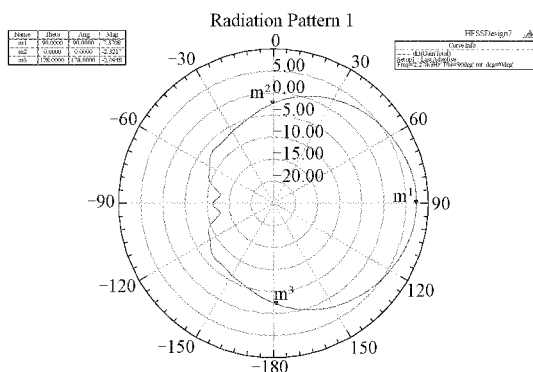


图 9 S 波段单片天线方向图

从仿真结果看 S 波段单片天线增益为 7.3 dBi。增益 ≥ -2 dBi 的波束角度达到 170° ,满足指标要求。同时天线贴片采用共形的方式与弹体结合,从仿真结果可以看出,在下半空间中,增益最小为 -1 dB,大于要求的 -2 dB。如图 10 所示为天线安装示意图,两天线中心的夹角为 110° 。

4 系统测试与结果分析

在遥测发射机实物测试中,依托于某科研单位的弹丸进行飞行测试。将小型化遥测系统搭载到弹丸内部,通过温度、压力等传感器采集到信号经过处理、采编后,进行组

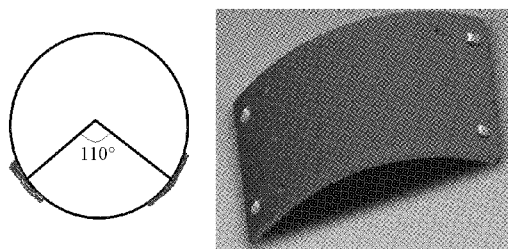


图10 天线安装示意图

帧。为了保证遥测发射机持续工作,在组帧过程中需要进行数据填充,当一帧有效数据不足 51 Byte 时,使用数据 cc 进行填充。组帧编码后的数据以 1 024 kbit/s 的码速率进行 DQPSK 调制后,在 AD9364 内部完成上变频至 2.26 GHz,最后通过搭载的柔性天线将数据发送出去,为了满足数据发射效率,数据带宽设置为 20 MHz。

4.1 遥测通信测试

弹丸发射前,对遥测发射系统进行链路测试。具体测试方案为:先对遥测发射系统上电处理,然后通过地面接收站进行参数设置,设置界面如图 11 所示,解调模式选择 QPSK,接收频率设置为 2 260 MHz,码速率设置为 1 024 kbit/s,子帧长设置为 64,码型为 NRZ-L,同步码为 EB90,同步码位数为 16。确认设置后,数据锁定指示灯亮起时,表明遥测通信链路正常,满足遥测通信要求。点击保存数据按钮,遥测数据开始记录。

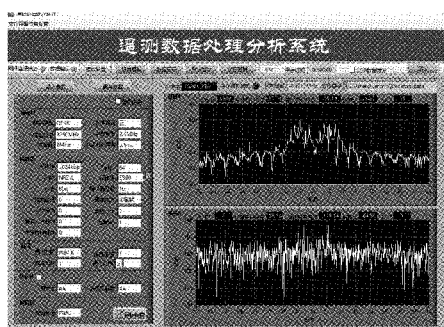


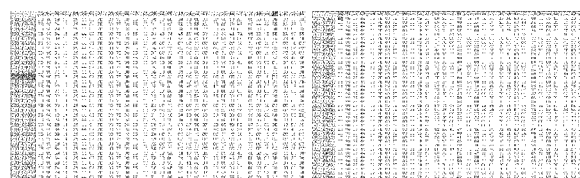
图11 遥测接收地面站参数配置界面

4.2 遥测数据传输性能测试

为了保证数据可靠性,弹载测试系统内部会使用一个微型记录仪对数据进行备份。遥测地面站将接收后的数据进行解析,其中 01~0d 为数据帧头,包含数据帧头、数据长度、时间、帧计数等信息,其他的为数据信息,如图 12(a)所示。为了验证遥测数据传输的正确性,将弹载记录仪内部备份数据读出,经过解析,得到数据如图 12(b)所示,经过对比,除图 12(b)没有时间数据外,两者数据完全一致,因而验证遥测数据调制正确,满足设计要求。

4.3 系统功耗测试

为了满足遥测发射系统在实际应用中供电功耗的需求,需要对遥测发射系统进行功耗测试。本系统采用额定电压为 3.7 V 的锂电池供电,充电完成后对该系统的供电



(a) 遥测解析数据 (b) 弹载记录仪数据

图12 遥测解析数据与弹载记录仪数据图

时长进行测试,经过多次测试,平均工作时间为 18 h,符合实际应用要求。

5 结 论

本文以实现弹载遥测发射系统的小型化需求为目的,提出了一种基于 AD9364 的遥测发射系统设计,以 ZYNQ 为系统主控,搭配射频芯片 AD9364 完成了整体设计,整个系统分为以 ZYNQ 为主控的基带数据处理部分和以 AD9364 为核心的射频发射部分,据此提出了系统软硬件设计,并且提出了系统的硬件总体设计方案以及核心模块的设计,同时在软件设计及仿真中,通过进行时序仿真,验证了程序设计的正确性。

在对弹载遥测发射机进行了实物及测试系统的搭建后,测试结果证明遥测发射机寄存器配置的正确和 DQPSK 调制通信的正确,而后在此基础上,进行了数据的收发测试,依托于某科研单位的炮弹飞行试验,将遥测发射机搭载在弹丸上,最终完成了数据的成功发送,同时在接收机上可以接收到数据。最终完成的遥测发射机的体积为 100 mm×44 mm×11 mm,达到了弹载遥测发射系统的小型化需求,同时也验证了系统的可靠性。

参考文献

- [1] 罗亨,齐建中,王乐.一种新型的可编程遥测收发机设计[J].无线电工程,2018,48(9):727-731.
- [2] 栾东海,肖慧敏,王庆博.基于AD9364的小型化航空遥测系统设计[J].遥测遥控,2018,39(5):33-36,45.
- [3] 闫新峰,金文,耿健.小型空间飞行器集成化遥测系统设计与实现[J].测控技术,2020,39(7):73-77.
- [4] 宋腾辉,窦峥,林云.智能无线电技术[J].中兴通讯技术,2014,20(1):63-66.
- [5] 姚辰,王竹刚,熊蔚明.基于AD9364的通用软件无线电平台的FPGA设计与实现[J].电子设计工程,2018,26(2):149-153,158.
- [6] 董静怡,庞景月,彭宇.集成LSTM的航天器遥测数据异常检测方法[J].仪器仪表学报,2019,40(7):22-29.
- [7] 石磊,朱洪海,于雨.基于双目立体视觉的波浪参数遥测方法研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(3):99-104.
- [8] 韩仕鹏.基于AD9361的频谱感知实现[C].杭州:杭州电子科技大学,2019.
- [9] 苏鹏,高燕,董婷婷.多星遥测联合判断实时故障分析

- 模型设计及应用[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9): 128-131.
- [10] 罗霄, 薛亚洲, 张乐. 一种无人机飞控计算机硬件平台的设计实现[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 50-54.
- [11] 严旭东. 基于 AD936X 的无线收发机设计与实现[C]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [12] 龚文浩, 孙国良, 黄智刚. 基于 AD9361 的伪卫星信号发射器设计[J]. 现代导航, 2018(1): 18-23.
- [13] 冯伟, 曹琳, 滕飞. 一种机载无线电通用硬件平台的设计与实现[J]. 信息通信, 2020(3): 111-112.
- [14] 张鹏辉, 张翠翠, 赵耀. 基于 ZYNQ-7000 FPGA 和 AD9361 的软件无线电平台设计[J]. 实验技术与管理, 2019(8): 85-93.
- [15] 王连美. 软件无线电中宽带射频功率放大器的研究与设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
- [16] 张鹏. 软件无线电技术在移动通信测试领域的应用[J]. 电子测量技术, 2013, 36(3): 110-117.

作者简介

李超杰, 硕士研究生, 主要研究方向为微测试计量技术及仪器、遥测通信技术。

E-mail: 2959516520@qq.com

马游春(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为微测试计量技术及仪器、光纤光栅传感技术。

E-mail: 798965939@qq.com