

文章编号: 2095-4980(2016)05-0706-06

一种多机协同无人机测控系统

刘 蓉¹, 肖颖峰²

(1.南京航空航天大学 无人机研究院 中小型无人机先进技术工信部重点实验室, 江苏 南京 210016;

2.南京熊猫汉达科技有限公司, 江苏 南京 210012)

摘 要: 设计了一种低成本多机协同无人机(UAV)测控系统。该系统采用时分双工(TDD)通信协议, 零成本解决了数据电台间通信半双工转全双工的难题, 实现了基于数据电台的单载波全双工测控方式在无人机上的应用, 适应了测控系统小型化低成本的发展趋势; 采用心跳同步式时分多址通信方法, 有效降低了同步误差, 解决了多架无人机同频段遥测数据堵塞问题, 为多机协同作战无人机的同屏多任务操控创造了有利条件。

关键词: 多机协同; 时分双工; 测控系统; 时分多址; 突发同步

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201605.0706

A multi-aircraft cooperative UAV observe and control system

LIU Rong, XIAO Yingfeng

(1.Middle and Small Size UAV Advanced Technique Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology, Unmanned aerial vehicle research institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China;

2.Nanjing Panda Electronic Co. Ltd., Nanjing Jiangsu 210012, China)

Abstract: The new low-cost observe and control system of multi-aircraft cooperative Unmanned Aerial Vehicle(UAV) is designed. The Time Division Duplex(TDD) protocol is adopted to resolve the problem that half-duplex communication is transformed to full-duplex communication between data radios at zero cost, then it can realize the application of single carrier full-duplex control mode based on data radio. This system adapts to the development trend of miniaturization and low-cost for observe and control system. The communication mode of time-division multiple address based on heartbeat is designed to reduce the synchronization error. It can resolve the problem that telemetry data is blocked up in the same frequency channel for many flights, and create favorable conditions for multi task control on the same screen for multi-aircraft cooperative UAV.

Key words: multi-aircraft cooperative; Time Division Duplex; observe and control system; time-division multiple address; burst synchronization

随着现代战争战术要求和方法的不断提升, 利用多架无人机(UAV)集群布阵, 共同完成复杂任务已成为一种新的发展趋势。多机协同作战科研和训练时, 必须同时监测和控制多架 UAV 的空中飞行状态, 仅靠光测和雷测数据无法满足要求, 这给试飞数据采集、安全保障、故障检测定位、战技指标考核、成本控制和训练使用带来较大困难^[1], 因而多机协同 UAV 测控系统应运而生。

对于多机协同自主作战 UAV 而言, 为科研阶段和部队训练配备的测控系统, 除应具备测控系统的常规功能外, 在满足系统需求的情况下, 还应尽量控制硬件成本, 部件尽量集成, 控制设备的体积和重量, 实现系统的小型化和低成本化。目前, 国内 UAV 的遥控/遥测设备主要选用专业厂所的专用测控系统, 如, 某典型的高原型 UAV 测控系统采用频分双工通信方式, 实现了全双工通信; 采用频分多址通信体制, 实现了一站六机协同测控通信, 测控距离为 150 km, 误码率小于 10^{-5} bit/s, 但硬件成本高达 600 多万元, 重量超过 30 kg, 体积也较大, 不适应多机协同作战 UAV 对测控系统低成本、小型化的需求^[2-3]。普通低成本测控系统一般选用数据电台为硬件平台, 而数据电台只支持半双工工作, 不适应高速全双工通信的需求; 也有一些船舶/电网系统中的测控设备同

收稿日期: 2015-06-15; 修回日期: 2015-07-24

基金项目: 总装预先研究基金资助项目(51325010601)

时装载 2 台数据电台, 可实现全双工通信, 但硬件成本和体积重量增加^[4-5]。

本文设计的多机协同 UAV 测控系统, 选用数据电台为硬件平台, 采用基于时分双工(TDD)通信协议的时分多址通信方法, 零成本地解决了数据电台间通信半双工转全双工的难题。

1 TDD 通信协议设计

本文多机协同 UAV 测控系统采用 TDD 通信协议。TDD 通信协议数据以高速突发帧的形式传递, 采用特殊的握手协议建立 2 个通信设备的突发同步, 即当 2 个设备进行通信时, 一方为主叫方, 另一方为被叫方, TDD 协议能够保证主叫方发送数据时, 被叫方必定在接收数据。TDD 协议通过交替地将通信设备配置成接收态或发送态来完成全双工通信^[6-8]。

1.1 TDD 通信协议的帧结构

多机协同 UAV 测控系统 TDD 通信协议中用到了捕获突发帧、空闲突发帧和数据帧 3 种帧结构。捕获突发帧和空闲突发帧为 3 个字节的高速短帧, 数据帧则可根据用户数据长度自行调节, 包括预码、同步码、状态码、命令码、数据信息以及终止码, 具体结构如图 1 所示。

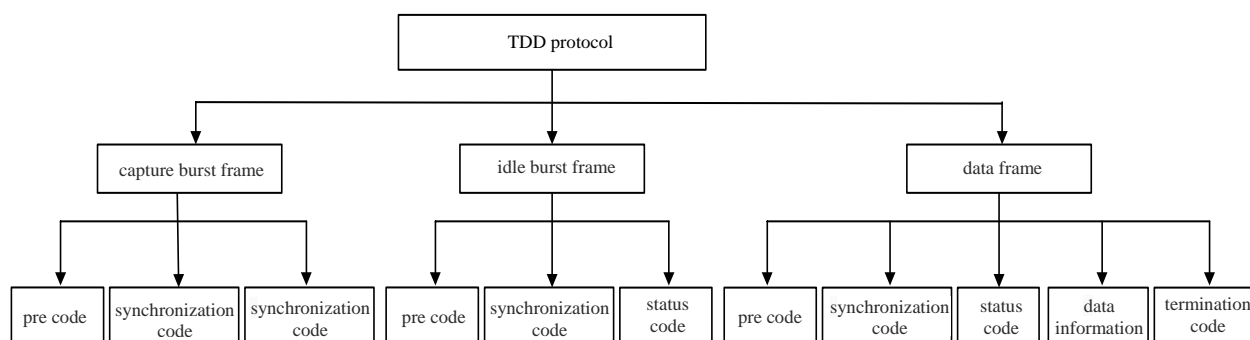


Fig.1 Data frame structure of the TDD communication protocol

图 1 TDD 通信协议数据帧结构

多机协同 UAV 测控系统 TDD 通信协议通信帧包含的信息如下:

- 1) 预码: 1 个字节, 其值为 0xAAH, 用于位同步;
- 2) 同步码: 1 个字节, 为一特定的码组, 用于块同步, 也标志着一帧数据的开始;
- 3) 状态码: 1 个字节, 用于标识数据传输方向, 高 4 位标识数据发送者(源地址), 低 4 位标识数据接收者(目的地址), 地面控制站地址码为 0, UAV 地址码为 $m(m \neq 0)$;
- 4) 命令码: 1 个字节, 用于指示通信终端(地面控制站/机载测控终端)所发生的行为、过程或状态。若源地址为 0, 即地面控制站为数据发送者(遥控状态), 则命令码为各个遥控/遥调指令对应的指令编码; 若源地址为 $m(m \neq 0)$, 即编号为 m 的 UAV 的机载测控终端为数据发送者(遥测状态), 则命令码为遥测数据中的副帧内容编号;
- 5) 数据信息: 遥控状态 5 字节, 其中前 4 字节为遥调指令对应的遥调数据; 遥测状态 27 个字节, 其中前 26 字节为遥测数据, 最后 1 字节为数据校验和(命令码至数据信息校验和之前字节按字节求和值);
- 6) 终止码: 2 个字节, 其值为 0x0A0D, 用于对之前数据进行保护, 标志着数据信息的结束。

1.2 TDD 通信协议的帧同步

多机协同 UAV 测控系统采用 TDD 通信方式, 地面控制站与机载测控终端从时间上交替进行信息的接收与发送, 因此通信双方必须在时间上进行同步, 以保证通信的可靠性。

多机协同 UAV 测控系统帧结构中的预码和同步码各 1 个字节, 由 2 个 8 位的同步块构成。接收方使用 2 个 8 位的移位寄存器来分别存储当前接收到的字节和前一个接收到的字节, 每接收到一个新的位便进行循环移位, 然后将当前接收到的字节与预码作比较, 若与预码相匹配, 则说明位同步已完成。然后继续接收下一字节, 若下一接收字节与同步码相匹配, 则说明块同步已完成, 帧同步已经建立。接收方使用一个计数器记录下帧同步建立所进行移位操作的位数, 在下一帧到来时, 直接进行所需的移位便可直接读取后续数据信息。若下一接收字节与同步码不匹配, 则等待 2 个字节的时间, 若这段时间内还未接收到同步码, 则说明是伪同步, 必须重新开始进行帧同步建立。

1.3 TDD 通信协议的实现

多机协同 UAV 测控系统的 TDD 协议包括突发同步的建立、突发同步的保护和数据的传输,通过数据电台微控制单元处理器控制加以实现。

1.3.1 突发同步建立

初始化时,地面控制站与机载测控终端都处于接收态,守候在一个固定的载波信道上。当一方有发送请求时,称其为主叫方,另一方称为被叫方。主叫方先转为发送态,开始向被叫方发送一个捕获突发帧。当被叫方检测到主叫方发来的捕获突发帧后,转为发送态向主叫方发送一个认证捕获突发帧。当主叫方检测到被叫方发来的认证捕获突发帧后,转为发送态向被叫方发送一个空闲突发帧。当被叫方检测到主叫方发来的空闲突发帧后,转为发送态向主叫方发送一个认证空闲突发帧。主叫方收到被叫方的认证空闲突发帧后,认为通信双方已经完成突发同步,通信链路已经建立。在后续的突发通信中,主叫方通过数据帧向被叫方发送数据,被叫方接收数据帧内容,直到收到数据帧的终止码,认为通信结束,过程如图 2 所示。

1.3.2 突发同步保护

TDD 通信中必须考虑突发同步的保护,一旦地面控制站与机载测控终端突发同步工作不正常时,能够及时重新建立同步,以免丢失数据。突发同步保护方案:地面控制站与机载测控终端只要有一方没有检测到正确的空闲突发帧或认证空闲突发帧,都将重新开始一个新的突发同步建立过程。利用 TDD 帧结构中的命令码实现状态转移过程。如果被叫方检测到的空闲突发帧错误,将在下一发送时段通过发送相应命令告知主叫方,并进入失步状态,主叫方读出相应命令之后,判断出被叫方的错误状态后进入失步状态,并在下一发送时段发出认证空闲突发帧,重新建立同步。如果主叫方接收的认证空闲突发帧出错,它也通过相应命令告知被叫方,并首先进入失步状态,被叫方接收到主叫方发出的错误信息后,进入失步态,双方恢复到初始的非同步状态。

1.3.3 数据电台微处理器软件实现

驱动数据电台的微处理器控制模块软件,主要完成数据接收、发送控制等工作。驱动数据电台的微处理器控制模块通过 Borland C 6.0 编译软件实现。软件通过中断触发机制对系统进行高度实时控制。

在接收控制过程中,首先设置数据电台中的射频芯片为接收模式,然后初始化射频芯片数据区,依据捕获突发帧的发送方与认证捕获突发帧的发送方确定本次通信的被叫方,触发接收中断,再开始同步,若同步成功,则开始接收数据,并将数据保存于串口缓冲区中,待一帧完整的数据全部接收完毕,关闭射频芯片的接收模式并将其设置为发送模式。接收控制软件流程如图 3 所示。

在发送控制过程中,首先设置数据电台中的射频芯片为发送模式,然后初始化射频芯片的数据区,依据捕获突发帧的发送方与认证捕获突发帧的发送方确定本次通信的主叫方,触发发送中断,再将串口缓冲区中的数据通过射频芯片发送,待一帧完整的数据全部发送完毕,最后关闭射频芯片的发送模式,并将其设置为接收模式。发

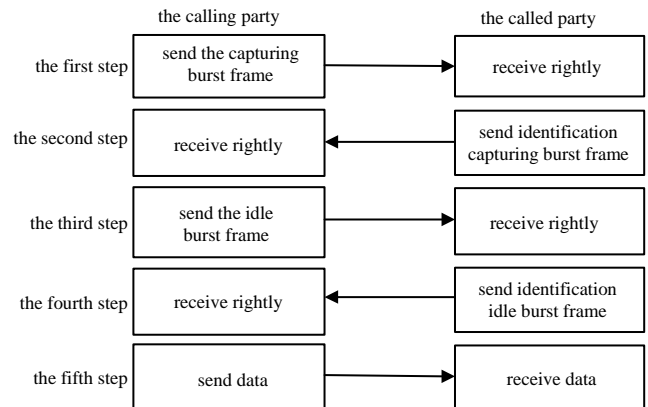


Fig.2 Implementation process of TDD communication protocol

图 2 TDD 通信协议实现过程示意图

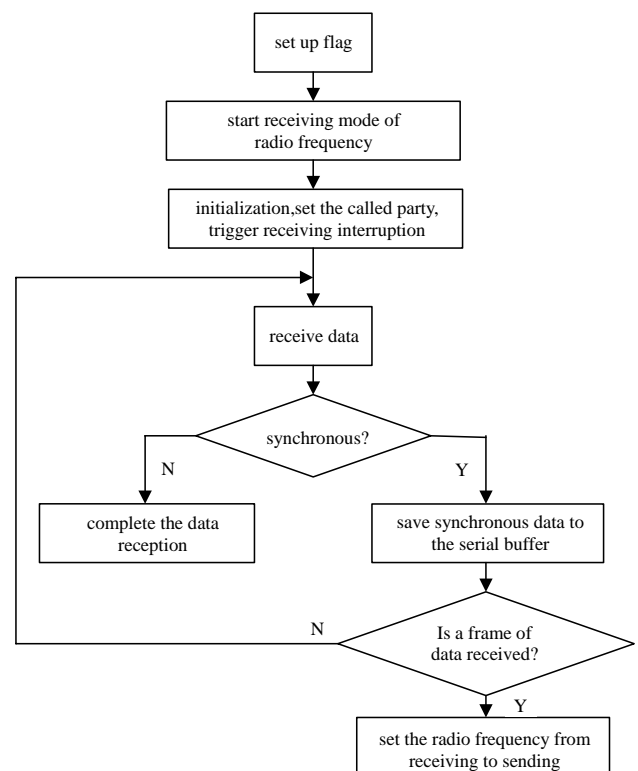


Fig.3 Flow of receiving control

图 3 接收控制软件流程图

送控制软件流程如图4所示。

2 基于时分多址体制的测控模式设计

为适应多机协同作战 UAV 的使用要求,测控系统必须具备一站多机测控模式。目前, UAV 测控系统实现一站多机测控模式的网络通信技术体制主要有相控阵天线体制、码分多址体制、频分多址体制和时分多址体制^[9]。相控阵天线体制、码分多址体制和频分多址体制对测控设备都有特殊要求,硬件成本也较高,采用低成本的数据电台难以实现^[10-11]。

本文采用固定时隙时分多址体制。在此体制下把不同时隙预先分配给系统中的地面控制站和 UAV 群,每个 UAV 和地面控制站拥有一个或多个工作时隙,它们分别在分配到的工作时隙中发射自己的信息,完成系统测控通信任务。固定时隙时分多址体制的优点是可以通过数据电台来实现测控模式,硬件成本较低,但缺点是地面控制站与 UAV 群之间存在同步误差,当同步误差大于保护时隙时,地面控制站可能会同时收到多架 UAV 的遥测信息电波,在载波频率相同的情况下,地面控制站无法分离各 UAV 的遥测信息,从而引起遥测数据堵塞。因此,如何减小同步误差成为固定时隙时分多址体制设计的关键。

本文设计的测控系统网络通信技术体制中,时间被分割成固定间隔的周期,每一个周期又分为下行周期和上行周期。下行周期被分割成2个时隙,地面控制站在第1个时隙内向 UAV 群发送遥控信息,第2个时隙为保护时隙;上行周期被分割成 N 个时隙($N=2n$, n 为 UAV 架数, $n>1$),第1架 UAV 在第1个时隙发送遥测信息,第2个时隙为保护时隙,第2架 UAV 在第3个时隙发送遥测信息,第4个时隙为保护时隙,……,第 n 架 UAV 在第 $N-1$ 个时隙发送遥测信息,第 N 个时隙为保护时隙。时分多址体制时间周期结构如图5所示。

同步误差主要由时钟误差和无线传输时间误差组成。由地面控制站经纬度和 UAV 实时经纬度,可以计算出无线传输距离,再除以无线电传输速率得到无线传输时间误差,可以此为依据进行同步误差修正。

地面控制站和 UAV 群计时时钟的个体差异,会造成时钟误差随着时间的增加而积累,带来较大的同步误差。本项目采用地面控制站定期发送心跳同步指令的方式,使各 UAV 的时钟与地面控制站保持同步。具体方法如下:地面控制站每隔1 min,通过遥控下行时隙,采用广播协议发送3个字节的心跳同步指令,系统内各 UAV 接收到心跳同步指令后,先进行无线传输时间误差修正,再将计时时钟调整至与地面控制站时钟同步。

3 多机协同 UAV 测控系统设计

本文设计的多机协同 UAV 测控系统由地面和机载2部分设备组成。地面设备装载于遥控/遥测车中,包括数据电台及天线、遥控指令键盘和工业控制计算机。机载设备装载于飞机上,包括数据电台及天线、数据采集记录管理计算机。多机协同 UAV 测控系统组成如图6所示。

地面遥控/遥测车经自行设计改装成标准化方舱,方舱内部安装1个通信机柜和2个测控机柜,设置1个通信指挥席位和2个飞行操作席位。通信机柜中安装有2台 MDS 2710A/C 型数据电台(互为备用)和1个串口信号分配器。测控机柜中安装1台工业控制计算机和1套遥控指令键盘。1台 MDS 2710A/C 型机载数据电台及数据

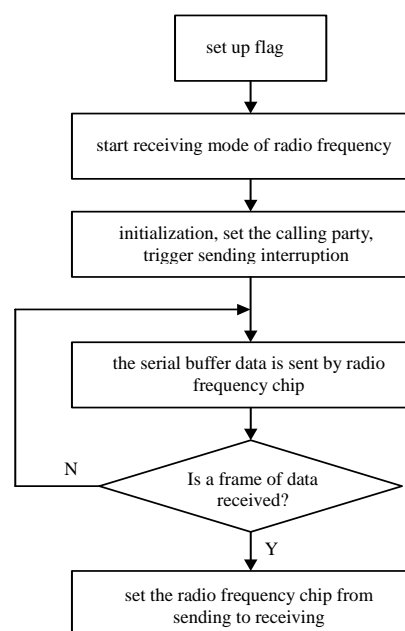


Fig.4 Flow of sending control
图4 发送控制软件流程图

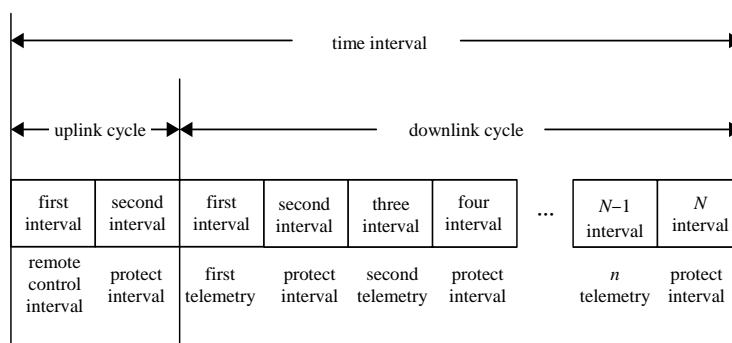


Fig.5 Time cycle of TDMA
图5 时分多址体制时间周期结构图

采集记录管理计算机安装于 UAV 机头整流罩内, 天线则埋入式安装于 UAV 垂直翼翼中, 尽可能减小对 UAV 原有机载设备装载状态的影响。

工业控制计算机通过离散量板上 Din 输入与遥控指令键盘连接, 实时采样离散输入, 并生成相应遥控指令, 发送至串口信号分配器, 再转发至数据电台将其发送出去。机载数据电台接收到遥控指令后将其发送至数据采集记录管理计算机, 二次编码后转发至飞行控制计算机。

4 可靠性分析

TDD 协议通过交替地将通信设备配置成接收态或发送态来完成全双工通信。对于用户而言, 他们只关心在满足系统要求的传输速率下, 数据是否能够完成双向收发, 所以只要数据电台的传输速率大于 2 个通信设备所需的传输速率之和, 则可以认为数据电台是全双工工作的。选取某型号 UAV 的测控数据编码, 进行全双工通信的可靠性分析和数据刷新率计算分析。

4.1 全双工通信可靠性分析

遥测数据长度为 32 个字节, 刷新率为 20 Hz, 即其所需的传输速率为 6 400 bps; 遥控指令长度 10 个字节, 刷新率为 5 Hz, 即其所需的传输速率为 500 bps; 选用的数据电台传输速率为 9 600 bps(>(6 400+500) bps), 所以多机协同 UAV 测控系统能够实现系统要求传输速率下的全双工测控通信。

4.2 数据刷新率计算分析

遥控数据理论的传输时间为 10.4 ms, 实际设置遥控下行时隙为 10 ms, 保护时隙为 10 ms; 遥测数据理论的传输时间为 33.3 ms, 实际设置遥测上行时隙为 35 ms, 保护时隙为 10 ms; 时分多址体制下行周期为 20 ms, 上行周期为 $45n$ ms, 总的时间周期为 $(45n+20)$ ms; 最多要求实现一站四机测控, 即 $n=4$, 上行周期为 180 ms, 总的时间周期为 200 ms, 对于单架 UAV 而言, 每 200 ms 向地面控制站更新一组遥测数据, 更新率 5 Hz。 n 越大, 单机的遥测更新率越低。

5 设计效果与试验验证

本文设计的多机协同 UAV 测控系统, 在满足 UAV 测控功能、性能及可靠性的前提下, 体积为 170 mm×140 mm×50 mm, 仅为一般专业厂所专业测控设备体积的 1/6; 重量不大于 3.5 kg, 仅为一般专业厂所专业测控设备重量的 1/8; 地面控制站成本为 30 万, 机载设备成本为 2 万, 仅为一般专业厂所专业测控设备成本的 1/20。

该系统在地面进行了 20 km 的跑车拉距试验, 通过空中试飞, 验证测控距离不小于 50 km, 工作稳定可靠, 数据准确实时, 界面友好, 使用方便, 误码率不大于 10^{-5} bit/s。一站单机测控刷新率为 20 Hz, 一站四机测控刷新率为 5 Hz。该测控系统应用于 X 型 UAV 系统, 经过全系统联试、科研摸底试飞、科研试飞、定型试飞以及生产批出校检验试飞, 成功保障了共计 24 架次 UAV 的飞行试验。

6 结论

本文设计的多机协同 UAV 测控系统, 采用 TDD 通信协议, 零成本地解决了数据电台间通信半双工转全双工的难题, 实现了基于数据电台的单载波全双工测控方式在 UAV 上的应用, 大大降低了系统的研制成本, 适应了测控系统小型化的发展趋势; 采用心跳同步时分多址通信方法, 有效降低了同步误差, 低成本地实现了 UAV 的一站多机测控模式, 为多机协同作战 UAV 的同屏多任务操控创造了有利条件。

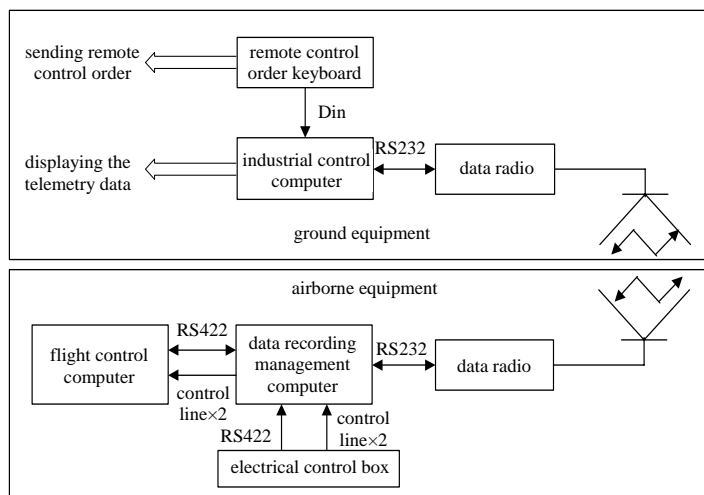


Fig.6 Component of the observe and control system of multiple cooperative UAV
图 6 多机协同无人机测控系统组成图

该系统可推广应用于其他类型多机协同自主作战 UAV 的科研阶段和部队训练,有效降低了人力资源成本和研制成本,并提高了试飞安全保障,具有显著的经济和军事效益,适应现代战争的需求。

参考文献:

- [1] 梁星魂. TDD 通讯系统的关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2012. (LIANG Xinghun. Research on key techniques in TDD communication system[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology, 2012.)
- [2] 李晓娟,戴谊. 一种卫星地面站伺服跟踪测控软件的实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(2):244-247. (LI Xiaojuan, DAI Yi. Design of servo control software based on satellite ground station[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(2):244-247.)
- [3] 张文强,张多英. 基于时分多址网络中的双信道预约 MAC 协议[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2013,31(3):145-149. (ZHANG Wenqiang, ZHANG Duoying. Based on TDMA network in the new reservation MAC protocols[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2013,31(3):145-149.)
- [4] 周捷. 基于 TDD 的数字无线语音传输系统的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2005. (ZHOU Jie. The research of digital wireless voice transmission system based on TDD[D]. Chengdu, China: Southwest Jiao Tong University, 2005.)
- [5] 李长春,陈向东,陈永翮. 数字对讲机 TDD 通讯协议的设计与实现[J]. 微计算机信息, 2006,22(11-3):132-134. (LI Changchun, CHEN Xiangdong, CHEN Yongxuan. Design and implementation of digital wakie talkie communication protocol TDD[J]. Micro Computer Information, 2006,22(11-3):132-134.)
- [6] LEE J, MO J, TRUNG T M, et al. Design and analysis of a cooperative multichannel MAC protocol for heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010,59(7):3536-3548.
- [7] Texas Instruments. TMS320DM643x DMP Ethernet Media Access Control(EMAC)/Management Data Input/Output(MDIO) module user's guide[Z]. 2010.
- [8] Texas Instruments. TMS320DM643x DMP asynchronous External Memory Interface(EMIF) user's guide[Z]. 2010.
- [9] 夏白桦,李洪业,陶晓宇. 时分多址数据链时隙分配方法及仿真分析[J]. 电力与指挥控制, 2011,36(4):97-100. (XIA Baihua, LI Hongye, TAO Xiaoyu. Analysis of TDMA data link slot allocation method and simulation[J]. Power and Command Control, 2011,36(4):97-100.)
- [10] 刘韬,陈毅红,谭颖,等. 基于无线传感网络的分布式时分多址调度策略[J]. 计算机应用, 2014,34(1):8-12. (LIU Tao, CHEN Yihong, TAN Ying, et al. Based on wireless sensor network time division multiple address scheduling policy[J]. Computer Application, 2014,34(1):8-12.)
- [11] 李明远,朱莹,李建东,等. 时分双工环境下的分组预约多址(PRMA/TDD)协议及其性能[J]. 通信学报, 1999,20(1):81-86. (LI Mingyuan, ZHU Ying, LI Jiandong, et al. Under time division duplex PRMA/TDD protocol and its performance[J]. Journal of China Institute of Communications, 1999,20(1):81-86.)

作者简介:



刘 蓉(1981-), 女, 江苏省连云港市人, 副研究员, 主要研究方向为无人机测控系统设计. email:liurong@nuaa.edu.cn.

肖颖峰(1976-), 男, 安徽省安庆市人, 高级工程师, 主要研究方向为飞机数据电台电路设计.