

文章编号: 2095-4980(2023)06-0788-06

## 无人机综合一体化测控终端设计

牛 雪

(中国电子科技集团公司 第十研究所, 四川 成都 610036)

**摘 要:** 现有无人机(UAV)测控终端设备综合化程度不高, 互通能力较差, 不能满足未来无人机的模块化、综合化、通用化发展趋势。针对上述问题, 采用“系统高度集成+功能综合可重构”的模式, 提出一种可适用于机载, 也可适用于地面的无人机综合一体化测控终端设计。采用标准模块构建开放式硬件平台, 实现高集成综合处理能力; 设计了动态重构的通信波形加载机制, 完成通用测控链路中通信体制的在线更新及升级; 进行标准化通信协议研究, 提供不同型号测控链路的互联互通基础。实测结果表明, 该设计可在数分钟内完成动态重构并有效支撑不同任务。

**关键词:** 无人机; 测控终端; 综合一体化; 模块化; 可重构

中图分类号: TN925; V556

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022103

## Design of Unmanned Aerial Vehicle integrated tracking telemetry and command terminal

NIU Xue

(The 10th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu Sichuan 610036, China)

**Abstract:** Low integration and poor interoperability of existing unmanned aerial vehicle tracking telemetry and command terminals could not satisfy the development trends of modularization, integration and universality of Unmanned Aerial Vehicle(UAV) in the future. An integrated design which can be applied to both airborne and ground UAV Tracking Telemetry and Command(TT&C) terminals is proposed. It adopts the mode of combing "high-integrated system" with "comprehensive reconfigurable function". Standard modules are utilized to build an open hardware platform, which can achieve high-integrated processing capability. The dynamic reconstructed loading mechanism of communication waveform is designed to complete the online update and upgrade of the communication system in the universal TT&C link. The research of standardized communication protocol provides the interconnection basis for different types of TT&C links. The experimental results show that the design can complete the dynamic reconstruction in a few minutes and effectively support different missions.

**Keywords:** Unmanned Aerial Vehicle; Tracking Telemetry and Command terminal; integration; modularization; reconfigurable

无人机测控链路承担无人机与地面控制站之间信息交换的关键任务, 由机载测控终端和地面测控终端组成。目前, 无人机测控终端的技术发展呈现出多种特点。对于机载测控终端, 设备综合程度较高, 但其功能、性能提升受限于平台载荷能力对尺寸、质量的严格约束; 对于地面测控终端, 在大、中型地面站中, 功能完整但设备形态分离; 在小型、便携式地面站中, 在基于功能简化的前提下进行小型、综合设计。除此之外, 各型测控终端在设计时通常只考虑为某型无人机配套专用软硬件, 不同型号之间无法互通。

随着无人机系统的广泛应用<sup>[1-2]</sup>, 无人机设备将逐步由传统的单功能、独立式向综合化、通用化方向发展<sup>[3]</sup>。为支持多元化、临时性任务对设备即插即用、互联互通的需求, 模块化、综合化、通用化将是无人机测控终端未来发展的重要方向。本文针对当前机载、地面测控终端的发展现状, 设计了一种无人机综合一体化测控终端, 对机载和地面设备都具有良好的可实现性。基于模块化、开放式硬件架构和可重构软件设计, 在不改变硬件的条件下可满足多种体制、不同链路的使用要求, 具有系统高度集成, 功能综合可重构的显著特征。

收稿日期: 2022-05-17; 修回日期: 2022-08-19

## 1 综合一体化平台架构设计

传统的测控终端采用分离式结构设计，没有统一的架构和接口，各部分针对不同的链路要求，采用专用模块完成相关功能；模块间使用非标准总线的点对点连接，不具备综合化、通用化能力且整机尺寸、质量偏大。针对上述问题，设计了图 1 所示的综合一体化平台架构。

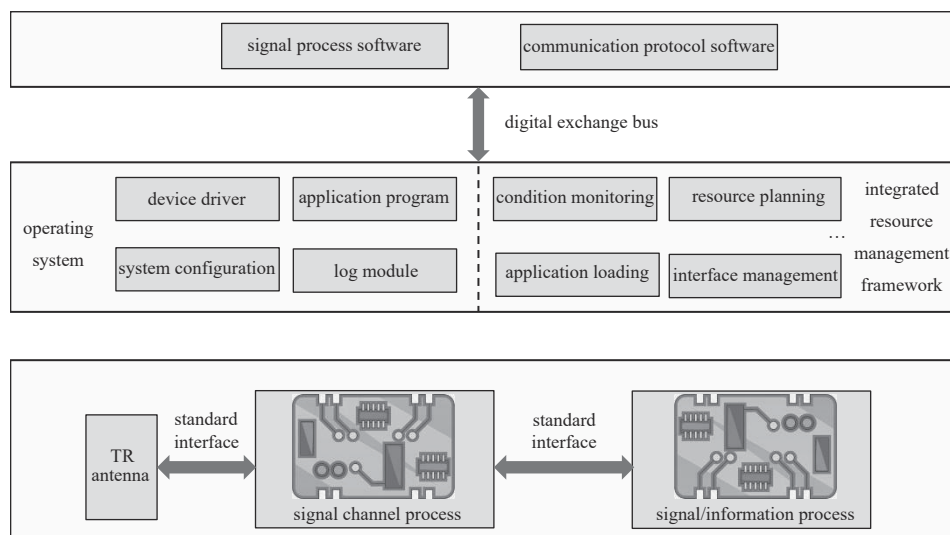


Fig.1 Diagram of integrated platform architecture

图1 综合一体化平台架构框图

综合一体化平台架构分为硬件和软件 2 部分。硬件部分按功能梳理，为具有标准接口的模块，主要分为收发天线、信道处理、信号/信息处理等。收发天线完成射频信号的收发；信道处理主要完成射频信号的放大、滤波、上下变频等；信号/信息处理完成中频信号的调制解调处理、协议组帧及分帧处理等。软件部分采用嵌入式操作系统作为基础平台，实现设备驱动、应用程序(信号处理软件、通信协议软件等)、系统配置、日志模块的调度和管理。信号处理软件完成接收中频信号采集、发射中频信号波形产生，以及编解码、调制解调、数字滤波等功能，并根据控制参数完成调制体制、数据速率的切换；通信协议软件完成信息组帧/解帧和对外接口通信。综合资源管理框架提供检测系统状态并支撑硬件资源和波形可重构能力，主要工作包括设备状态监测、资源规划、应用加载、电源/时钟管理、对外/对内接口管理等。

应用模块化、综合化的设计，按照“开放式硬件平台+软件动态加载”的模式<sup>[4]</sup>构建平台架构，将测控功能软件化、组合化。测控终端的资源按功能分类并采用标准接口，逐步实现信道处理模块、信号/信息处理模块甚至全部处理模块的通用设计。采用这种方式一方面可以减少处理资源的种类，另一方面能为功能重构和扩展奠定基础。对于耦合度较低的时钟、电源等模块，统一设计并利用标准化的互联系统总线进行数据交换。综合一体化平台架构具有良好的综合化、模块化特点，既可兼容现有无人机测控链路的技术体制，也可满足未来新增的需求，提升应用灵活性。该架构采用开放式、模块化硬件，并对软件进行相对独立的设计，可适应机载、地面不同类型测控链路的需要，为综合一体化测控终端实现提供了基础。

## 2 关键技术

### 2.1 高集成综合处理技术

综合一体化测控终端实现的关键技术之一在于硬件资源的模块化和高度集成化。通过高集成综合处理技术，主要从两方面实现：一是采用高集成度功能芯片实现射频/中频信号处理、信息处理综合板卡化；二是各部分之间均采用标准接口互连，方便实现模块的重新配置。具体步骤如下：

- 1) 信道部分功能单元较多且复杂，核心功能可利用高集成度、宽频覆盖的射频收发器完成；
- 2) 信号/信息处理部分涉及的大量工作数据：读写与输入/输出资源，由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)完成；
- 3) 信息处理部分需要运行系统支撑，结合低成本和通用性特点，选用有精简指令集处理器(Advanced RISC

Machines, ARM)<sup>[5-6]</sup>内核的中央处理器(Central Processing Unit, CPU);

- 4) 确定接口时应注意连接线类型与数据交互量相关;
- 5) 不同工作频率可通过更换收发通信天线及前端射频单元完成重组实现。

综上所述, 针对当前无人机测控常用的 L、S、C 频段, 选用 AD9361 收发芯片<sup>[7-8]</sup>和其他外围器件完成信道处理功能; 选用 FPGA 与 ARM 集成的系统级芯片 ZYNQ 实现信号/信息处理功能, 完成射频/中频信号及信息处理综合化。图 2 为相应的系统组成, 对硬件模块进行综合化设计, 在减小整机体积的同时尽可能拓展数据交互带宽。

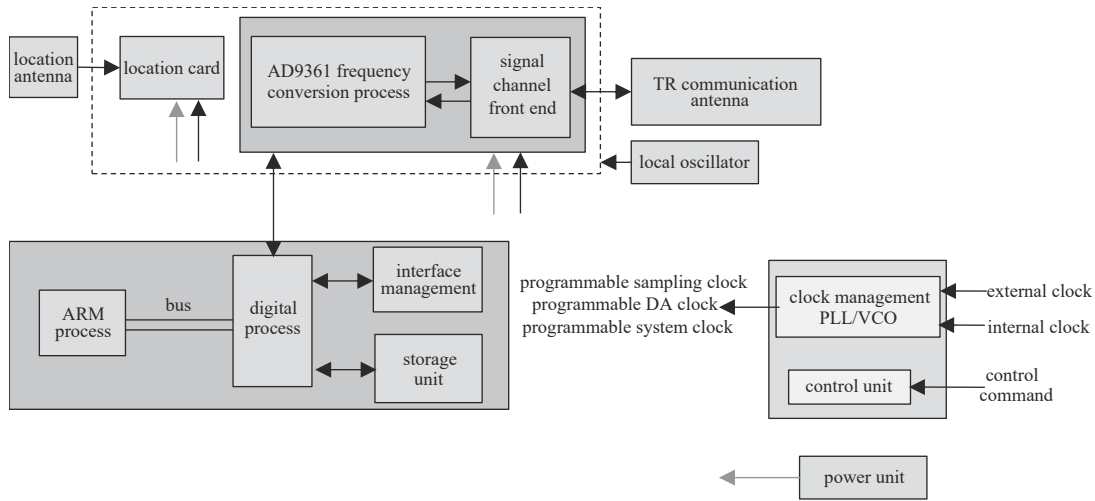


Fig.2 Composition diagram of TT&C terminal  
图2 测控终端组成框图

信道部分由滤波器、功分器、放大器和 AD9361 芯片等组成, 所有射频单元集成设计, 实现宽频谱覆盖的射频收发功能。AD9361 芯片集成度高, 可编程能力强, 且接收部分能独立实现自动增益控制、直流失调校正、正交校正和数字滤波等功能, 主要完成射频信号采样。信号/信息处理部分主要负责调制解调、协议处理、通信数据交互、定位子卡数据交互、IO 接口控制等功能, 其中基带信号调制解调、协议处理及接口管理功能分别由 FPGA 和 ARM 完成。FPGA 中构造出锁相环路、编解码、波形产生及调制、数字滤波等功能模块, 同时在 ARM 控制下完成调制体制、数据速率的切换。利用二者之间的通用接口, 生成不同的管理参数模块并根据需要扩展。定位天线和子卡配合完成定位功能; 时钟管理主要满足对内、外时钟兼容性和多速率工作时钟的实时切换需求; 电源单元完成电源转换及内部供电工作。

### 2.2 通信波形动态加载技术

不同型号无人机测控链路涉及多种通信体制, 如 Reed-Solomon(RS)纠错码、卷积、低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check Code, LDPC)等编码方式, 二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)、正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)等调制方式。采用通信波形动态加载技术, 在同一硬件平台的基础上实现多体制、多速率不同波形的在线更新, 在较低成本下具备功能性能升级扩展的能力。

将不同通信波形封装为独立模块, 通常可使用静态和动态链接 2 种加载方式。执行静态链接时, 模块在文本和数据段的位置均保持不变; 而动态链接则是在运行中把外部模块的可执行代码与系统链接起来。通信波形动态加载技术的关键在于采用动态加载机制, 即在系统运行中动态添加模块进行配置, 保证在实时更新的同时系统仍稳定安全运行, 具体实现过程见图 3。根据不同的通信体制设计相应波形模块文件, 按需加载模块, 整个过程中严格执行循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC), 确保加载可靠性, 并自动生成日志文件用于事后查询记录等。

主要工作流程包含以下步骤: a) 动态加载机制开始初始化, 并在波形加载时启动控制权接管。外部波形模块具备初始化后统一的定义格式, 加载后

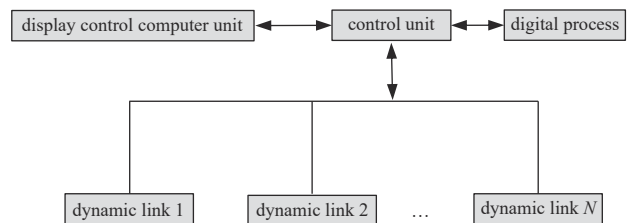


Fig.3 Functional diagram of dynamic-loaded communication waveform  
图3 通信波形动态加载功能框图

即可直接运行；b) 运行新波形模块时，将相关信息和控制权同步提交给动态加载机制；c) 对新波形模块完成符号解析和重定位(在代码修正时修改相关地址域指令)，其中符号解析完成函数/全局变量在自身/其他模块中合适的、唯一的定义确认；d) 在所有修正和重定位完成后，新波形模块分配到内存空间，等待执行；e) 新波形模块加载完成后，新系统形成并运行，控制权转移给系统；f) 波形模块长时间未被使用，或需要腾出新的使用空间时，无用模块被分解或移除。

### 2.3 通信协议标准设计

通信协议标准设计对测控链路的功能分层、协议实现程序及无线传输帧格式进行统一策划，制定灵活、可定义的通信协议标准，适用于不同型号测控链路，提升链路互操作、互联互通性。

以开放式系统互联(Open System Interconnection, OSI)模型为参考，无人机测控链路的功能层可分为物理层、链路层、格式层和应用层<sup>[9]</sup>。物理层提供物理传输接口，完成测控信号参数配置和传输；链路层对不同数据实现高速复接与解复接，负责链路的建立、维护和释放；格式层以标准格式对链路管理/接收数据完成封装、分段、适配处理；应用层作为数据传输的信源/信宿，提供用户界面并完成信息解析。相关信息交互流程见图4。发送端在不同层依次加上协议头部，用作信息表示、差错控制等；接收端按顺序依次去掉协议头部，将剩下的净负荷通过层间接口提交给上层协议处理。

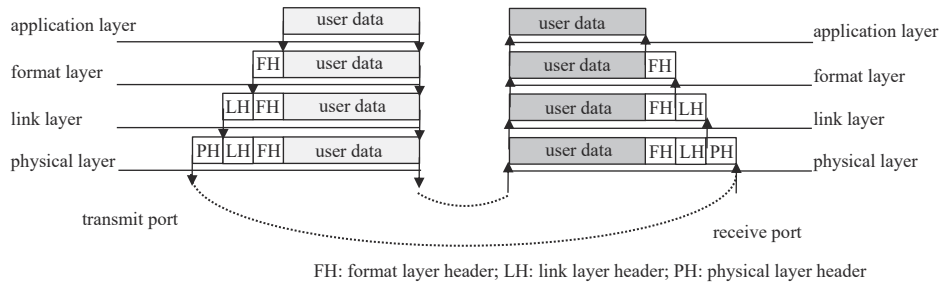


Fig.4 Information transmission flow of functional layers  
图4 功能层间信息传输流程

根据上述流程，通信协议实现程序可分为：应用层程序、格式层程序、链路层程序、物理层程序和链路管理模块程序，以及各相邻层间的接口程序(见图5)。各程序实现时既相互独立又彼此相关，功能函数均在本层封装实现，具有互联互通的结构特点。此外，针对相关标准定义的无线传输帧格式在表述多种、较长的用户数据存在的局限性时<sup>[10]</sup>，可按表1中的无线传输帧格式以动态复接的方式灵活定义。

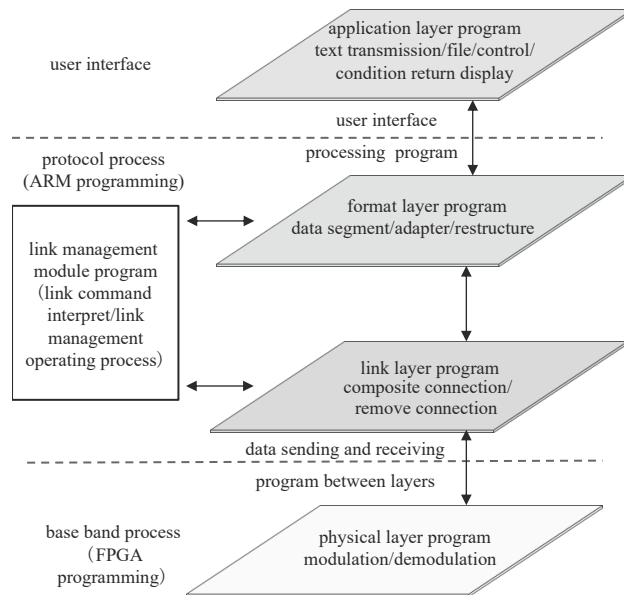


Fig.5 Protocol realization procedure and wireless transmission frame format  
图5 协议实现程序

表1 无线传输帧格式  
Table1 Format of wireless transmission frame

| property                             | content                         | instruction  |
|--------------------------------------|---------------------------------|--|
| frame beginning information          | frame header                    | frame synchronization character                              |
|                                      | sign parameter                  | frame sign/encrypt sign/version number                       |
|                                      | address parameter               | unified coding,only definition                               |
|                                      | composite connection form       | connection sign of packets                                   |
|                                      | password management information | /  |
|                                      | spare part                      | /  |
|                                      | cyclic counting                 | packet loss statistics                                       |
| data region (including verification) | header verification             | except frame header  |
|                                      | data region 1                   | packaging different type of data (link management/user data) |
|                                      | data region <i>n</i>            |  |

3 技术验证

综合一体化测控终端设备可基于一体化结构内嵌于控制站内部，设备外形尺寸可控制在 140 mm×100 mm×40 mm 以内，质量≤1 kg。按照图 6 搭建了无线试验环境，对无线测控链路收发性能进行考察。

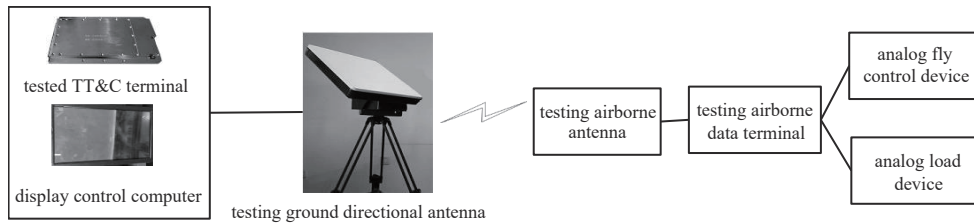


Fig.6 Experimental block diagram  
图6 实验框图

针对不同使用需求涉及的通信波形(以 BPSK 调制/RS+卷积编码、BPSK 调制/LDPC 编码为例)，对通信波形、帧格式信息、参数信息完成动态配置并测试，相关界面见图 7。

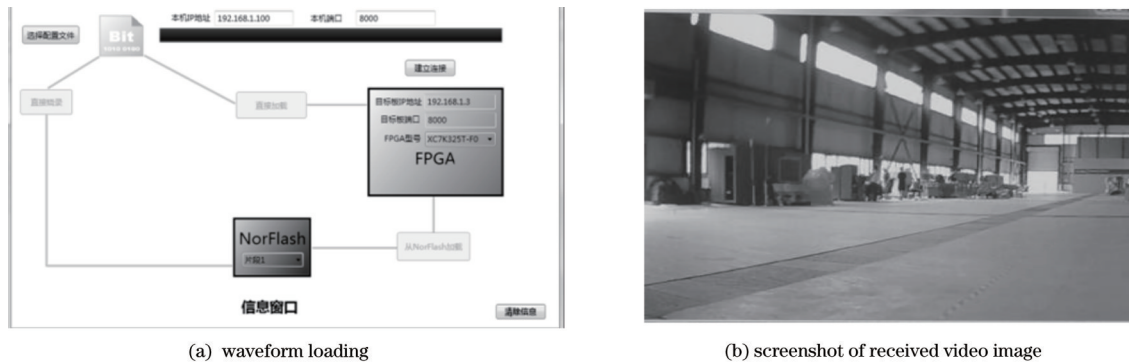


Fig.7 Dynamic configuration/screenshot of received video image  
图7 动态配置/接收视频图像截图

测试中更改了 2 种通信波形，并对上行遥控误/漏指令率、下行遥测误码率、图像传输功能、定向跟踪性能进行了测试。对通信波形、无线传输帧的相关参数动态配置可在 2 min 内在线完成，表 2 给出了典型测试结果值。通过 50 次上行遥控指令发送接收比对，2 种通信波形均无误/漏指令。在 3 Mbps 信息速率下，下行遥测信息误码率低于  $1 \times 10^{-5}$ ，且视频图像接收均未发生卡顿现象(见图 7)。对动态目标进行定向跟踪，也能实时正常跟踪。

表2 典型测试指标值  
Table2 Typical test index values

| test item                                  | test result                               |                               |
|--|---|-------------------------------|
|  | BPSK modulation/RS+convolutional encoding | BPSK modulation/LDPC encoding |
| error/missed rate of uplink remote command | 0   | 0                             |
| bit error rate of downlink telemetry       | $1.5 \times 10^{-6}$                      | $1.4 \times 10^{-6}$          |
| image transmission function                | clear and smooth image                    | clear and smooth image        |
| directional tracking performance           | normal tracking                           | normal tracking               |

由此可知,该终端可在不更改硬件的情况下快速实现功能重构,即使是新性能的升级也可在短时间内高效配置,满足多样的通信需求且具有很好的工程实用性。

#### 4 结论

本文介绍了一种设备综合化、功能软件化的无人机综合一体化测控终端设计技术,解决了现有无人机测控终端功能单一、设备繁多的问题。在通用的综合一体化平台架构下,通过AD9361收发芯片、ZYNQ芯片以及外围器件的高效组合实现了设备小型化、模块化。此外,基带信号的链路参数、无线传输帧格式与参数内容动态可配,为机、地多体制多类型测控终端的通用奠定了使用基础,也可方便快捷地实现功能性能升级扩展。对样机进行实测,验证了该技术实现小型化、高性能、通用化测控终端的有效性,满足不同无人机链路的信息传输需求。下一步将针对机载、地面测控终端的通用设计甚至机、地自由部署进行研究,最终实现简单、可靠的即插即用。

#### 参考文献:

- [1] 陈长泳,温卓漫,陈鸣. 美军无人机通信数据链浅析[J]. 电子信息对抗技术, 2021,36(3):23-28. (CHEN Changyong, WEN Zhuoman, CHEN Ming. An analysis of US military UAS communication data link[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2021,36(3):23-28.) doi:10.3969/j.issn.1674-2230.2021.03.005.
- [2] 张笋,朱昱,代李菟,等. 军用无人机技术发展历程、现状及未来应用研究[J]. 舰船电子工程, 2021,41(6):9-13. (ZHANG Sun, ZHU Yu, DAI Litu, et al. Research on development, current situation and future application of military UAV technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2021,41(6):9-13.) doi:10.3969/j.issn.1672-9730.2021.06.003.
- [3] 刘海宁. 网络化作战机载射频传感器综合[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(4):594-598. (LIU Haining. Airborne integrated radio frequency sensor of network centric warfare[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(4):594-598.) doi:10.11805/TKYDA201904.0594.
- [4] 杨红生,黄华园. 通用无人机测控系统与关键技术[J]. 电讯技术, 2018,58(4):391-396. (YANG Hongsheng, HUANG Huayuan. A general UAV TT&C system and its key technology[J]. Telecommunication Engineering, 2018,58(4):391-396.) doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2018.04.005.
- [5] 李江华,杨国斌,张援农,等. 基于FPGA+ARM的电离层斜向探测系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(4):678-683. (LI Jianghua, YANG Guobin, ZHANG Yuannong, et al. Design of ionospheric oblique detection system based on FPGA+ARM[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(4):678-683.) doi:10.11805/TKYDA2021024.
- [6] 卢锋锐. 轻量化无人机数据链设备中FPGA子系统的设计与实现[D]. 北京:北京邮电大学, 2020. (LU Fengrui. Design and implementation of FPGA subsystem in lightweight UAV data link terminal[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.) doi:10.26969/d.cnki.gbydu.2020.001442.
- [7] 刘法. 基于射频直采架构的微小型数字信道化接收机仿真[J]. 舰船电子对抗, 2019,42(3):84-90. (LIU Fa. Simulation of micro-digital channelized receiver based on RF direct sampling framework[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2019,42(3):84-90.) doi:10.16426/j.cnki.jcdzdk.2019.03.019.
- [8] 杨勇,夏文龙,史晓获,等. 基于AD9361的智能屏蔽系统设计与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4):625-629. (YANG Yong, XIA Wenlong, SHI Xiaodi, et al. Design and implementation of intelligent shielding system based on AD9361[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):625-629.) doi:10.11805/TKYDA201804.0625.
- [9] 韩婷婷. 基于IP的异构多数据链互联技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2020. (HAN Tingting. Research on heterogeneous multiple data link interconnection technology based on IP[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.) doi:10.26944/d.cnki.gbfju.2020.001802.
- [10] 黄华园. 一种功能分层的无人机测控链路互联互通设计方法[J]. 电讯技术, 2018,58(12):1376-1382. (HUANG Huayuan. An interconnection method for UAV TT&C data link based on function layered structure[J]. Telecommunication Engineering, 2018, 58(12):1376-1382.) doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2018.12.003.

#### 作者简介:

牛 雪(1988-),女,博士,工程师,主要研究方向为航天测控通信.email:niuxue5@163.com.