

# 一种低成本便携式机载导航设备

赵泽荣, 赵小勇

(中国民用航空飞行学院, 广汉 618307)

**摘要:**“低、慢、小”飞行器的监控是低空空域开放的一个技术难题, 制约通航的发展速度。本文针对“低、慢、小”航空器运行特点, 设计一种低成本、小体积和低功耗的导航通信设备, 该设备集成了GPS、北斗、伽利略导航源以及北斗短报文通信功能, 利用民航的ADS-B通信数据链及北斗短报文接收系统, 不仅将“低、慢、小”飞行器纳入了民航的通信导航监视/空中交通管理(Communication navigation surveillance/air traffic management, CNS/ATM)监管体系, 规避了在融合空域内与运输机的运行风险, 还解决了ADS-B数据链在障碍物遮挡、超视距等情况下无线信号丢失的问题。同时采用航迹外推、误差修正等技术, 确保飞行器航迹连续性以及位置精度的准确性。并通过轿车及通航飞机搭载该设备进行飞行比对验证, 功能及性能都优于现有的ADS-B机载通信导航设备, 为实现低空空域飞行器“看得见、能识别、能处置”的目标提供一种技术解决方法。

**关键词:** 飞行器; 低空空域; ADS-B; 北斗通信; 导航设备

**中图分类号:** TN924      **文献标志码:** A

## Low Cost Portable Airborne Navigation Equipment

ZHAO Zerong, ZHAO Xiaoyong

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** The monitoring of “low height, slow speed, small size” aircraft is a technical problem in the opening of low-altitude airspace, which restricts the development of general aviation. This paper designs a low-cost, small-volume and low-power navigation communication equipment for “low, slow and small” aircraft. The equipment integrates GPS, Beidou, Galileo navigation source and Beidou short message communication functions. Using the civil aviation ADS-B communication data chain and Beidou short message receiving system, it not only brings “low, slow and small” aircraft into civil aviation communication navigation surveillance/air traffic management (CNS/ATM) supervision system, as well as avoids the operation risk of large aircraft in the fusion airspace, but also solves the problem of wireless signal loss in the case of obstacle occlusion and hyper-range. At the same time, track extrapolation and error correction techniques are used to ensure the accuracy of aircraft track continuity and position accuracy. A car and a light aircraft are deployed to carry on the flight comparison verification, and the results demonstrate that the function and the performance are superior to the existing ADS-B airborne communication and navigation equipment. This equipment provides a technical solution to “visible, identifiable and disposal” low altitude airspace aircraft.

**Key words:** aircraft; low-altitude airspace; ADS-B; Beidou communication; navigation equipment

**基金项目:** 民航飞行技术与飞行安全重点实验室开放基金(FZ2020KF05)资助项目。

**收稿日期:** 2020-04-07; **修订日期:** 2020-10-10

## 引言

“低、慢、小”飞行器属于通用航空的范畴。随着中国低空空域的逐步开放,通用航空将迎来前所未有的发展机遇,将会创造巨大的社会效益和经济效益。然而由于通用航空作业点多、面广<sup>[1]</sup>,保障条件和作业环境差,安全基础脆弱,保障安全体系和机制不健全,安全监管技术手段有限,安全管理水平低,造成中国通用航空飞行事故和事故征候高于运输航空<sup>[2]</sup>。因此,在通用航空业规模迅猛增长的同时,其安全问题将面临空前的挑战,将成为通用航空业可持续发展的屏障。为了加快中国通用航空事业的发展步伐,必须采取行之有效的安全技术手段和安全管理办法解决发展过程中存在的安全问题。

“低、慢、小”这样的飞行器由于受其自身构型及成本等因素的限制,导航通信不可能与运输航空同步。特别是中国无人机的发展,黑飞、乱飞的情况经常出现,在融合空域内给运输航空造成安全运行风险。从2016至今,全国无人机乱飞造成运输航空改航或停运事件不低于100起。因此有效地监管“低、慢、小”飞行器将是中国低空开放后面临的难题。首先要解决“看得见”的问题。现在的“低、慢、小”飞行器由于没有通信导航系统,导致地面管制员无法看到其在空中的态势。由于设备的加改装必须得到民航局相关单位的适航加改装审批,成本比较高,因此通航的飞行器多数没有加装导航设备。当这些飞行器在融合空域作业时,民航的监管部门无法了解到这些飞行器在空中的态势,从而对运输航空造成了安全威胁。国外的通航比较发达,设备的加改装不受机型约束及政府部门的监管,因此对设备的体积、功耗方面没有太多的考虑,并且国外通导设备的导航源只有GPS。而国内没有针对民航取得适航认证的机载导航设备,便携的机载导航设备都是基于GPS导航源,且体积大、成本昂贵。针对中国“低、慢、小”飞行器的特点,本文设计一种低成本、小体积、低功耗的便携式导航通信设备,使得这些飞行器纳入民航的通信导航监视/空中交通管理(Communication navigation surveillance/air traffic management, CNS/ATM)监管体系,以符合民航机载设备的适航取证要求。该通信导航设备具备北斗短报文的功能。当目标在低空或者遮挡比较严重的区域作业时,根据ADS-B数据链的通信体制<sup>[3]</sup>,ADS-B地面站是无法收到这些目标发送的信息,而北斗短报文是采用卫星通信方式,弥补了ADS-B数据链通信的不足。

## 1 设计原理及构架

当前“低、慢、小”飞行器都是处在“黑飞”阶段,即使获得了空管监管部门的允许,空管监管部门的监视系统仍无法对这些飞行器进行监控。且市面上没有成熟的产品满足这些航空器的导航监视需求。为了实现与当前的监视体制兼容,设备采用了ADS-B通信数据链。其系统实现原理如图1所示。在图1中,导航源接收模块、北斗短报文处理模块、大气计处理模块以及FPGA处理接口为ARM处理器的外设;机载报文处理和外部接口为ARM内部处理信息模块。ARM处理器通过串口1、串口2、SPI总线、DMA总线以及USB接口分别与导航源接收模块、北斗短报文处理模块、大气计处理模块、FPGA处理接口和外部接口进行数据交互。射频处理模块与FPGA交互ARM处理器编码的机载报文,并以模拟信号的方式对外发射。电源模块采用外部供电和电池供电两种方式,方便该设备与其他系统集成。外部接口是设备维护及配置的接口,可以与外部进行数据交互。该设备主要加装在“低、慢、小”的飞行器上,设备通过1 090 MHz的无线频率广播数据信息,民航的地面接收设备可以收到这些飞行器的空中交通信息,使得这些飞行器在融合空域中作业时,不会造成民航运输的空中交通安全威胁。

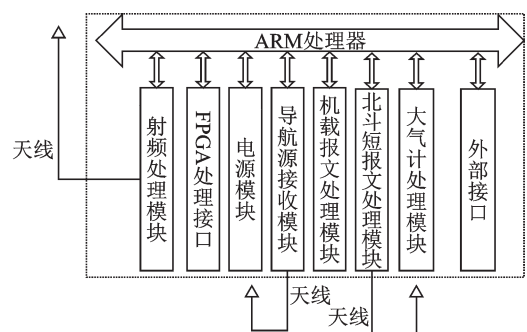


图1 设备系统原理图

Fig.1 Diagram of equipment

### 2 设备硬件及固件的设计

为了使设备设计达到低成本、小体积和低功耗的目标,在整个设备的设计过程中,对元器件的选型以及PCB板的电路设计都提出了更高的要求。ARM处理器采用STM32107VCT6,该芯片具有低功耗、小体积以及多接口功能<sup>[4]</sup>。在系统运行的过程中,ARM处理器采用睡眠节能模式,外设通过中断响应的方式唤醒CPU。系统构架如图2所示。导航源及气压计选择低功耗、小体积的芯片集成,而FPGA采用Xilinx生产的XC3S250E系列,该芯片与设备进行数据交互,并承担了部分射频模块的处理功能。北斗短报文处理模块选用GNS1531,并通过多卡复用的设计,规避了北斗普通用户1 min只能发送一次信息的要求<sup>[5]</sup>,增强了设备的可用性。通过地面控制设备发送短报文的时间,当设备ADS-B链路可用时,设备不发送短报文信息,从而降低了设备的功耗。

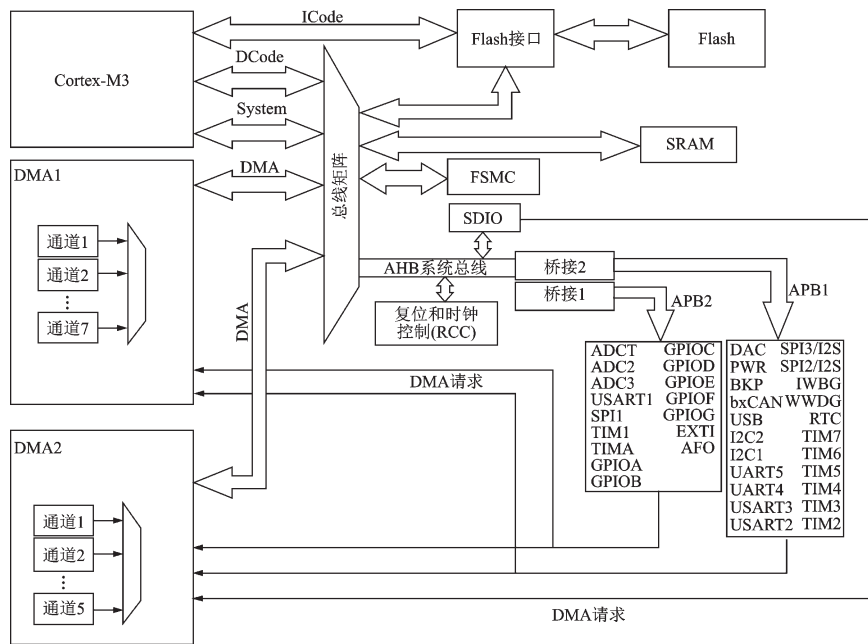


图2 ARM系统结构图  
Fig.2 System structure of ARM

ARM处理器在与外设通信的过程中,都是通过ARM的引脚进行数据的传输和控制。由于STM32107VCT6有100个引脚,每个外设与ARM处理器引脚的连接是由设备的结构及在PCB板上的布局决定的。因此需要配置硬件的寄存器、控制时钟和输入输出数据线等对应的地址,实现底层硬件驱动,为应用层的开发提供便捷的控制接口。

### 3 系统软件处理设计

ARM处理器是整个系统的处理中心,外设数据交互完全由处理器控制。然而ARM处理器没有操作系统,因此任务的调度处理由软件设计来控制。为了充分发挥硬件的性能,合理优化资源配置,使得外设的硬件井然有序地工作,软件设计中必须考虑到每个外设业务的优先级、处理速度等,从而合理分配CPU资源,保证数据处理的实时性及可靠性。整个系统的业务处理逻辑如图3所示。

在图3中,ARM通过串口的方式接收导航源报文,并控制导航源输出的类型;北斗短报文处理也是通过串口来控制,接收地面处理中心发送的控制信息,发送机载自定义的报文信息以及设备故障时

的信息。大气计外设是提供气压高度,ARM处理器通过SPI总线进行控制,并把大气计芯片工作模式设置为主模式,当需要高度的时候,ARM处理器才去读大气计芯片的寄存器。外部接口是上位机通过USB方式对设备进行维护及控制。FPGA接口是处理ADS-B机载报文的通道,ARM处理器根据导航信息、高度及外部的配置信息,按照ADS-B机载报文的编码协议,组装成报文发送给FPGA后并通过射频对外广播。面板指示灯控制是ARM处理器通过GPIO控制LED灯状态,标识设备的工作模式及运行状态。

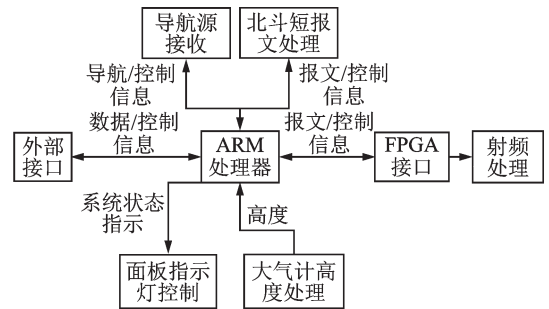


图3 系统业务逻辑

Fig.3 System business logic

### 3.1 导航信息处理

设备中的导航信息为多模式导航源。由于北斗导航信息在民航的应用精度没有GPS高<sup>[6-9]</sup>,但GPS导航源信息容易受到干扰,因此多模式导航信息能确保定位信息可得,通过对多模式导航信息的修正和融合处理,使得地面监视系统能实时了解目标的精确位置。数据处理流程如图4所示。

在图4中,ARM处理器开辟一个任务来处理导航信息,并把任务的优先级设置了最高。当有信息的时候,触发中断,唤醒ARM处理器,开始接收数据,并对数据的同步进行处理。当同步的时候,把所收到的数据保存到缓冲区,直到接收到报文的结束符号,表示接收到一条完整的导航信息。并调用数据处理模块,更新机载报文的位置信息以及导航性能参数。当导航源不可定位时,采用外推算法对目标的位置进行更新。设 $t_1$ 导航信息丢失时接收到上一次导航信息的时间; $t_2$ 为当前需要发送报文的时间,精确到0.2s; $\varphi_1, \lambda_1$ 为 $t_1$ 时刻的纬度和经度, $\nu$ 为目标的速度; $\theta$ 为目标的航向,则 $t_2$ 时刻的纬度 $\varphi_2$ 和经度 $\lambda_2$ 分别为

$$\begin{cases} \varphi_2 = \varphi_1 + (\nu \cos\theta(t_2 - t_1)) / (2.16 \times 10^8) \\ \lambda_2 = \lambda_1 + (\nu \sin\theta(t_2 - t_1)) / [(2.16 \times 10^8) \cos\varphi_1] \end{cases} \quad (1)$$

在式(1)中,每次更新后的位置,都作为下一次更新的起始位置进行迭代。

### 3.2 高度信息处理

在机载设备中,目标的高度有几何高度及气压高度两种模式选择。由于几何高度来源于导航源,在实际应用中有一定的误差,只有在气压高度不可得的情况下,才选择几何高度。对于气压高度的获取,ARM处理器在需要的时候,主动读取气压传感器的寄存器,读取的值只是当前目标所在空间的压强及温度,需要进行处理计算后才能得到目标的高度。数据处理流程如图5所示。

在图5中,气压高度的处理是在位置参数更新后立即处理。由于气压传感器被设置为主模式,ARM处理器获取数据时需要向传感器发送控制数据,当把传感器中寄存器的数据读完后,就进行数据处理,计算气压高

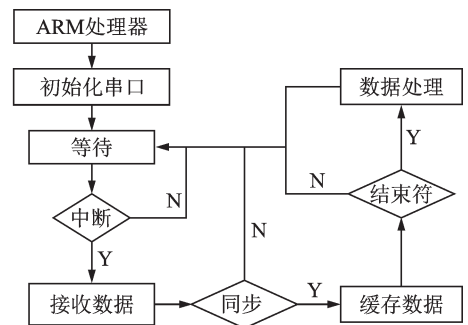


图4 导航数据处理流程

Fig.4 Navigation data processing process

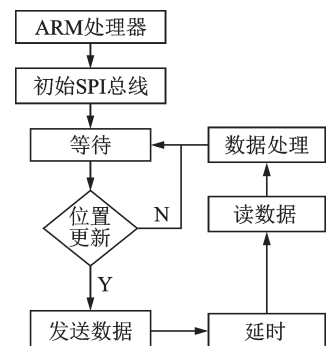


图5 高度数据处理流程

Fig.5 Processing process of high data

度值。其算法如图6所示。系统需要气压高度值时,ARM处理区域气压传感器的状态值 $C_1 \sim C_6, D_1 \sim D_2$ ,通过计算处理获取当前的温度,并对温度值进一步修正,再根据当前的压强值以及压强相关的系数,进一步计算飞机当前在空中的高度值。该高度值通过通信导航设备发送到地面的空中交通监视系统,管制员就可以根据该高度值合理调度空中的交通流量。

### 3.3 北斗短报文处理

为了弥补地空视距通信存在的盲区,设备增加了北斗短报文的处理功能。由于北斗短报文普通用户发送报文的周期是1 min,对于空中飞行器的定位监视应用,是不实用的,因此设计了多卡复用处理,缩短报文发送周期<sup>[10]</sup>。而且短报文发送是由地面处理中心进行控制,当ADS-B数据链通信正常时,短报文发送功能是不启动的。如果设备出现故障,设备会把故障信息通过北斗短报文的的功能发送到地面处理中心。数据处理流程如图7所示。

在图7中,北斗短报文处理包括了发送和接收。发送的数据包括ADS-B数据以及设备故障信息的数据。对于北斗短报文发送ADS-B数据的功能,是通过地面控制中心触发。地面控制中心根据目标当前的位置、飞行计划、ADS-B地面站作用距离以及目标当前的地形情况,向机载发送控制命令触发短报文发送功能,以降低设备的整体功耗。因此北斗短报文的接收数据是地面控制中心的控制数据。由于北斗短报文的传输处理是通过卫星链路,有效地弥补了ADS-B数据链在障碍物遮挡、超视距等情况下无线信号丢失的问题。

### 3.4 FPGA接口的数据处理

FPGA接口是ARM处理器发送ADS-B报文的通道。当ARM处理器在一定周期内,把ADS-B报文组装好,就往FPGA发送,而且FPGA对报文进行调制处理,最终送给射频处理模块,以模拟信号的方式对外发射。同时,FPGA及射频模块的固件更新、运行状态等信息也从这个接口与ARM处理器进行交互。数据处理流程如图8所示。

在图8中,采用DMA的方式传输数据,传输带宽为8 bit,报文交互为自定义格式。发送的报文除了ADS-B报文外,还有一些控制命令,如自检、读取状态和更新固件等。接收的信息为反馈消息及故障信息等。

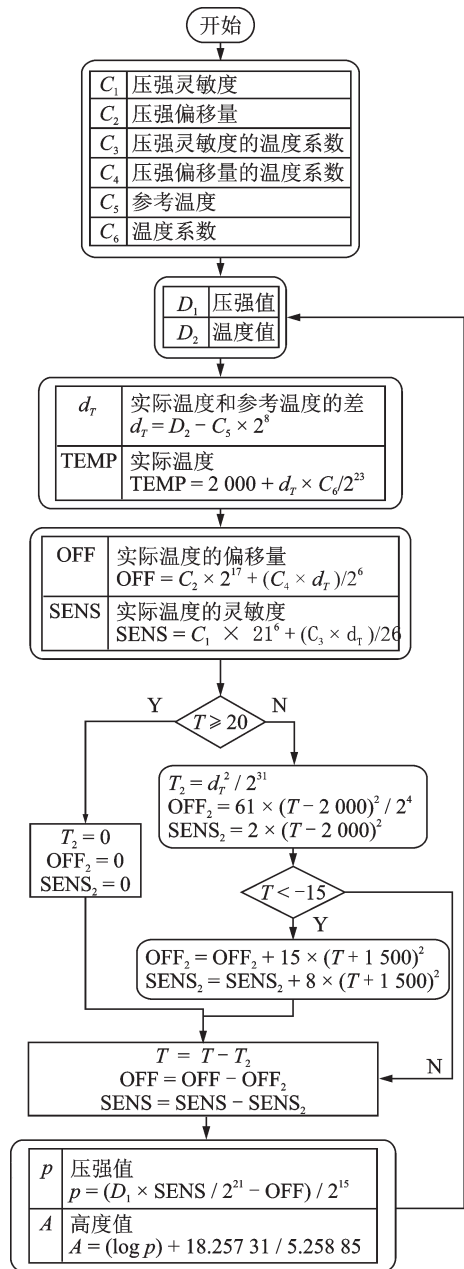


图6 气压高度处理算法

Fig.6 Algorithm of air pressure height

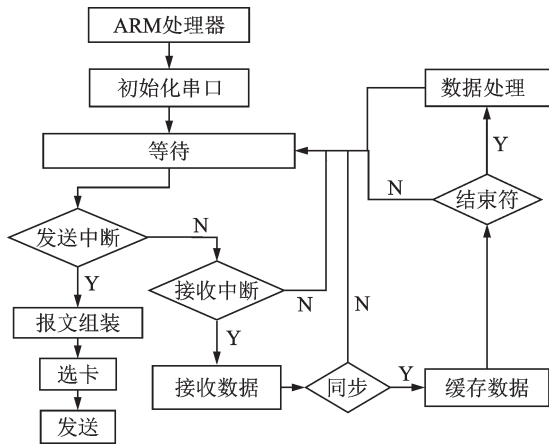


图7 北斗短报文数据流程

Fig.7 Process of Beidou short Message

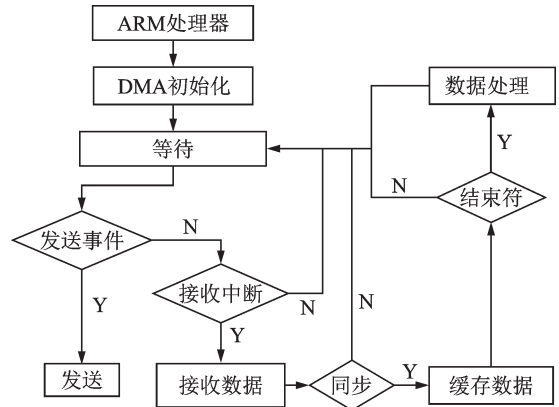


图8 FPGA接口数据流程

Fig.8 Process of FPGA interface data

### 3.5 外部接口的数据处理

外部接口采用USB通信,并与上位机进行连接,通过上位机软件可以对设备进行维护及配置。包括设备的状态监视、日志信息读取、软件更新和机载报文参数配置等。特别是对机载报文参数如呼号、地址码、报文类型、导航源以及气压模式选择及修正等的配置,而且这些配置信息写入了Flash芯片中,当下次开机时,这些信息就直接从Flash中读取。

## 4 测试与验证

该设备通过器件选型和高度集成设计,体积为 $120\text{ mm}\times 90\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ ,设备的发射频率为 $1\ 090\pm 1\text{ MHz}$ ,发射功率 $50\sim 250\text{ W}$ 之间,设备的作用距离 $\leq 300\text{ km}$ ,功耗 $\leq 10\text{ W}$ ,完全达到了低成本、小体积和低功耗的要求。为了测试导航设备的性能,本文采用两种方式进行比对测试验证:(1)跑车对比验证;(2)在通航飞机上携带导航设备与飞机本身的机载导航设备进行比对测试验证。图9展示了设备在飞机上的安装配置。

导航设备发射信息的处理,需要地面监视系统的配合,才能得到验证结果。详细的测试方案如图10所示。在图10中,地面接收系统有机场运行的监视系统及测试监视系统,其中测试的监视系统不仅包含了ADS-B地面站,还包括了北斗短报文收发机,该设备与ADS-B地面监视系统融合数据处理<sup>[11]</sup>。测试的效果如图11~13所示。

在图11,12中,采用跑车的测试验证方式,Test0001是测试的目标,该设备放置在车上,并在绵阳城里楼群比较密集的地方进行跑车测试。图11是带有北斗短报文收发机的地面系统呈现的效果图,图12为机场运行的监视系统显示的效果。对比图11和图12,图11的目标运动轨迹比较连续,虽然有丢包的情况,但是比较少;而图12丢包情况就比较明显。这由于测试地方是在机场的下方,且有山遮挡,同时测试系统能收到北斗短报文的信息,从而更新了轨迹的连续性。图13为在B7936的通航飞机上携带该导航设备进行飞行验证测试的效果图。由于飞机上有两个通信导航设备,因此在监视界面上出现两个监视目标,分别是B7936和Test0001。飞机从绵阳机场起飞后,在空旷没有遮挡的地方,而且距离地面接收系统比较近的时候,两个目标几乎是重叠在一起运行。从图11可以看出,在B7936目标信号消失前,运行的轨迹是连续的,而且是B7936和Test0001轨迹的叠加,因此比较密集;但是飞机穿越山区的时候,B7936的信号丢失,也就是ADS-B数据链的无线信号因为遮挡导致地面监视系统接收不到,所以



图9 导航设备实物图

Fig.9 Diagram of navigation equipment

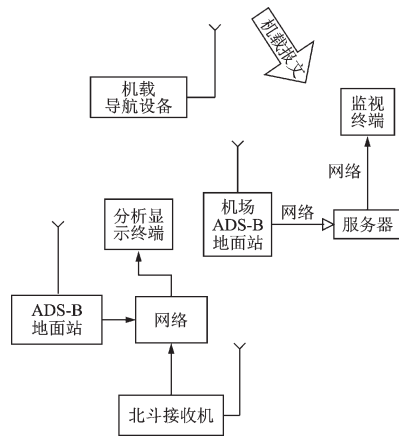


图10 导航设备测试性能方案

Fig.10 Performance test scheme for equipment



图11 设备测试效果图

Fig.11 Test effect of equipment

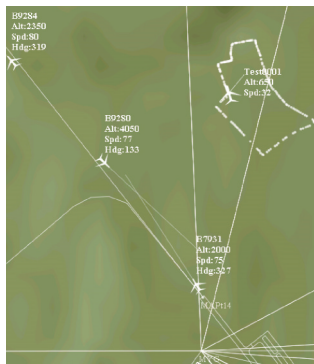


图12 机场监视系统显示结果

Fig.12 Result of airport surveillance system

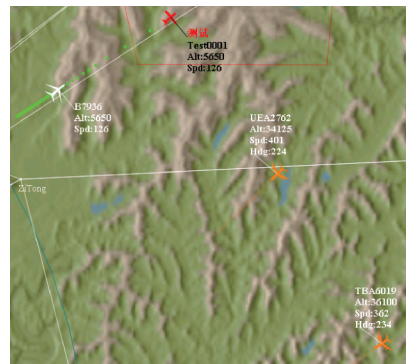


图13 飞行测试结果

Fig.13 Flight test result

Test0001的ADS-B数据链功能也就失效。但是目标还能继续运动,是由于北斗短报文更新了地面监视系统目标所在的位置,而且Test0001的轨迹也没有那么连续,是因为北斗短报文更新周期是1 min,而Test0001采用多卡复用的功能,轨迹的间隔相对要小一些。在图13中,在同一个位置不同高度可以看到民航的大飞机,因为民航飞机的高度在10 000多米,而小飞机的高度只有1 640多米,因此受地形的影响比较大。通过这两种对比测试验证,设备的实用性比现有的系统有所提高。最主要的是设备的低成本、小体积和低功耗等优势,非常适合“低、慢、小”飞行器加装,为通航的发展提供了技术支撑。

### 5 结束语

随着通用航空的发展,空域内航空器品种将会越来越繁杂。由于“低、慢、小”的航空器使用空域随意性大,飞行作业项目多样化,飞行时间不确定等,管理及监视上的困难增加。为了使这些航空器在融合空域不影响运输航空飞行,需要低成本、高效率的技术手段来加强管理及监视问题。本文针对通用航空器的应用需求,研发一种低成本、小体积、低功耗的通信导航设备。通过对比测试证明其性能优于当前的ADS-B机载通信导航设备。且该设备自带电池,充一次电在空中能持续工作6 h,功耗小于

10 W。特别是对低空、超低空飞行的目标,弥补了ADS-B数据链视距通信的盲区。为“低、慢、小”航空器纳入民航监管体系提供了一种技术解决方法。下一步的工作将完善设备性能,降低设备数据传输的丢包率,研究设备与飞行器的其他接口进行数据交互问题,缩短北斗短报文发送周期等,增强设备的可靠性及实用性。

#### 参考文献:

- [1] 林小凤.通用航空业发展瓶颈与对策研究[J].中国设备工程,2019(19): 203-204.  
LIN Xiaofeng. Research on development bottleneck and countermeasures of general aviation industry[J]. China Plant Engineering, 2019(19): 203-204.
- [2] 候现前.全产业链视角下中国通用航空产业区域发展水平比较研究[D].沈阳:辽宁大学,2019.  
HOU Xianqian. Comparative study on the regional development level of China's general aviation industry from the perspective of full industry chain[D]. Shenyang: Liaoning University, 2019.
- [3] RTCA. RTCA DO-260B minimum operational performance standards for 1 090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) and traffic information service-broadcast (TIS-B)[S]. Washington D C: RTCA Inc, 2011.
- [4] 王延文,王尔申,唐远江,等.便携式北斗通信定位终端系统的研究与设计[J].电子器件,2017,40(6): 1404-1407.  
WANG Yanwen, WANG Ershen, TANG Yuanjiang, et al. Research and design of portable Beidou communication positioning terminal[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2017, 40(6): 1404-1407.
- [5] 夏田奇.基于北斗的通用航空器飞行冲突检测与预警[D].天津:中国民航大学,2019.  
XIA Tianqi. General aviation flights conflict detection and traffic alert based on Beidou short messages servers[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019.
- [6] 于超,陈俊平,陈倩,等.北斗系统长期空间信号测距精度评估及精度提升分析[J].东南大学学报,2019,49(6): 1064-1071.  
YU Chao, CHEN Junpin, CHEN Qian, et al. Assessment of long-term BDS signal-in-space range error and its improvement[J]. Journal of Southeast University, 2019, 49(6): 1064-1071.
- [7] 李晓杰,郭睿,吴杉,等.不同姿态控制模式下的北斗卫星定轨策略研究[J].武汉大学学报,2019,44(10):1465-1471.  
LI Xiaojie, GUO Rui, WU Shan, et al. Orbit determining strategy analysis for Beidou satellite in different attitude control modes [J]. Journal of Wuhan University, 2019, 44(10):1465-1471.
- [8] 谢慧,宋淑丽,焦国强,等.北斗卫星导航系统 SISURE 初步评估[J].天文学报,2019,60(3):96-106.  
XIE Hui, SONG Shuli, JIAO Guoqiang, et al. Preliminary evaluation of SISURE of Beidou satellite navigation system[J]. Acta Astronomica Sinica, 2019, 60(3): 96-106.
- [9] 彭汉兵,杨元喜,王刚,等.GPS/BDS联合定轨对北斗卫星轨道的影响分析[J].大地测量与地球动力学,2018,38(12):1262-1267, 1290.  
PENG Hanbing, YANG Yuanxi, WANG Gang, et al. Effect analysis of GPS/BDS combined orbit determination on beidou satellite orbits[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(12):1262-1267, 1290.
- [10] 李德泉,李抗抗,李宏宇,等.飞机作业监测移动应用系统的设计与实现[J].应用气象学报,2019,30(6):745-758.  
LI Dequan, LI Kangkang, LI Hongyu, et al. Design and implementation of mobile application for real-time monitoring of weather-modification aircraft operations[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019, 30(6):745-758.
- [11] 段煜,海灏.一种ADS-B地面站自动测试系统的设计与实现[J].电子世界,2018,548(14):154-155.  
DUAN Yu, HAI Hao. Design and implementation of an automatic test system for ADS-B ground station[J]. Electronics World, 2018, 548(14): 154-155.

#### 作者简介:



赵泽荣(1980-),通信作者,男,高级工程师,研究方向:嵌入式软件开发和通信导航研究工作, E-mail: 150021486@qq.com。



赵小勇(1970-),男,一级飞行员,研究方向:飞行技术与飞行安全的研究工作, E-mail: 1257419574@qq.com。