

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.05.002

## 基于“北斗”的低空空域通航飞机导航监视技术研究

王尔申<sup>1,2</sup> 宋远上<sup>1</sup> 徐嵩<sup>1</sup> 庞涛<sup>1</sup> 曲萍萍<sup>1</sup> 黄煜峰<sup>1</sup>

(1. 沈阳航空航天大学电子信息工程学院, 沈阳, 110136;

2. 沈阳航空航天大学辽宁省通用航空重点实验室, 沈阳, 110136)

**摘要:** 针对目前 ADS-B 发射机定位信息主要取自 GPS 以及自身传输链路距离受限的问题, 研究了基于“北斗”的 ADS-B 监视技术, 在深入研究 ADS-B 报文协议的基础上, 将“北斗”通信作为 ADS-B 传输链路的补充, 研究了通航飞机的无缝导航监视技术, 设计了基于“北斗”定位源的多网融合的机载监视终端系统。利用锐翔电动飞机 RX1E 和搭建的监视中心系统对机载终端的 ADS-B 和“北斗”传输进行测试验证, 实验结果表明: 数据传输链路实现了对低空空域通航飞机的广域监视, 机载终端发送的飞行态势信息实现了监视中心对低空通航飞机的在线态势感知。研究结果为服务我国通航飞机作业安全以及提高低空空域管理的信息化水平提供了技术参考。

**关键词:** 通用航空; “北斗”卫星导航系统; 广播式自动相关监视; 多网融合; 态势感知

**中图分类号:** V249.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2019)05-0586-06

## Navigation and Surveillance Technology Based on “BeiDou” for General Aviation Aircraft in Low Altitude Airspace

WANG Ershen<sup>1,2</sup>, SONG Yuanshang<sup>1</sup>, XU Song<sup>1</sup>, PANG Tao<sup>1</sup>, QU Pingping<sup>1</sup>, HUANG Yufeng<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang, 110136, China;

2. Liaoning General Aviation Key Laboratory, Shenyang Aerospace University, Shenyang, 110136, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that the positioning information of the ADS-B transmitter is mainly taken from GPS and the limited distance of the transmission link, the technology of ADS-B monitoring based on “BeiDou” is researched. After an in-depth study on the ADS-B message protocol and making the “BeiDou” communication as a supplementary transmission link to ADS-B, the airborne monitoring terminal system using the “BeiDou” positioning source is designed and the seamless navigation and surveillance technology is studied for aircrafts. RX1E electric general aircraft and the established monitoring center system are used to test and verify the ADS-B and “BeiDou” transmissions of airborne terminal. The results show that the data transmission links realize wide-area surveillance of low-altitude airspace navigable aircraft, and the flight situation information sent by the airborne terminal realize the monitoring center’s online situation awareness of low-altitude aircraft. The research results provide a technical reference for serving the operational safety of China’s general aviation aircraft and improving the informationization level of low altitude airspace management.

**Key words:** general aviation; “BeiDou” satellite navigation system; ADS-B; multi-network convergence; situation awareness

**基金项目:** 国家自然科学基金(61571309)资助项目; 辽宁“百千万人才工程”(04021407)资助项目; 辽宁省自然科学基金面上基金(2019-MS-251)资助项目; 辽宁省教育厅(L201705, L201716)资助项目; 辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LR2016069)资助项目。

**收稿日期:** 2019-05-09; **修订日期:** 2019-07-12

**通信作者:** 王尔申, 男, 教授, E-mail: wanges\_2016@126.com。

**引用格式:** 王尔申, 宋远上, 徐嵩, 等. 基于“北斗”的低空空域通航飞机导航监视技术研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(5): 586-591. WANG Ershen, SONG Yuanshang, XU Song, et al. Navigation and Surveillance Technology Based on “BeiDou” for General Aviation Aircraft in Low Altitude Airspace[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(5): 586-591.

随着我国低空空域管理改革的不断推进,低空空域通航飞行器在飞行员培训、农林作业、航空摄影、短途运输、公务飞行等方面得到广泛应用。通用航空是民用航空的“两翼”之一,是民航强国建设不可或缺的重要组成部分,我国将通航的发展提升到国家战略高度。通用航空器类型丰富多样,体积小、低空空域飞行、飞行高度低、速度慢,航路通常不固定、随意性和机动性较强,导致通用航空飞行受到气象、地形以及地面无线电干扰等因素影响较大、作业环境差。随着我国低空空域飞行活动的日益增加,针对低空空域飞行器的监视技术为保障通航产业健康、安全、快速发展具有重要的意义<sup>[1]</sup>。我国“十三五”规划中明确提出推动“北斗”、ADS-B等新技术在通用航空中“先行先试”,开展示范应用,为运输航空提供数据支撑<sup>[2-3]</sup>。典型的ADS-B发射机利用高频数据链进行通信,位置信息基本以GPS数据为主,在数据安全方面始终存在受制于人的隐患<sup>[4]</sup>。而我国自主研发的“北斗”导航系统,目前已经向全球提供基本导航定位服务,到2020年将覆盖全球<sup>[5]</sup>。“北斗”系统所特有的短报文通信功能可为通航飞机监视技术提供卫星通信链路,在ADS-B出现信号盲区等情况下,继续提供通航飞机的监视服务。

当前,世界范围内都在积极推进ADS-B建设为整个航空运输系统提供服务<sup>[6-8]</sup>;美国已经在全国范围内完成ADS-B地面站建设;欧洲空管利用ADS-B技术提高对高密度飞行区域的空中交通管制能力;澳大利亚利用ADS-B在短时间内完成了高空覆盖。国内学者对基于“北斗”、ADS-B的系统设计方面做了许多研究工作:文献[9]研究了“北斗”短报文结构,利用多卡复用技术,提高了“北斗”通信频度。文献[10]实现了地面“北斗”便携站的设计。文献[11]对基于ARM单片机的嵌入式终端系统设计进行了介绍,未考虑在ADS-B数据链下的传输效果。文献[12]对航空器的测高系统进行了研究。文献[13]通过模拟飞机信息实现了飞机的冲突探测。文献[14-15]实现了基于ADS-B的监视系统设计。

本文针对现有研究存在的不足,研究了低空空域通航飞机的无缝导航监视技术,设计了基于“北斗”定位源的多网融合机载监视终端系统,将监视状态信息按照ADS-B协议和“北斗”协议进行传输,较好地解决了ADS-B链路传输距离和“北斗”通信容量、频度受限的问题,可服务于低空空域通航飞行器的监视需求。

## 1 系统总体设计

通航飞机导航监视系统将“北斗”与ADS-B监视技术优势互补,以“北斗”导航作为ADS-B的定位信息源,以ADS-B作为数据传输链路,以“北斗”通信作为卫星链路,较好地弥补ADS-B广域监视的不足,系统的结构框图如图1所示。

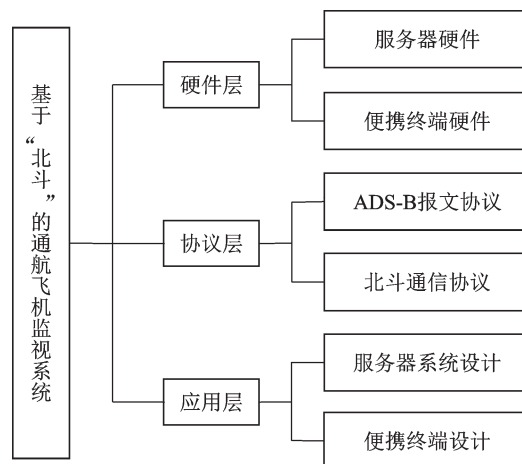


图1 系统结构框图

Fig.1 The block diagram of system design

系统按功能分为3个层面:硬件层、协议层和应用层。硬件层主要实现了服务器与便携终端的开发;协议层实现了“北斗”信息按照ADS-B报文协议格式进行编码的处理以及利用“北斗”通信对通航飞机状态信息的传输;应用层实现系统监视信息的显示与监视终端的设计。具体说明如下:

(1)硬件层:包括服务器系统平台、数据库、ADS-B数据采集节点、机载终端系统等。

(2)协议层:包括ADS-B报文协议编解码、“北斗”定位信息编码、ADS-B报文信息、“北斗”短报文通信协议以及通航飞机监视信息的编解码等。

(3)应用层:包括服务器系统端和机载系统端,一方面对ADS-B及“北斗”通信链路数据接收、处理及显示;另一方面对机载终端的“北斗”导航定位数据的ADS-B报文发送以及“北斗”通信信息的传输。

## 2 系统报文协议

系统报文协议包括ADS-B报文协议与“北斗”通信协议,对两种报文协议进行研究,设计基于北斗定位数据的ADS-B链路及“北斗”通信的通航飞机飞行态势监视数据包。

### 2.1 ADS-B报文协议

ADS-B报文的长度共112位,是按位进行格式设计的结构。表1为部分1090ES的报文结构定义,ADS-B的报文基本结构包含在其中<sup>[16]</sup>,89~112位为

表 1 部分 1090ES 报文的基本结构

**Tab.1 The basic structure of some 1090ES messages**

Bits 1~5	Bits 6~8	Bits 9~32	Bits 33~88
DF=17	CA	AA ICAO 地址	ADS-B ME 字段
	CF=0	AA ICAO 地址	ADS-B ME 字段
	CF=1	AA 非 ICAO 地址	ADS-B ME 字段
	CF=2~3	AA	TIS-B ME 字段
DF=18	CF=4	TIS-B 和 ADS-R 管理报文	
	CF=5	AA 非 ICAO 地址	TIS-B ME 字段
	CF=6	ADS-R	
	CF=7	预留	
DF=19	AF=0	AA ICAO 地址	ADS-B ME 字段

PI 字段。本系统主要以 DF=17 一类报文为主。

表 1 中,在 ADS-B ME 字段报文中,包含一个 ADS-B 的业务报文,具体为时间、位置、速度等信息。“北斗”导航定位数据包括时间、位置、速度等信息。因此,可将 ADS-B 报文格式中的 ME 字段部分数据替换为“北斗”导航定位数据,生成 ADS-B 报文数据,可通过 ADS-B 链路进行发送。

2.2 “北斗”通信协议

“北斗”通信协议数据格式包括位置时间信息,如表 2 所示。

表 2 “北斗”通信协议数据格式

**Tab.2 The protocol format of “BeiDou” communication**

序号	信息单元名称	字节数
1	帧头	5
2	位置信息	10
3	时间信息	6
4	预留	5
5	CRC 校验	2
总计		28

表 2 中,位置信息长度为 10 字节,用于提供系统的位置信息。“北斗”通信数据格式包含时间、位置等信息,没有飞机 ICAO 号、高度等信息。而 ADS-B 报文中的 AA ICAO 字段包含飞机 ICAO 号,ME 字段包含高度数据,因此,需将部分 ADS-B 报文数据融入到“北斗”报文中,通过“北斗”卫星链路发送,频率为 1 min/次。

ADS-B 报文的部分数据,如飞机 ICAO 号、高度、时间、位置等监视信息较为重要。在“北斗”短报文位置数据格式不变的情况下,可将飞机的 ICAO 号、高度信息按照“北斗”短报文中的速度格式融入到报文中,生成新的 CRC 校验值,实现飞机 ICAO 号、高度的融合。原有速度格式中的速度信息,可通过时间间隔为 1 min 获取到的经纬度信息,经过坐标系转换,得出具体距离信息,从而推算

出速度信息<sup>[17]</sup>。

3 便携式终端系统设计

终端系统采用 STM32 作为核心处理器,采用“北斗”卫星导航系统提供定位数据源,将获取的“北斗”导航定位信息进行 ADS-B 报文编码,利用“北斗”作为卫星链路,将获取的飞行状态信息编码后发送到监视中心系统平台。

3.1 终端系统硬件设计

考虑机载终端的实际要求,设计中采用嵌入式系统为处理器。系统硬件结构如图 2 所示。

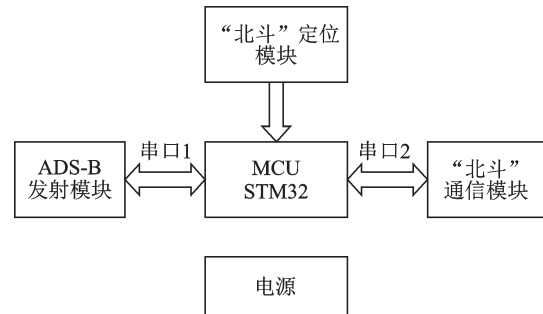


图 2 系统硬件结构图

Fig.2 The structure diagram of system hardware

使用 STM32 作为核心处理器,将接收到的“北斗”导航定位信息发送给 ADS-B 发射机和“北斗”通信模块。

3.2 终端系统软件设计

终端系统的软件功能包括:获取监视数据、报文编码和串口通信。监视数据通过“北斗”模块与处理器进行通信获取,微控制器采用基于 ARM 架构的 STM32 处理器。系统的软件流程如图 3 所示。

由图 3 可知,首先,系统初始化,获取“北斗”定

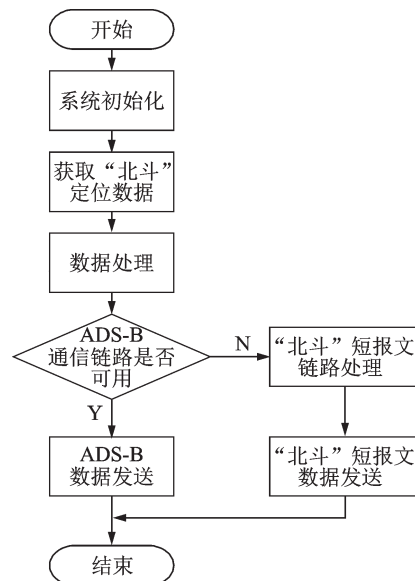


图 3 终端系统的软件流程图

Fig.3 The software flow chart of terminal system

位数据,利用 CPR 编码生成 ADS-B 标准报文。其次,若 ADS-B 信号可用,则通过 ADS-B 通信链路进行数据发送,反之,通过“北斗”卫星链路进行数据发送。若报文发送正确,监视中心将显示相应的监视目标,否则,报文编码错误,或出现通信失败。

### 4 系统功能测试与结果分析

为了验证文中研究的通航飞机监视技术和终端系统的功能,选用实验室研发的多网融合的监视系统作为数据接收测试平台,对机载终端发送的报文等功能进行测试验证。通过运行监视平台,查看数据库以及上位机目标数据等信息。

#### 4.1 ADS-B 监视飞行测试

利用基于“北斗”定位源的机载终端及服务器监视系统对 ADS-B 监视方法进行测试。实验中利用辽宁通用航空研究院研制的锐翔电动飞机

RX1E 搭载机载终端,通过地面站的多网融合监视系统在服务器对 ADS-B 报文数据进行接收、解析和显示等处理,测试结果如图 4 所示。



图 4 机载 ADS-B 监视实验测试结果

Fig.4 The test result of airborne ADS-B surveillance

从图 4 结果可以看出,服务器监视系统成功接收到机载 ADS-B 终端发送的 ADS-B 报文,并对报文进行了正确解析。通过通航飞机飞行实验所获得的部分 ADS-B 监视数据结果如图 5 所示。

icao	flag	node	time	longitude	latitude	altitude	groundspeed
7870604	1	000005	2018-09-26 13:58:10	123.3943516623	41.9243420621	312.36	12.89656156485461
7870604	1	000005	2018-09-26 13:58:11	123.4073485062	41.9321973675	312.36	12.89624561584954
7870604	1	000005	2018-09-26 13:58:12	123.4074987099	41.9318142156	312.36	12.89664656456562
7870604	1	000005	2018-09-26 13:58:13	123.4075845406	41.9310957997	312.36	12.89651545612364
7870604	1	000005	2018-09-26 13:58:14	123.4079351591	41.9307947495	312.36	12.89615654516545
7870604	1	000005	2018-09-26 13:58:15	123.4082570242	41.9304435193	312.36	12.89654846164566
7870604	1	000005	2018-09-26 13:58:16	123.4086861776	41.9302679035	312.36	12.89635648495126
7870604	1	000005	2018-09-26 13:58:17	123.4090295004	41.9301401826	312.36	12.89615145213135

图 5 ADS-B 监视数据结果

Fig.5 The data result of ADS-B surveillance

从图 5 中可以看出,显示的飞行监视信息包括:通航飞机 ICAO 号 7870604、便携终端编号 000005、时间、经度、纬度、高度及速度等。

#### 4.2 “北斗”通信实验测试

由于单站 ADS-B 作用范围有限,为了验证

在通过 ADS-B 不能对通航飞机进行监视情况系统其他链路的通信性能,实验中利用“北斗”卫星传输通航飞机飞行态势监视数据包,地面站监视中心接收到的北斗通信部分数据如图 6 所示。

icao	flag	node	time	longitude	latitude	altitude	groundspeed
7870604	1	000005	2018-09-26 16:37:13	123.4095444845	41.9300284266	312.36	0
7870604	1	000005	2018-09-26 16:38:13	123.4099950956	41.9299326356	312.36	0
7870604	1	000005	2018-09-26 16:39:13	123.4104027914	41.9299166705	312.36	0
7870604	1	000005	2018-09-26 16:40:13	123.4109606908	41.9300284266	312.36	0
7870604	1	000005	2018-09-26 16:41:13	123.4112610983	41.9301721129	312.36	0

图 6 “北斗”通信监视数据测试结果

Fig.6 The test result of “BeiDou” communication

从图 6 的结果可知,“北斗”卫星可以对通航飞机飞行状态信息进行监视,时间间隔相对 ADS-B 较长,为 1 min。

对“北斗”通信成功率测试的结果如图 7 所示。



图 7 “北斗”通信成功率统计结果

Fig.7 The success rate of “BeiDou” communication

从图 7 中测试结果可以看出,发送申请 1 910 次,成功接收 1 859 次,北斗通信成功率为 97.33%,这与系统实验所处地理位置以及天线朝向有关。

#### 4.3 系统整体联合测试

在上述测试的基础上,对基于“北斗”的低空空域通航飞机导航监视系统进行整体测试,其测试结果如图 8 所示。

利用辽宁通用航空研究院研制的锐翔电动飞机 RX1E 搭载机载终端实时报告自身位置,为便于在测试中观测,将终端的实时位置用绿色塔状标记

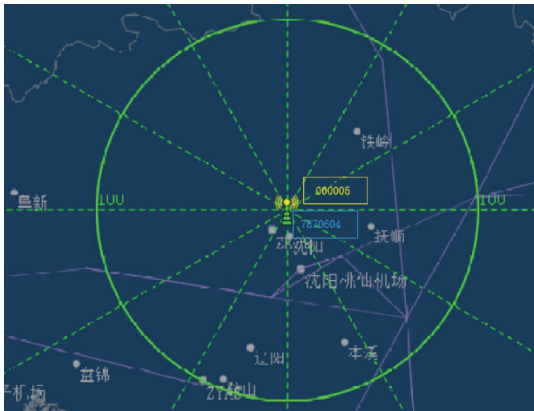


图8 系统整体测试

Fig.8 The test result of overall system

进行标识,其设备编号为000005。测试结果表明:系统整体运行正常、工作稳定。

## 5 结 论

文中针对基于“北斗”的低空空域通航飞机导航监视技术进行了研究,研究了ADS-B和“北斗”卫星链路传输技术,设计了基于“北斗”定位源的机载监视终端系统。利用锐翔电动飞机RX1E搭载机载终端,并与地面监视系统联合测试,实验结果表明:该系统实现了基于“北斗”定位数据的多链路的通航飞行态势监视,弥补了单站ADS-B的不足,保障了对通航飞机飞行态势的无缝监视,为通用航空飞机飞行安全提供了有效的监视方法。

### 参考文献:

- [1] 张军.空域监视技术的新进展及应用[J].航空学报,2011,32(1):1-14.  
ZHANG Jun.New development and application of air-space surveillance technology[J].Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2011,32(1):1-14.
- [2] 李恒,何东林,张益,等.基于多链路通信的通用航空地面监控系统设计[J].电讯技术,2016,56(4):401-407.  
LI Heng, HE Donglin, ZHANG Yi, et al.Design of a ground monitoring and control system for general aviation based on multilink communication[J].Telecommunication Engineering,2016,56(4):401-407.
- [3] 李波,翟书颖,李茹,等.一种采用ADS-B技术的通用航空防撞系统[J].电讯技术,2019,59(1):19-26.  
LI Bo, ZHAI Shuying, LI Ru, et al. A collision avoidance system for general aviation based on ADS-B[J].Telecommunication Engineering,2019,59(1):19-26.
- [4] 齐雁楠,王兴隆,张召悦.基于北斗的ADS-B技术在我国通用航空中的应用[J].航空计算技术,2013,43(5):20-22.  
QI Yannan, WANG Xinglong, ZHANG Zhaoyue. Application of ADS-B technology based in BeiDou in general aviation of china[J].Aeronautical Computing Technique,2013,43(5):20-22.
- [5] 徐亮,曾庆喜,唐琳琳,等.基于平均相关算法的北斗B2信号快速捕获[J].南京航空航天大学学报,2015,47(4):588-594.  
XU Liang, ZENG Qingxi, TANG Linlin, et al.Fast acquisition for BeiDou B2 signal based on averaging correlation[J].Journal of Nanjing University of Aeronautics& Astronautics,2015,47(4):588-594.
- [6] STROHMEIER M, SCHAFFER M, LENDERS V, et al. Realities and challenges of next gen air traffic management: The case of ADS-B[J].IEEE Communications Magazine,2014,52(5):111-118.
- [7] ZENG Zhigang, DING Yajing, YAN Jun. Transmission of meteorological information to a cockpit and application of ADS-B[J].Meteorological and Environmental Research,2016,7(1):19-22,29.
- [8] ABDULAZIZ A, YARO A S, ADAM A A, et al. Optimum receiver for decoding automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) signals[J].American Journal of Signal Processing,2015,5(2):23-31.
- [9] 李英成,薛艳丽,李西林,等.北斗短报文的无人机飞行监管技术与装备研究[J].测绘科学,2019,44(6):47-51.  
LI Yingcheng, XUE Yanli, LI Xilin, et al.Research on UAV flight supervision technology and equipment based on BeiDou short message[J].Science of Surveying and Mapping,2019,44(6):47-51.
- [10] 陶德桂,刘关心.基于北斗短报文通信的无人机安控系统[J].电光与控制,2018,25(6):98-101.  
TAO Degui, LIU Guanxin. UAV safety control system based on BeiDou short message communication[J].Electronics Optics & Control,2018,25(6):98-101.
- [11] 张洋溢,王忠.基于ARM的GPS/GPRS多功能手持终端的设计与实现[J].计算机测量与控制,2011,19(12):3050-3053.  
ZHANG Yangyi, WANG Zhong. Design and implementation of an embedded GPS/GPRS multi-function handheld terminal based on linux[J].Computer Measurement& Control,2011,19(12):3050-3053.
- [12] 金开研,朱衍波,许有臣.基于ADS-B的航空器测高系统误差评估方法[J].北京航空航天大学学报,2017,43(4):685-693.  
JIN Kaiyan, ZHU Yanbo, XU Youchen. Error evaluation method of aircraft altimetry system based on ADS-B[J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2017,43(4):685-693.
- [13] 倪育德,马宇申,刘萍.基于ADS-B的飞机冲突探测[J].中国民航大学学报,2014,32(5):31-35.

- NI Yude, MA Yushen, LIU Ping. Aircraft conflict detection based on ADS-B[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2014, 32(5): 31-35.
- [14] 申金星. 基于 ADS-B 多地面站的实时监视系统[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
- SHEN Jinxing. Real time surveillance system based on ADS-B multi ground station[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017.
- [15] 钟伦珑, 夏冬, 卢晓光, 等. ADS-B 接收机自动测试系统的设计与实现[J]. 电讯技术, 2018, 58(12): 1394-1401.
- ZHONG Lunlong, XIA Dong, LU Xiaoguang, et al. Design and implementation of an automatic test system for ADS-B receivers[J]. Telecommunication Engineering, 2018, 58(12): 1394-1401.
- [16] 王尔申, 翟秋刚, 李玉峰, 等. 应用 Qt 的 ADS-B 报文解析研究与实现[J]. 电光与控制, 2018, 25(4): 69-73.
- WANG Ershen, ZHAI Qiugang, LI Yufeng, et al. Qt based ADS-B message parsing: Research and implementation[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(4): 69-73.
- [17] 黎珍惜, 黎家勋. 基于经纬度快速计算两点间距离及测量误差[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(11): 235-237.
- LI Zhenxi, LI Jiaxun. Quickly calculate the distance between two points and measurement error based on latitude and longitude[J]. Geomatics & Space Information Technology, 2013, 36(11): 235-237.

(编辑: 孙静)