

# 一站多机式无人机测控系统

杨柳庆, 肖前贵

(南京航空航天大学无人机研究院, 南京 210016)

**摘要:** 本着多功能、低成本和小型化的原则,以数据电台为硬件平台,基于时分双工通讯方式(TDD)和时分多址通讯体制(TDMA),设计了适用于自主作战、多机协同作战无人机的简易型一站多机式无人机测控系统。该测控系统还以CF卡为存储介质,集成了遥测数据记录与回放功能,实现了通讯链路中断后的半实时和非实时测控功能。

**关键词:** 无人机; 测控系统; 一站多机; 时分双工; 时分多址

**中图分类号:** V556 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)03-0006-04

## A UAV TT&C System for One Station Controlling Several Vehicles

YANG Liuqing, XIAO Qianguai

(Academy of UAV, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Based on principle of multi-functional, miniaturization and low cost, we designed a kind of UAV TT&C system adaptive for autonomous operation and multi-aircraft cooperative combat. The system is based on Time Division Duplex (TDD) and Time Division Multiple Access (TDMA), and selects the data radio as the hardware platform. Moreover, the system uses the CF card as the storage medium and integrates telemetry data recording and playback functions. It can realize semi-real-time and non-real-time measurement and control function when communication link breaks.

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicle (UAV); TT&C system; one station controlling several vehicles; time division duplex; time division multiple access

## 0 引言

随着新兴航空控制、通讯、信息处理、传感器、导航等若干技术的不断发展与集成,以自主作战、多机协同作战为特点的无人机作战模式已经成为一种新的发展趋势<sup>[1-2]</sup>。自主作战无人机在正式作战时不依赖测控系统,根据预先规划航路自主完成任务,但日常训练时需配备简易型测控系统。多机协同作战无人机由多架无人机集群布阵共同完成复杂任务,执行任务时需同时监测和控制多架无人机,因而需要研制低成本、小型化的简易型一站多机式无人机测控系统。

## 1 总体设计

### 1.1 技术体制

目前,无人机测控系统实现一站多机测控模式的

通讯技术体制主要有以下几种<sup>[3-5]</sup>。

1) 相控阵天线体制(Phased Array Antennas)。地面控制站采用相控阵天线,通过天线波束的电扫描,对准各个无人机,实现对无人机群的测控与通信。

2) 码分多址体制(CDMA)。地面控制站与无人机群共用一个通讯频道,通过分配不同的扩频地址码来区分设备信息,实现对无人机群的测控与通信。

3) 频分多址体制(FDMA)。不同的无人机使用不同的通讯频道进行工作,地面控制站使用多个通讯频道同时工作,与无人机群同时建立测控通信链路。

4) 时分多址体制(TDMA)。将测控通信周期划分为长短不一的时间间隙(简称时隙),地面控制站和无人机群在分配到的工作时段内发射各自信息。

相控阵天线体制、码分多址体制和频分多址体制都需要专用测控设备支持,设备成本较高、体积重量较大;时分多址体制可较低成本地实现一站多机测控模式。

低成本测控系统一般选用数据电台为硬件平台,但数据电台只支持半双工工作;同时使用两对数据电台实现全双工工作会增加设备成本和体积重量。采用在系统软件内构建时分双工通讯(TDD)协议的方法,可在只

收稿日期:2012-10-25

修回日期:2012-12-05

基金项目:南京航空航天大学基本科研业务专项研究基金(无人机关键技术专项 NP2011006)

作者简介:杨柳庆(1979—),男,江苏南京人,助理研究员,研究方向为导航制导与控制,计算机测控。

使用一对数据电台的情况下,模拟实现全双工通讯。

由于电磁环境、测控距离以及无人机姿态等因素的影响,可能引起测控链路异常中断,造成遥测数据丢失。采用装载数据记录仪的方式,可作为无线测控链路的有效补充。

综合上述分析,本着多功能、低成本和小型化的原则,论文以数据电台为硬件平台,基于时分双工通讯方式和时分多址通讯体制,设计一种具备数据记录功能的简易型一站多机式无人机测控系统。

### 1.2 硬件组成

该系统由地面控制站和机载测控设备两部分组成。地面控制站包括遥控/遥测车、数据电台及天线、遥控指令键盘和工业控制计算机;机载测控设备包括数据电台及天线、数据采集记录管理计算机。该系统工作示意如图1,组成接口如图2、图3所示。

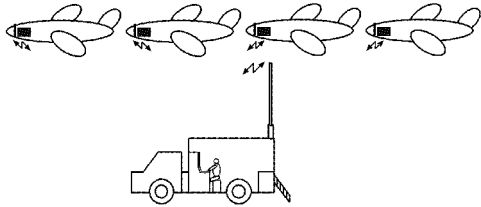


图1 系统工作示意图

Fig.1 System working diagram

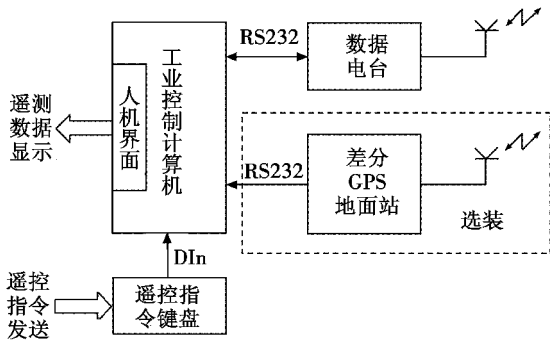


图2 地面控制站组成接口图

Fig.2 The interface of the ground control station

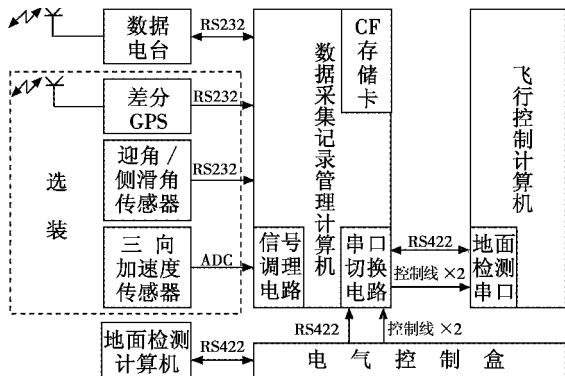


图3 机载测控设备组成接口图

Fig.3 The interface of the onboard telemetry and controlling equipment

### 1.3 软件功能

1) 遥控功能。地面控制站通过数据电台发送遥控指令;机载测控设备通过数据电台接收遥控指令,并转发给飞行控制计算机。

2) 遥测功能。机载测控设备从飞行控制计算机接收遥测数据,并通过数据电台发送;地面控制站通过数据电台接收遥测数据,并在遥测界面上显示。

3) 数据记录/回放功能。机载测控设备将遥测数据记录在CF存储卡上;通过遥控指令可调用某个时段的遥测数据进行回放,并返回地面控制站显示。

4) 一站多机测控模式。在时分多址体制基础上,实现多机协同作战无人机的同屏多任务操控。

## 2 关键技术

### 2.1 基于TDD协议的全双工测控通讯

数据电台只支持半双工工作,为了实现测控系统的全双工通讯,需在系统软件内构建TDD协议<sup>[6-7]</sup>。

1) TDD协议的帧结构。

TDD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4所示。

捕获突发帧:

预码	同步码	同步码
----	-----	-----

空闲突发帧:

预码	同步码	状态码
----	-----	-----

数据帧:

预码	同步码	命令码	数据信息	终止码
----	-----	-----	------	-----

图4 TDD协议帧结构示意图

Fig.4 Structure of TDD protocol frame

TDD协议帧结构定义如下。

① 预码,1个字节,用于位同步。

② 同步码,1个字节,一组特定的编码组合,用于块同步,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位标识发送者,低4位标识接收者。

④ 命令码,1个字节,用于指示通讯终端所发生的行为、过程或状态。若发送者是地面控制站即遥控状态,命令码为遥控指令编码;若发送者是机载测控设备即遥测状态,命令码为遥测数据的副帧编码。

⑤ 数据信息,根据实际需求约定格式,并填入相应内容,其最后1个字节为数据校验码。

⑥ 终止码,2个字节,用于对之前的数据进行保护,标志着数据信息的结束。

### 2) TDD 协议的帧同步。

数据电台按位发送和接收数据,而帧结构中的数据长度单位是字节,因此通讯时必须实现 TDD 协议底层的帧同步,通过数据电台的 MCU 处理器加以控制。

TDD 协议帧结构中的预码和同步码,各 1 个字节,由两个 8 位的同步块构成。接收方使用两个 8 位的移位寄存器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,再将当前接收到的字节跟预码作比较,若与预码相匹配,则说明位同步已完成;然后继续接收下一个字节,若下一个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,在下一帧数据到来时,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,必须重新开始进行位同步判断。帧同步建立过程如图 5 所示。

TDD 帧 (移位)	预码	同步码	数据
位同步完成	接收寄存器		
块同步完成		接收寄存器	
帧同步已建立, 直接接收数据			接收寄存器

图 5 TDD 协议帧同步过程示意图

Fig. 5 TDD protocol frame synchronization process

### 3) TDD 协议的突发同步。

地面控制站与机载测控设备在同一个载波信道上进行信息的接收与发送,一方处于发送态时,另一方应处于接收态,因此在数据传输开始前必须完成通讯双方的突发同步。

TDD 协议数据传输过程包括突发同步建立、突发同步保护和数据传输。初始化时,地面控制站与机载测控设备都处于接收状态。当一方有发送请求时称为主叫方,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,认为通讯双方已经完成突发同步,通讯链路已经建立;在后续的突发通讯中,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,认为通讯结束,过程见图 6。

TDD 协议通过交替地将通讯设备配置成接收态或发送态来完成双工通讯,由系统的接口层软件完成控制。对于用户的应用层软件而言,在数据电台传输速

率大于通讯双方所需传输速率之和的情况下,可以认为测控通讯是全双工的。

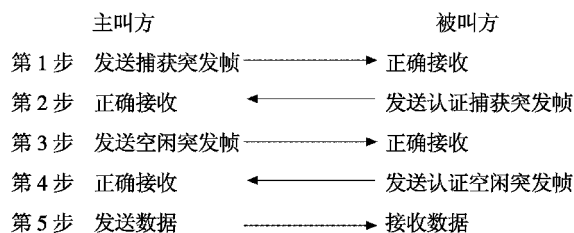


图 6 TDD 协议数据传输过程示意图

Fig. 6 TDD protocol data transferring diagram

## 2.2 基于 TDMA 体制的一站多机测控模式

时分多址体制<sup>[8-10]</sup>按时隙分割方式不同可分为固定时隙方式和动态分配时隙方式。固定时隙方式把通讯周期分割为数量及大小固定的时隙,按顺序分配给已预知的通信设备;动态分配时隙方式则根据无法预知的通信设备的实时需求,动态调整时隙分割方案,实现过程较为复杂。由于无人机测控系统的通信设备数量和通讯时隙需求均可预知,所以采用固定时隙时分多址体制实现一站多机测控模式。

根据无人机测控系统的更新率要求,时间被分割成固定间隔的通讯周期,每一个通讯周期又分为下行周期和上行周期。下行周期被分割成两个时隙,地面控制站在第 1 个时隙内向无人机群发送遥控信息,第 2 个时隙为保护时隙;上行周期被分割成  $N$  个时隙 ( $N = 2 * n, n$  为无人机架数,  $n > 1$ ), 第 1 架无人机在第 1 个时隙发送遥测信息,第 2 个时隙为保护时隙,第 2 架无人机在第 3 个时隙发送遥测信息,第 4 个时隙为保护时隙,……,第  $n$  架无人机在第  $N - 1$  个时隙发送遥测信息,第  $N$  个时隙为保护时隙。无人机测控系统固定时隙时分多址体制通讯周期结构如图 7 所示。

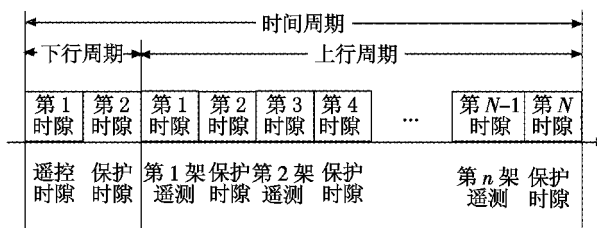


图 7 一站多机测控通讯周期结构图

Fig. 7 Telemetry and control communication cycle diagram

以某型无人机为例,遥控数据 TDD 突发同步传输的理论时间为 10.4 ms,设置遥控下行保护时隙为 9.6 ms,则遥控下行周期为 20 ms;单架无人机遥测数据 TDD 突发同步传输的理论时间为 33.3 ms,设置遥测上行保护时隙为 11.7 ms,则遥测上行周期为  $(45 * n)$  ms,测控通讯周期为  $((45 * n) + 20)$  ms。再以一站四机测控为例,即  $n = 4$ ,遥控下行周期为 20 ms,遥测上行周期为 180 ms,测控通讯周期为 200 ms,单架无人机

的遥测数据更新率为 5 Hz。系统内无人机数量越多,即  $n$  越大,单架无人机的遥测数据更新率越低。

时分多址体制下,地面控制站与无人机群的时钟同步非常关键。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无人机的遥测信息电波。在载波频率相同的情况下,地面控制站无法分离各无人机的遥测信息,从而引起遥测数据堵塞。

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无人机实时经纬度可以计算得到无线传输距离,再除以无线电传输速率就可得到无线传输时间误差。由于地面控制站和无人机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。修正时钟误差的具体方法如下: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心跳同步指令,系统内各无人机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。

### 2.3 基于 CF 存储卡的数据记录仪

为了防止测控链路中断造成遥测数据丢失,系统以 TERN 公司带 CF 卡扩展槽的 586-Engine-P 为机载测控设备的计算机内核,集成数据记录仪功能,将无人机遥测数据以文件的形式记录在 CF 卡上;通过遥控指令可调用某个时段的遥测数据进行回放,并发送回地面控制站显示。

数据记录仪文件系统应具备兼容性、实时性和可靠性这 3 个特点。FAT32 文件系统<sup>[11-12]</sup>的兼容性和可靠性较高,但由于采用链式结构存放文件,造成文件存取的实时性较低。

数据记录仪同一时间仅需要在 CF 卡上建立和管理一个数据文件,文件的大小也可以按固定时间的遥测数据量来确定。根据以上使用特点,可设计一种特定 FAT32 文件系统,在不影响兼容性的前提下,提高文件存取实时性。方法如下:

- 1) 选择 FAT32 文件系统对 CF 卡进行格式化;
- 2) 按 CF 卡的大小以及固定的文件大小在根目录下建立多个文件,文件名从 1 开始连续编号;
- 3) 找出每个文件的数据区物理扇区起始地址;
- 4) 在文件数据区第一个扇区中记录下该文件的信息,与 FDT 表中信息完全相同;
- 5) 从第二个扇区开始按连续地址存储数据,存满后顺序打开下一个文件继续存储。

标准 IDE 模式下,CF 卡的读写遵从 ATA 总线接口标准,以扇区为最小访问单位,因此需要在软件中创建大小为一个扇区的数据缓冲区。CF 卡数据存储流程如图 8 所示。

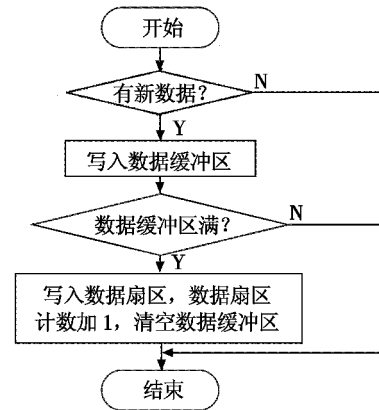


图 8 CF 卡数据存储流程图

Fig. 8 Data storage flow chart of CF card

## 3 实施效果

本文设计的简易型一站多机式无人机测控系统适应自主作战、多机协同作战无人机对测控系统的特殊要求,不仅实现了一站多机测控模式,而且还具有低成本和小型化的优点。同时,该测控系统还集成了遥测数据记录与回放功能,实现了通讯链路中断后的半实时和非实时测控功能。

该测控系统进行了地面跑车拉距试验(距离大于 20 km)和几十个架次空中试飞(含一站多机同飞,测控距离大于 50 km),工作稳定可靠(误码率小于  $10^{-5}$ ),数据准确(在某型无人机应用中,一站单机刷新率 20 Hz,一站四机刷新率 5 Hz),界面友好,使用方便。

### 参考文献

- [1] 吴潜. 无人机测控系统的现状与发展趋势[J]. 电讯技术, 2009, 49(9): 90-94.
- [2] 马向玲, 雷宇曜, 孙永芹, 等. 有人/无人机协同空地作战关键技术综述[J]. 电光与控制, 2011, 18(3): 56-60.
- [3] 涂强. 无人机测控系统技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [4] QI Q, WU H, JI L. FDMA/TDMA hybrid MAC protocol for wireless sensor network [J]. Proc. SPIE Advanced Sensor Systems and Applications, 2012, 8561: 85610Y.
- [5] 饶俊. 无人机地面多通道中的基带实现方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [6] SHAIRI N A, AHMAD B H, ABDUL A, et al. SPDT switch with defected ground structure for time division duplex switching in wireless data communication system[C]//RF and Microwave Conference (RFM), 2011: 238-241.
- [7] AI-WAZEDI I, ELHAKEEM A K. A CDMA/TDD approach for wireless mesh networks[C]//Computers & Electrical Engineering, 2010, 36(5): 978-992.

(下转第 15 页)

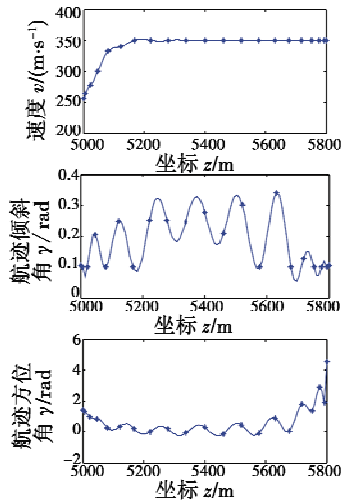


图3 最优状态量结果

Fig. 3 Optimal state parameter results

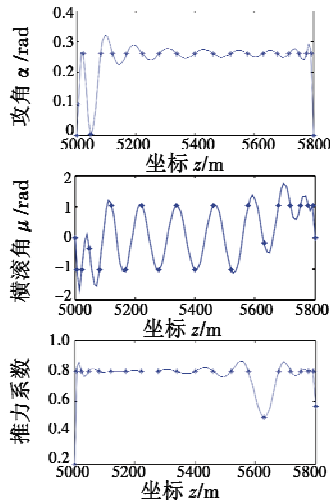


图4 最优控制量结果

Fig. 4 Optimal control parameter results

### 5 结论

精细规划是为满足现代作战任务规划需求而提出来的,通过对控制量和状态量的综合规划,能实现飞行器飞控和火控的有效结合,充分发挥飞行器隐身特性,并为飞行器实现自动攻击和为飞行员提供辅助决策奠定了基础。本文首先通过建立精细规划策略模型,将主

要应用于航天控制的勒让德伪谱法应用到精细规划模型求解中,得出了一套实现精细规划的理论策略方案;通过对CFSQP算法的改进应用,减少了优化变量数量,使其能实现对文中复杂NLP问题的快速解算;实例仿真结果表明了所提出的精细规划策略的可行性和有效性。

### 参考文献

- [1] 朱国涛,周树道,吕波,等. 基于气象威胁的无人机航迹规划方法研究[J]. 电光与控制,2011,18(6):26-30.
- [2] 薛伟,王宏伦. 基于综合控制的无人机对地攻击技术研究[J]. 电光与控制,2010,17(7):26-30.
- [3] 张胜祥. 基于滚动时域MILP的小型无人机航迹规划[D]. 广州:华南理工大学,2009.
- [4] ELNAGAR G, KAZEMI M A, RAZZAGHI M. The pseudospectral Legendre method for discretizing optimal control problems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(10): 1793-1796.
- [5] FAHROO F, ROSS I M. Costate estimation by a Legendre pseudospectral method[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2001, 24(2): 270-277.
- [6] FAHROO F, ROSS I M. A spectral patching method for direct trajectory optimization[J]. Journal of the Astronautical Sciences, 2000, 48(2): 269-286.
- [7] ERIC C J, TWIGG S, RIES T. On-line trajectory optimization for autonomous air vehicles [R]. FA9550-04-C-0046, 2007.
- [8] 胡正东,丁洪波,曹渊. 伪谱法在SGKW轨道快速优化中的应用[J]. 航天控制,2009,27(4):3-7.
- [9] WILLIAMS P. Aircraft trajectory planning for terrain following incorporating actuator constraints [J]. Journal of Aircraft, 2005, 42(5): 1358-1362.
- [10] 雍恩米,唐国金,陈磊. 基于 Gauss 伪谱法的高超声速飞行器再入轨迹快速优化[J]. 宇航学报,2008,29(6):1766-1772.
- [11] 宗群,田柏苓,窦立谦. 基于 Gauss 伪谱法的临近空间飞行器上段轨迹优化[J]. 宇航学报,2010,31(7): 1775-1781.
- [12] 李春华,郑昌文,周成平,等. 一种三维航迹快速搜索方法[J]. 宇航学报,2002,23(3):13-17.

(上接第9页)

- [8] ALONSO A. Throughput of self-organizing time division multiple access MAC layer for vehicular networks based on measured SNR time-series [C]//Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE, Sept, 2011:5-8.
- [9] XU L, FU J. The design and implementation of industrial monitoring wireless sensor networks based on improved TDMA MAC protocol [C]//Control and Decision Conference (CCDC), 2012(24) Chinese,3358-3362.

- [10] 夏白桦,李洪业,陶晓宇,等. 时分多址数据链时隙分配方法及仿真分析[J]. 火力与指挥控制,2011,36(4):97-100.
- [11] LI Qian. Diversity-multiplexing tradeoff of wireless communication systems with user cooperation [J]. Information Theory, 2011, 57(9):5794-5819.
- [12] 王丽萍. 基于S3C2410实现FAT32格式的CF卡标准文件系统[J]. 计算机与数字工程,2008,36(12):105-107.