

# 一种通用小型弹载图像遥测设备设计

吴江波<sup>✉</sup>, 韩 杰, 刘建梁  
(天津讯联科技有限公司 天津 300000)

**摘要:** 弹载遥测设备是导弹研制阶段的重要参数测量设备, 中小型导弹通常给遥测设备可使用空间比较狭小。目前, 国内某小型导弹遥测设备指标提出了 10 Mbps 码率、能支持红外图像传输以及支持波道表在线可编程的要求, 传统遥测产品的设计方案无法解决遥测设备体积小和功能全的突出矛盾。利用软件无线电的设计思想, 采用 AD9361 和 FPGA 的硬件架构, 使用了软件在线可编程技术、GMSK 先进调制技术、基于 FPGA 的 JPEG2000 图像压缩技术和对称赋形天线技术, 实现了一款集成度高、可靠性好、通用经济的先进弹载图像遥测设备。通过测试试验表明, 弹载遥测设备简化了以往复杂的硬件设计, 有效降低了弹载遥测设备的体积、重量和功耗, 高集成度提高了产品可靠性, 而且具备可重构能力, 提高了弹载遥测设备的通用性和试验效率, 有利于降低研发成本。

**关键词:** 弹载遥测设备; GMSK; JPEG2000; FPGA

中图分类号: TN98 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)05-0074-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211015001

引用格式: 吴江波, 韩杰, 刘建梁. 一种通用小型弹载图像遥测设备设计[J]. 遥测遥控, 2022, 43(5): 74-81.

## Design of a universal small missile-borne image telemetry equipment

WU Jiangbo, HAN Jie, LIU Jianliang

(Tianjin Xunlian Technology Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

**Abstract:** The missile-borne telemetry equipment is an important parameter measurement equipment in the missile development stage, small and medium-sized missiles usually have a relatively small space for telemetry equipment. A certain domestic small missile telemetry equipment index puts forward the requirement of 10 Mbps bit rate, which can support infrared image transmission and support the online programming of the channel table. The design scheme of traditional telemetry products cannot solve the prominent contradiction between the small size and full functions of telemetry equipment. Utilize the design idea of software radio, adopting AD9361 and FPGA hardware architecture, using software online programmable technology, GMSK advanced modulation technology, FPGA-based JPEG2000 image compression technology, symmetrical shaped antenna technology to achieve a high integration, good reliability, general economy advanced missile-borne image telemetry equipment. Tests show that the missile-borne telemetry equipment simplifies the complex hardware design in the past, effectively reduce the size, weight and power consumption of missile-borne telemetry equipment, the high level of integration improves the reliability of products, and has the ability to reconfigure, which improves the versatility and test efficiency of missile-borne telemetry equipment, which is conducive to reducing research and development costs.

**Key words:** Missile-borne telemetry equipment; GMSK; JPEG2000; FPGA

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20211015001

**Citation:** WU Jiangbo, HAN Jie, LIU Jianliang. Design of a universal small missile-borne image telemetry equipment[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(5): 74-81.

## 引 言

随着国防工业的快速发展, 弹载遥测设备仍然是导弹飞行试验不可缺少的测量手段, 其可以通过无线电技术获取飞行试验的宝贵数据。对于一些中小型导弹, 如何在狭小的空间内获取更多导弹飞行参数是一直令研究人员困扰的难题<sup>[1]</sup>。传统的设计方案采用分立器件设计, 增加了设备体积、成本和设计

<sup>✉</sup>通讯作者: 吴江波 (wjb86331852@163.com)

收稿日期: 2021-10-15 收修改稿日期: 2022-02-07

难度，降低了采集遥测系统参数的数量，传输速率得不到提高，同时由于“一个型号产品对应一套遥测产品”，通用性、兼容性变差，研发成本和维护工作量增加，可靠性也得不到保障<sup>[2,3]</sup>。另外，越来越多的用户要求弹载遥测图像可以实时传输到地面并显示，这对带宽及频带利用率提出了更高的要求。

软件无线电 SDR (Software Defination Radio) 的出现很好地解决了这一难题，其采用可配置的应用软件实现各种无线电传输功能。ADI 公司推出的 AD9361 捷变频收发器是一款基于 SDR 架构的高性能、高集成度的射频收发器件<sup>[4,5]</sup>，该器件集射频前端与灵活的混合信号基带部分为一体，集成频率合成器，为处理器提供可以配置的数字接口，具有高度的可编程性和宽带能力，尺寸仅为 1 cm × 1 cm，不需要外部 AD、DA、混频器等器件，从而很大程度上减小了以往遥测设备的体积、重量和功耗<sup>[6,7]</sup>。本文介绍一种基于 FPGA 和 AD9361 的软件无线电弹载遥测装置，采用软件在线可编程技术、GMSK 调制技术、基于 FPGA 实现的 JPEG2000 图像压缩技术、对称赋形天线技术，实现了弹载遥测数据及图像信息的高速可靠传输，不仅简化了以往的硬件设计，降低了体积、重量和功耗，而且具备可重构能力，提高了遥测设备的通用性和试验效率，从而降低研发成本。可视化实时图像显示可使用户直观看到飞行器与目标的相对位置，近乎无损的图像对用户事后分析和目标特征提取更加有利。

### 1 弹载遥测设备

弹载遥测设备在下传 AD 采集量和数字量的同时，往往需要下传导引头图像信息，而把所有的图像信息下传则数据量巨大，会占用较大的传输带宽<sup>[8]</sup>。目前，主要采用两种方式降低通信传输速率：一种是降低图像帧率，另外一种是通过图像压缩的方式。而前者会造成图像信息的不连续性，不利于事后分析，后者可通过图像解压缩的方式，将图像信息还原，保留了图像信息的连续性，有利于事后对图像的分析。

文献[9]和文献[10]采用了 FPGA 与专用图像压缩芯片 ADV212 实现 JPEG2000 图像压缩功能，而 ADV212 已经停产，后续产品使用维护得不到保障，也不利于实现产品小型化。实现图像压缩和无线传输功能主要采用 ARM+FPGA 的设计方案<sup>[11]</sup>。由 ARM 内图像压缩硬核完成对图像信息的压缩，FPGA 完成数字信号的调制解调功能，表 1 为两种实现方案架构对比。

表 1 实现方案架构对比  
Table 1 Implementation scheme architecture comparison

方案架构	优点	缺点
ARM+FPGA	成本低、功耗低	体积大、接口速率慢、ARM 主频低
ZYNQ 系列 FPGA	体积小、功耗低、接口速率快、ARM 主频高	成本适中、图像压缩软核实现

基于表 1 对比结果，本文设计选择 ZYNQ 系列 FPGA，在完成基本功能的同时，又能兼顾小型化，通用化、功耗低的优点。

### 2 关键技术

#### 2.1 软件在线可编程

传统软件的更新维护需要更新 FPGA 的代码进行升级，需要使用下载器到现场更新。而且弹载遥测设备一旦整装，拆卸升级程序将耗费大量的时间与精力，增加了维护成本。本设计采用一种在线可升级的方法，通过上位机使用 UART 对 FPGA 进行在线升级操作。由上位机载入升级 BIN 文件，通过 UART 接口将升级文件数据传到 FPGA，FPGA 将接收到数据再通过 SPI 接口烧写到 Flash 中，完成升级操作，如图 1 所示。同时采用 MultiBoot 技术，如图 2 所示，在更新失败的情况下 FPGA 可加载 Flash 中的备份程序正常启动，确认问题后可继续更新。软件在线可编程，能在不拆卸遥测设备的情况下，使 FPGA 升级维护省时省力，减轻了工作人员的负担，也消除了弹载遥测设备因拆卸带来的不确定问题。

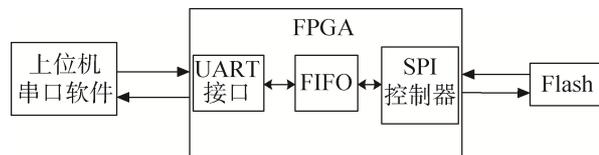


图 1 软件在线可编程实现框图

Fig. 1 Block diagram of online programmable implementation of waveguide meter

### 2.2 GMSK 调制

传统遥测通信体制采用 PCM-FM 方式，调制指数一般为 0.7~0.75，由于相位不连续会造成频谱扩展，频带利用率不高<sup>[10]</sup>。本次设计传输速率为 10 Mbps、调制指数为 0.5，也就是最小频移键控 MSK，其具有传输带宽小、频谱利用率高的特点，是相位连续的恒包络信号，具有较强的抗噪声干扰能力<sup>[13]</sup>。同时在后级加入高斯脉冲成型滤波，可进一步提高频谱特性<sup>[14,15]</sup>。

为了比较 2FSK 和 GMSK 的调制性能，建立如图 3 所示的 2FSK、GMSK 调制仿真系统模型。参数设置基本一致，2FSK 的高斯白噪声信道为 -3 dB，GMSK 的高斯白噪声通道设置为 -6 dB。频谱仪仿真结果如图 4 所示。从频谱仪仿真结果可以看出：在误码率为相同量级的条件下，GMSK 占用的频带宽度较小，且 GMSK 的传输环境的信噪比相较于 2FSK 低 3 dB。

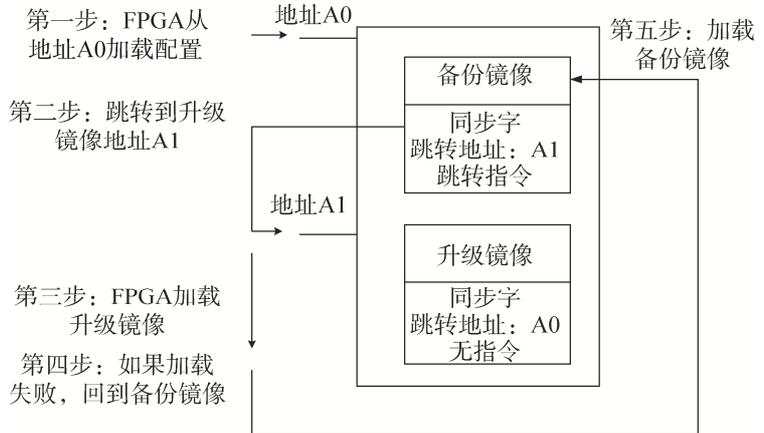


图 2 MultiBoot 技术配置流程

Fig. 2 MultiBoot technology configuration process

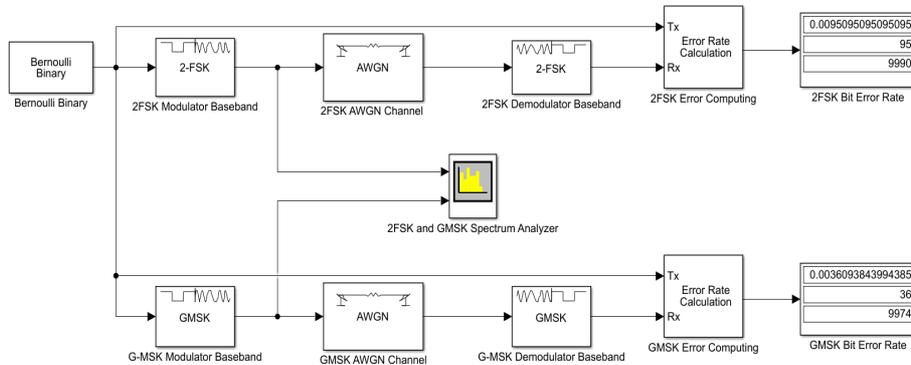


图 3 2FSK、GMSK 调制仿真系统模型

Fig. 3 2FSK, GMSK modulation simulation system model

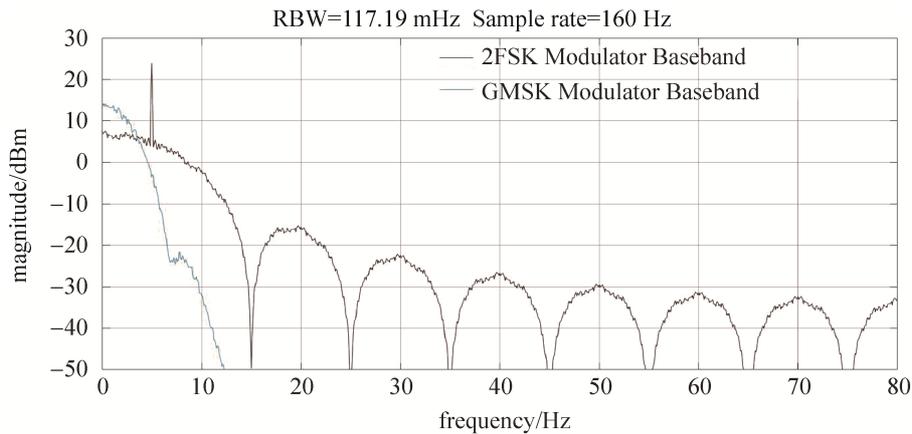


图 4 2FSK、GMSK 基带调制信号频谱

Fig. 4 2FSK, GMSK baseband modulation signal spectrum

### 2.3 JPEG2000 图像压缩

基于 FPGA 可实现 JPEG2000 和 H.264 的图像压缩算法，但 H.264 是将多张图像作为一个图像组进行压缩，关键帧的传输错误会影响整个图像组的成像质量，导致视频质量的下降，存在较大的编码延时，

随机访问的性能较差，无法从编码后的数据中直接提取特定的某一帧图像。这对于随机存取和图像质量要求较高的遥测事后分析是较为严重的缺点。JPEG2000 作为静态图像编码标准，具有更好的成像效果，支持无损压缩，同时提供了感兴趣区域编码功能。因此，JPEG2000 更有利于对弹载红外图像信息特征的事后分析<sup>[16,17]</sup>。

LVDS 图像采集分辨率为 128×128，帧频 50 Hz，位宽 14 bits，原始红外图像速率为 128×128×14×50=11.468 8 Mbps。基于 FPGA 实现的 JPEG2000 图像压缩模块输入位宽为 16 bits，为了降低压缩后图像的丢失，输入的图像数据高 8 位采用无损压缩，压缩比约为 2 : 1；图像数据的低 8 位采用有损压缩，压缩比为 4 : 1，图像信息压缩后速率约为 5 Mbps，CAN 接口通信、模拟量采集数据传输速率按照 3 Mbps 计算，空帧填充 CCh，满足指标中的 10 Mbps 传输速率。

### 2.4 对称赋形天线

为了保证导弹的气动力学特性，以及地面站能够可靠接收到弹载遥测信号，弹载遥测天线采用两个天线共形安装到弹体两侧。舱体简化为一个直径 70 mm，舱体长度  $h=600$  mm 的金属圆柱体，舱体上面开金属凹槽作为天线安装位置，凹槽位置在舱体中间，以天线不突出载体包络为准，两个天线单元在载体周向对称安装，如图 5 所示。天线仿真结果如图 6 所示。

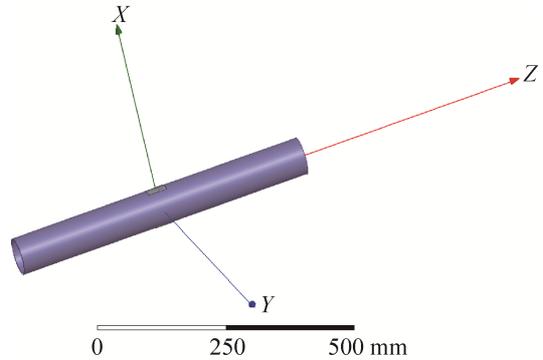


图 5 共形天线仿真模型

Fig. 5 Conformal antenna simulation model

Name	Theta	Ang	Mag
m1	-34.0000	-34.0000	-3.9688
m2	34.0000	34.0000	-3.9907
m3	150.0000	150.0000	-2.7005
m4	-150.0000	-150.0000	-2.6659
m5	-120.0000	-120.0000	-0.9322
m6	120.0000	120.0000	-0.9068

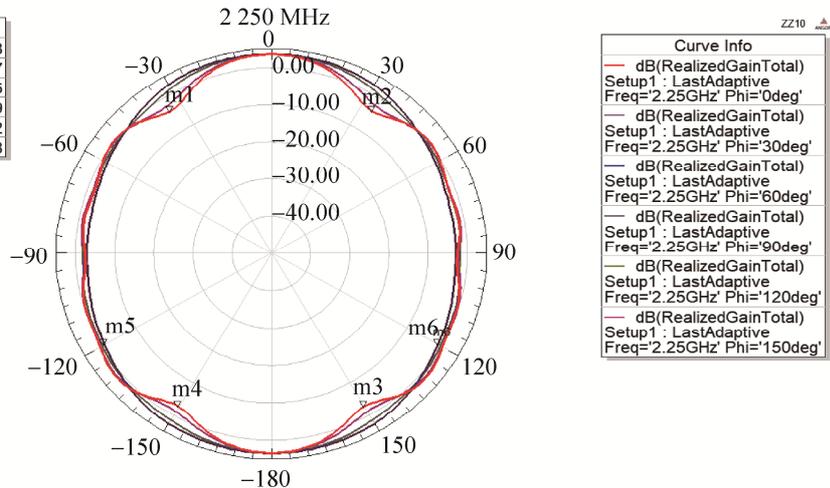


图 6 天线二维仿真图

Fig. 6 Antenna two-dimensional simulation diagram

由仿真结果知，两天线合成方向图增益，在工作频段，在载体尾部（±60°范围内），两天线合成方向图增益仿真值 ≥ -3.0 dB，其他方向增益仿真值 ≥ -4.3 dB。

### 3 实现与测试

基于某型号以及总结大部分遥测产品任务需求，以下指标可以满足大部分小型化导弹型号需求。另外总体方案采用模块化设计，可通过更改采编模块对需要的采集量进行更改。

- a) 模拟信号采集：16 路，输出位数为 8 bit/Sample，量化精度不高于 1%；
- b) 具有 LVDS 接口，最大传输速率为 270 Mbps，用于红外图像采集；
- c) 具备 1 路 CAN 接口，采用 CAN2.0B 标准帧格式，通信速率为 120 kbps；
- d) 传输体制：PCM-GMSK；

e) 码速率:10 kbps~10 Mbps 可调;

f) 尺寸: Φ65 mm × 45 mm。

### 3.1 设计实现

基于 AD9361 弹载遥测装置设计方案如图 7 所示。弹载遥测装置使用两片 ADS8638, 通过 ADS8638 采集导弹路模拟信号转换为数字量, 通过 CAN 收发器和 LVDS 芯片采集数字量和弹载图像信息。在 FPGA 内, 将采集到的数据按照规定的帧格式进行 PCM 流组帧, 并且将 PCM 帧进行 MSK 调制后发送到 AD9361, 由 AD9361 进行 DA 转换直接变频到需要的频段。由于 AD9361 输出功率较低, 仅靠 AD9361 的输出功率, 传输距离远远低于导弹的飞行距离, 因此通过后级功率放大模块将 AD9361 输出的信号进行放大, 由天线将信号无线传输至遥测地面站解调。

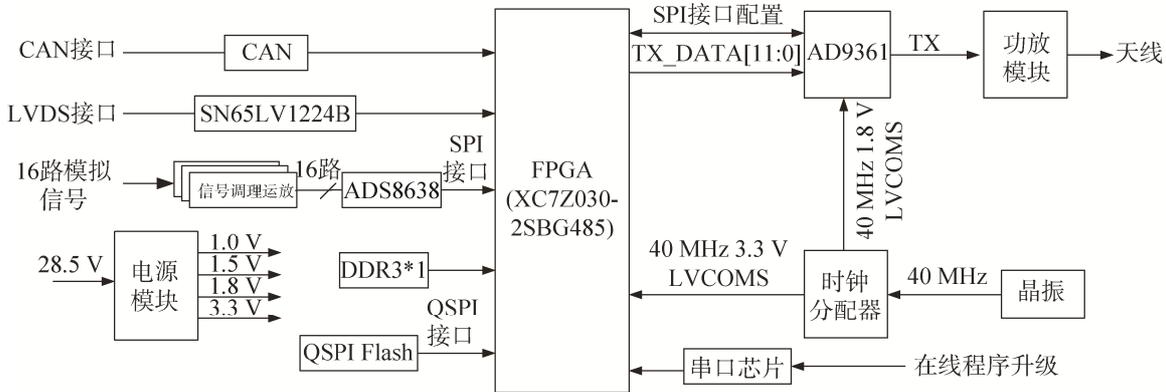


图 7 基于 AD9361 弹载遥测装置设计方案

Fig. 7 Design scheme based on AD9361 missile-borne telemetry device

#### 3.1.1 模拟量转换电路

模拟量采集电路分为信号调理电路和 AD 转换电路。信号调理电路采用四通道高速运放 OP482 将单端输入正负电压幅度调整到-10 V~+10 V 以内, 满足 AD 芯片输入范围要求。

幅度变换电路采用电阻分压的方式, 因后续需要对采集结果进行校准, 电阻值的准确度可不计算在量化误差以内。运算放大器最大偏差约为 2 mV, ADS8638 的分辨率为 12 位, 在-10 V~+10 V 范围内采样精度约为 0.3%, 满足采样精度的要求。ADS8638 采集电路原理如图 8 所示。

#### 3.1.2 CAN 接口电路

CAN 接口通信电路通过 FPGA 上的 CAN 控制器实现, 接口选用 TI 公司的 SN65HVD231。CAN 控制器兼容 ISO11898-1、CAN2.0A 和 CAN2.0B 标准, 通信速率达到 1 Mb/s, 满足指标要求。CAN 通信接口电路原理如图 9 所示。

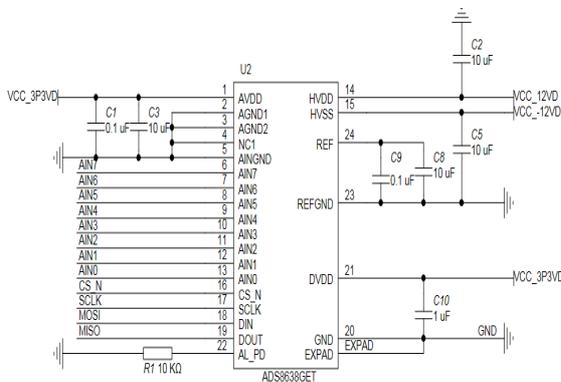


图 8 ADS8638 采集电路原理图

Fig. 8 ADS8638 acquisition circuit schematic diagram

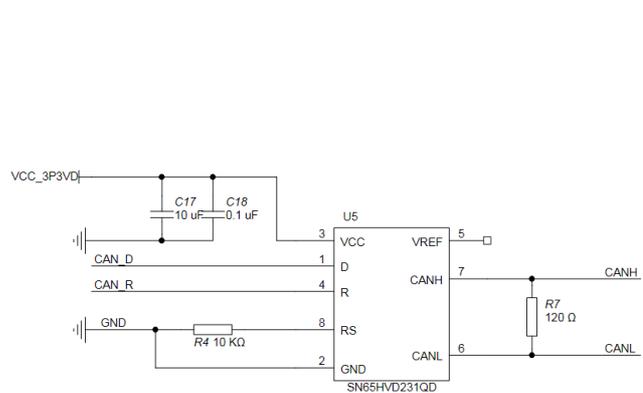


图 9 CAN 通信接口电路原理图

Fig. 9 CAN communication interface circuit schematic diagram

### 3.1.3 LVDS 接口电路

LVDS 接口电路主要用于采集弹载导引头的图像数据，接口芯片采用 TI 公司的 SN65LV1224B，串行通信速率为 100 Mbps~660 Mbps，满足指标要求。SN65LV1224B 接口电路原理如图 10 所示。

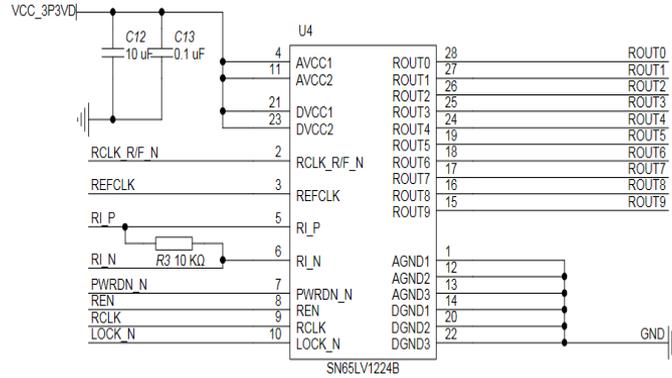


图 10 SN65LV1224B 接口电路原理图

Fig. 10 SN65LV1224B interface circuit schematic diagram

### 3.1.4 功率放大电路

功率放大电路主要由带通滤波器、驱动放大器、功率放大器、隔离器和功分器组成。功能放大电路框图如图 11 所示。

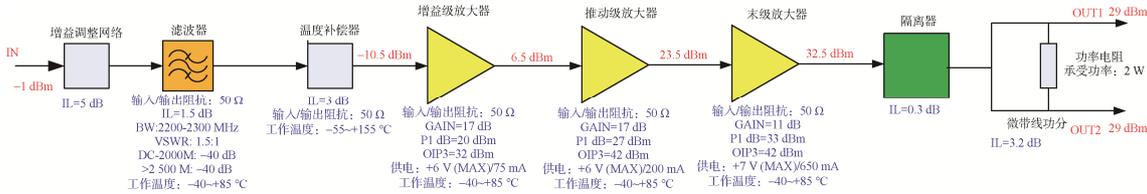


图 11 功率放大电路框图

Fig. 11 Block diagram of power amplifier circuit

功率放大电路包括了增益温度补偿、增益调整网络、放大链路、滤波链路、隔离网络、功分器和偏置电路。增益温度补偿：为了补偿有源放大器件高温增益低、低温增益高的特性，加入了温度补偿衰减器；增益调整网络：用来衰减富余的增益，将末级放大器推至饱和；滤波链路：使用中心频率为 2250.5 MHz，带宽为 100 MHz 的介质滤波器；放大链路：使用增益级放大器、推动级放大器、末级放大器组成三级放大链路；隔离网络：使用隔离器，对开路、短路保护；功分器：使用微带功分，对通过隔离器的功率分成两路输出；偏执电路：对三级放大链路进行供电。

### 3.2 测试结果

采集后的数字量在 FPGA 内进行组帧，之后使用 DDS 进行 MSK 调制，将调制后的 MSK 信号经高斯滤波发送到 AD9361，使用 N9020 频谱分析仪测试，调制后的输出频谱如图 12 所示。

设置地面站参数，设置接收频率为 2 250.5 MHz，接收带宽为 18 MHz，解调模式为 FM，码率为 10 Mbps，码型为 NRZ-L，帧长为 125 字节，帧码组

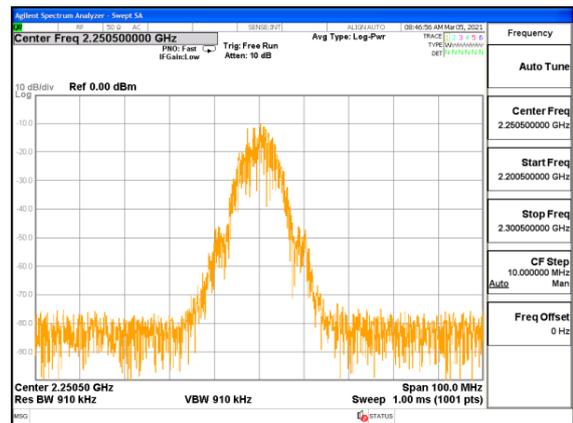


图 12 弹载遥测装置 GMSK 频谱

Fig. 12 GMSK modulation spectrum of missile-borne telemetry device

EB90H。确认设置后, 码锁定、帧锁定指示灯亮起, 表明遥测通信链路正常, 满足遥测通信要求。对遥测地面站接收到的数据进行解析, 第 0~12 列分别为帧头 EB90H、8 字节时间码、1 字节 ID 号、2 字节帧计数, 其他为数据信息。经过长时间多次测试, 帧计数连续, 不存在数据丢失现象, 遥测数据正常。图 13 为对遥测数据提取图像信息后, 分别对高 8 位、低 8 位以及合成后图像显示效果。图 14 为红外原始图像, 合成后显示效果与原始图像对比无差异。其中, 合成后图像与原始图像像素最大差值为  $0x14$ , 经过多次测试比对, 像素差值均在技术要求范围内, 这样利于对事后图像进行分析和测试利用。

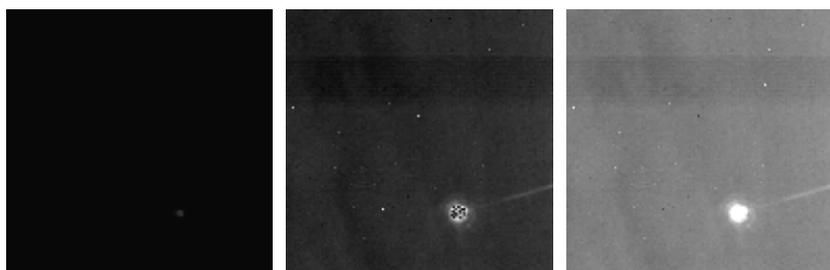


图 13 遥测图像高 8 位、低 8 位、合成效果显示

Fig. 13 Telemetry image high 8-bit, low 8-bit, composite effect display

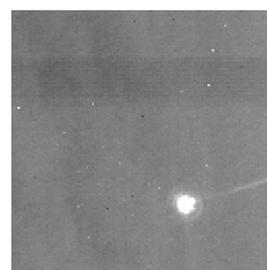


图 14 原始图像

Fig. 14 The original image

#### 4 结束语

本文介绍了一种基于 AD9361 和 FPGA 硬件架构的弹载遥测装置, 实现了模拟量、数字量、图像数据的采集和传输, 并且具有较高的传输速率和采样精度, 满足了小型化、可配置化的需求, 目前在多个项目中得到应用, 可靠稳定。

基于 AD9361 和 FPGA 硬件架构的弹载遥测装置, 颠覆了传统设计思想, 减少了分立器件的使用, 弹上空间得到充分地利用, 高集成度提高了产品的可靠性, 软件可配置提升了产品的研发效率, 大大降低了成本, 使得遥测产品通用化得到提高。AD9361 在弹载遥测方面有着广阔的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 杨道琨, 卢艳铃, 王振领, 等. 小型化低成本单向弹载数据链设计[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39(6): 45-49.  
YANG Daokun, LU Yanling, WANG Zhenling, et al. A low-cost miniaturized unidirectional missile data link design[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2019, 39(6): 45-49.
- [2] 韦宏利, 满振国. 基于 AD9364 的软件无线电在遥测系统上的应用研究[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(10): 1937-1939.  
WEI Hongli, MAN Zhenguo. Research on the application of software radio based on AD9364 in telemetry system[J]. Computer & Digital Engineering, 2017, 45(10): 1937-1939.
- [3] 马文超, 涂卫军, 李科连, 等. 弹载遥测系统总体关键技术的研究与应用[J]. 遥控遥测, 2021, 42(6): 78-83.  
MA Wenchao, TU Weijun, LI Kelian, et al. Research and application of the key technology for onboard telemetry system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(6): 78-83.
- [4] 余莲. AD9361: 基于突破性技术促进软件定义无线电应用[J]. 电子技术应用, 2013, 39(11): 1-2.
- [5] 叶雷. ADI: 用 AD936x 打通 SDR 之路[EB/OL]. [2015-02-15]. <http://home.eeworld.com.cn>.
- [6] Analog Device Inc. AD9361 Referug-570[EB/OL]. <https://www.analog.com>.
- [7] 姜浩, 张治. 基于 AD9361 的软件无线电平台设计与实现[J]. 电视技术, 2015, 39(15): 51-54.  
JIANG Hao, ZHANG Zhi. Study on software defined radio system based on AD9361[J]. Video Engineering, 2015, 39(15): 51-54.
- [8] 张剑峰. 基于 FPGA 的弹载遥测采编电路设计[J]. 电子质量, 2019, 7: 11-14.  
ZHANG Jianfeng. Design of acquisition and editing circuit for missile-borne telemetry based on FPGA[J]. Electronics Quality, 2019, 7: 11-14.
- [9] 马豹, 焦胜利, 尹冬强. 基于 FPGA 的弹载遥测图像压缩系统[J]. 电子技术与软件工程, 2017, 16: 87-29.

- [10] 张朔, 王霞. 一种基于 FPGA 与 ADV212 的图像压缩系统设计[J]. 激光杂志, 2021, 42(5): 57–61.  
ZHANG Shuo, WANG Xia. Design of image compression based on FPGA and ADV212[J]. Laser Journal, 2021, 42(5): 57–61.
- [11] 杨耀森, 李博, 孟浩, 等. 基于多核架构的遥测图像压缩存储系统的实现[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(9): 135–139.  
YANG Yaosen, LI Bo, MENG Hao, et al. Implementation of telemetry image compression storage system based on multi-core architecture[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(9): 135–139.
- [12] 丁法珂. 基于 FPGA 的 PCM-FM 遥测中频接收机设计与实现[J]. 电子产品世界, 2015, 6: 54–55.  
DING Fake. Design and implementation of PCM-FM telemetry IF receiver based on FPGA[J]. Electronic Engineering & Product World, 2015, 6: 54–55.
- [13] 杜勇. 数字调制解调技术的 MATLAB 与 FPGA 实现—Xilinx/VHDL 版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [14] 张金荣, 吴玲. GMSK+PN 遥外测体制的性能分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 2018, 54(3): 489–496.  
ZHANG Jinrong, WU Ling. Performance analysis of telemetry and ranging based on GMSK+PN technique[J]. Journal of Nanjing University(Natural Science), 2018, 54(3): 489–496.
- [15] 陈丽婷, 康超, 顾圣明, 等. GMSK 信号的同步及相干解调算法[J]. 无线电工程, 2021, 51(5): 346–351.  
CHEN Liting, KANG Chao, GU Shengming, et al. Synchronization and coherent demodulation algorithm of GMSK signal[J]. Radio Engineering, 2021, 51(5): 346–351.
- [16] 吴长坤, 张为, 郝亚喆. 高吞吐率 JPEG2000 编码器 VLSI 设计[J]. 西安电子科技大学学报, 2022, 49(4): 1–8.  
WU Changkun, ZHANG Wei, HAO Yazhe. Design of a hardware compression encoder with a high throughput[J]. Journal of Xidian University, 2022, 49(4): 1–8.
- [17] 陈超伟, 梁煜, 张为, 等. 应用于 JPEG2000 的高性能 MQ 编码器 VLSI 设计[J]. 西安电子科技大学学报, 2018, 45(3): 74–79.  
CHEN Chaowei, LIANG Yu, ZHANG Wei, et al. VLSI desing of an efficient MQ encoder for JPEG2000[J]. Journal of Xidian University, 2018, 45(3): 74–79.

#### [作者简介]

吴江波 1987 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为数据链及自组网系统设计。

韩 杰 1986 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为数据链及自组网系统设计。

刘建梁 1989 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为数字信号处理。

(本文编辑: 杨秀丽)