

中國民航大學

碩士學位論文



星基 ADS-B 系統監視性能 可用性評估

研究生姓名：于克非

導師姓名：趙巍飛 教授

2018 年 5 月 18 日

分类号： _____ 密 级： 公开
UDC : _____ 学 号： 1503005

中国民航大学

硕 士 学 位 论 文

星基 ADS-B 系统监视性能 可用性评估

研究生姓名： 于克非

导师姓名： 赵巍飞 教授

申请学位类别： 工学硕士 学科专业名称： 交通信息工程及控制

所在院系： 空中交通管理学院 论文答辩日期： 2018 年 5 月 18 日

2018 年 5 月 18 日

Availability Evaluation of Surveillance Performance on Space-Based ADS-B

A Dissertation Submitted to
Civil Aviation University of China
For the Academic Degree of Master of Science

BY
YU Ke-fei

Supervised by
Prof. ZHAO Yi-fei

College of Air Traffic Control
Civil Aviation University of China

May 2018

中国民航大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国民航大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名： 张非 日期： 2018.5.23

中国民航大学学位论文使用授权声明

中国民航大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权中国民航大学研究生部办理。

研究生签名： 张非 导师签名： 张非 日期： 2018.5.23

摘要

广播式自动相关监视(ADS-B)作为国际民航组织确定的未来主要监视系统,将通信、导航、监视以及接收站搭建等先进技术相结合。ADS-B 通过地面接收站获取航空器相关信息,为弥补地面站在沙漠、海洋和极地等偏远地区建设成本高、技术复杂的不足,可在卫星上搭建 ADS-B 接收机实现对全球空中交通的监测与管制。2015 年 9 月,由国防科技大学自主研发的“天拓三号”微纳卫星发射成功,该卫星搭载一台 ADS-B 接收机,可以持续接收航空器发送的报文信息。

为评估星基 ADS-B 系统的监视性能指标,获取卫星接收的 ADS-B 报文数据,解析数据并整理报文信息。分别对所需监视性能的三个评价指标:更新时间间隔、数据完好性和数据准确性进行分析。最后采用接收机自主完好性监测(RAIM)算法,提取卫星历书文件和报文的接收时间、经纬度和高度信息,通过 MATLAB 软件仿真计算报文位置信息的可见星数目和水平完好性限制(HPL)数值,与报文提供的导航完整度类别信息(NIC)相比较,完成星基 ADS-B 系统的可用性评估。

将星基 ADS-B 监视性能的评估结果与所需监视性能要求相对比,得到的结论有:日平均接收报文数量较少,报文丢包率较高,报文信息的更新时间间隔整体偏高,监视数据的完好性和准确性比较好。最终,星基 ADS-B 系统监视性能的可用性达 74.52%,还未能满足所需监视性能可用性 99.9%的指标要求。

关键词: 星基 ADS-B; 报文解析; 所需监视性能; 导航完整度类别信息; 接收机自主完好性监测; 可用性评估

Abstract

As the future major surveillance system determined by the International Civil Aviation Organization. Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) combines advanced technologies such as navigation, communication, surveillance, airborne equipment and ground reception station. ADS-B obtains aircraft related information through the ground reception station. Ground station has high cost, complexity technique and it is hard to build in deserts, polar, seas, and other regions. In order to make up for these deficiencies, ADS-B receiver can be built on satellite to monitor and control the global air traffic. In 2015, the TT-3 micro satellite designed by National University of Defense Technology has been launched successfully. This satellite carried ADS-B receiver that can receive the message of aircraft in real time.

For this study, a dataset of space-based ADS-B messages was analyzed and arranged. Next, the three evaluation indexes of Required Surveillance Performance (RSP) had been analyzed include Update Interval, Data Integrity and Data Accuracy. Finally, the availability of Space-Based ADS-B was evaluated. According to the receipt time and position messages, the value of the predict Horizontal Protection Limit (HPL) is calculated by using the Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) algorithm through MATLAB simulation to compare with the requirement of Navigation Integrity Category (NIC).

Compared with the required monitoring performance requirements. The results show that the number of daily average receiving messages is less, the packet loss rate is higher. Update interval of the message is higher, the integrity and accuracy of data are better. Finally, the availability of Space-Based ADS-B is 74.52%. This system hasn't met the 99.9% requirement of the required monitoring performance availability.

Key words: Space-Based ADS-B; Formation Analysis; Required system performance; Navigation Integrity Category; Receiver Autonomous Integrity Monitoring; Availability Analysis

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 国外.....	2
1.2.2 国内.....	4
1.2.3 小结.....	5
1.3 主要工作和论文结构.....	5
第二章 星基 ADS-B 系统.....	8
2.1 ADS-B 系统.....	8
2.1.1 工作原理及应用.....	8
2.1.2 现有系统的不足.....	9
2.2 星基 ADS-B 系统简述.....	9
2.2.1 系统优势与技术挑战.....	9
2.2.2 全球星基 ADS-B 系统搭建情况.....	10
2.3 本章小结.....	12
第三章 监视性能评估原理及星基 ADS-B 系统评价指标.....	13
3.1 所需监视性能(RSP).....	13
3.2 星基 ADS-B 监视性能评价指标.....	15
3.2.1 更新时间间隔计算方法.....	15
3.2.2 数据完好性评估方法.....	17
3.2.3 数据准确性评估方法.....	19
3.3 系统可用性评估方法探究.....	20
3.3.1 导航数据源的可用性.....	21
3.3.2 接收机自主完好性监测(RAIM)算法.....	21

3.3.3 RAIM 算法的可用性判断	22
3.3.4 星基 ADS-B 监视性能可用性的定义及评估方法	23
3.4 本章小结	24
第四章 星基 ADS-B 报文解析与整理	25
4.1 TT3 星基 ADS-B 报文格式说明	25
4.2 TT3 星基 ADS-B 报文解析规则	26
4.2.1 报文字段域描述	26
4.2.2 空中位置消息解析	27
4.3 报文解析与整理	29
4.3.1 整理步骤	29
4.3.3 接收数量统计	31
4.4 本章小结	33
第五章 星基 ADS-B 监视性能可用性评估	34
5.1 系统评估总体架构	34
5.2 监视性能评价指标评估	35
5.2.1 更新时间间隔计算	35
5.2.2 数据完好性评估	38
5.2.3 数据准确性评估	39
5.3 系统可用性评估	43
5.3.1 卫星历书数据提取	44
5.3.2 可见星数目与 HPL 数值计算	45
5.3.3 仿真结果分析	48
5.4 本章小结	52
第六章 总结与展望	53
致谢	55
参考文献	56
作者简介	61

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

“十二五”以来,我国民航业快速发展,安全水平在世界保持前列。2016年,我国航班平均客座率为82.7%,平均载运率为72.8%,飞机日利用率可达9.6小时^[1]。我国航班主要包括国内、国际、外航及飞越航班,图1-1统计了我国近几年各航班量的变化趋势,可以看出,我国航班量逐年递增,变化显著,2016年已经超过496万架次。



图 1-1 2012 至 2016 年度各类航班量

目前,我国正处于“十三五”发展规划阶段,由于国内各航空公司的规模在不断扩大,航线航班迅速增加,各个运行控制部门对航空器实时监控能力的需求日益提高。广播式自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)综合了通信、导航、监视以及接收站搭建等先进技术,相比于传统雷达监视,获取数据速度快,精度高,能够实时地接收航空器各类信息^[2]。

随着可用空域的逐步扩充,航线稀疏的大洋上空以及非航线区域将出现更多的航空器。然而地面 ADS-B 接收站监视范围受限,在非洲、南美洲、东南亚、北极点和海洋等区域建设成本高、技术复杂,有将近 90%的地区无法覆盖。MH370 事件的发生已

然显露出对跨洋航班实时监视的重要性,采取星基 ADS-B 系统对航空器进行监视是未来的必然趋势,在卫星上搭建 ADS-B 接收机,通过卫星监测全球的空中交通,可以真正实现全球范围的实时监控。

1.1.2 研究意义

卫星系统覆盖面广,可以建设成由 50-60 颗低轨卫星组成的星座监视网络并实时接收全球范围内的应答机广播信息,保障航空器安全。作为近几年刚发展的新技术,美国、英国、德国等国家相继展开了星基 ADS-B 系统的研发工作,我国的部分科研机构与高等院校也开始了对基于微小卫星 ADS-B 的研究并完成初步实验。2016 年,民航局就“两会”期间郭现生等 4 名全国人大代表联名提出的“关于构建 ADS-B+遥感技术一体化的微小卫星星座来完善航空安全监视的提议”开展规划,表示将开始星基 ADS-B 系统的研究与实施^[3]。

星基 ADS-B 系统的监视性能表示在一定的数据完好性和更新时间间隔内,卫星接收 ADS-B 报文信息的能力。监视性能中的可用性指预期操作开始时,系统能够实现其所需功能的能力。星基 ADS-B 系统可以监控到海洋、极地以及大量偏远地区的航空器航行信息,利用低轨道卫星接收报文可以实现全球范围内的航空目标实时或实时目标监视、空中流量管理和航线优化,能够有效提高航空器飞行效率和安全系数。

就当前的技术手段和研究进展来说,部分关键卫星技术还难以实现,为验证该套系统的可用性,采集实验卫星接收的数据,寻找适于星基 ADS-B 系统的监视性能评价指标并确立相应评估方法将具有十分重要的意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外

1. 星基 ADS-B 研究进展

自从 1991 年 ADS-B 系统在瑞典试验成功以来,国际民航组织对该项技术的发展前景越发重视并确定其为新航行系统的主要研究方向,此后,欧美和澳大利亚等国家相继开展了对 ADS-B 的科研工作,并颁布了各自的 ADS-B 实施规划,通过实施与评估都取得了不错的成效^[2]。

2008 年,欧空局首先设想用低轨道卫星来取代 ADS-B 地面站接收 S 模式 1090MHz 的报文数据链,通过一系列的仿真与试验,“星基 ADS-B”(ADS-B Over Satellite, AOS)的概念被首次提出。

2011 年, Parkinson A 就星基 ADS-B 系统的可行性和优越性进行研究,指出可以使用卫星来接收海洋空域和偏远地区飞机的位置信息,再将数据传输到地面站。较于 ADS-C 能以更快的速度更新信息,便于管制员操作^[4]。

2012 年,法国泰雷兹阿莱尼亚宇航公司开启“基于轨道卫星有效载荷的 ADS-B 系统对空中交通的监视”项目研究。该项目旨在展示特定宇宙环境条件下该项技术的功能,验证 ADS-B 机载设备的兼容性和链路预算。Blomenhofer H 等人就星基 ADS-B 系统的优势与缺陷,提出采用星基地基 ADS-B 相结合的方式监视空中交通,其难点在于如何实现系统间的无缝切换^[5]。

2013 年, Bettray A 等人分别对低轨道卫星 ADS-B 接收机射频前端的多波束天线的规格、设计和结构进行说明。多波束天线优势明显,波束窄增益高,作用距离远,覆盖空域广,是改进卫星通信系统性能的一项关键技术^[6]。

2014 年, Werner K 等人针对欧空局的首例低轨道卫星基 ADS-B 系统,介绍了 Proba-V 微卫星 ADS-B 接收机和天线的设计原理,分别从总体特征、链路预算、接收识别飞机位置、天线覆盖范围、性能参数设计及评估五个方面分析该系统的监视性能,其结果表明星基 ADS-B 系统技术上可行^[7]。

2015 年, Knudsen B G 等人阐述了全球空中交通感知与星载监视优化的任务,并对星基 ADS-B 的高敏感信号接收机进行说明,详细介绍了接收机解码器的设计思路。结果表明星基 ADS-B 信号可以实现太空到地面的信息传输,能够对跨洋航班进行实时追踪^[8]。

2017 年, Garcia M A 等人针对 Aireon 公司 1 月 14 日发射的 10 颗首批 NEXT 卫星,在卫星发射后大约 2 周,对接收到的 ADS-B 报文进行分析研究。经测试,接收数据量超过预期结果,报文信息的编码效果与 ADS-B 地面站相吻合^[9]。

2. ADS-B 数据分析情况

美国一直在积极推动 ADS-B 的发展及应用,其规划期遍布 07 年到 25 年近 20 年时间,分为四个阶段依次实施,最终淘汰交通情报广播服务,增加航空器空对空应用,旨在为未来的空中交通提供更加完善的监视服务^[2]。

2015 年,美国 Exelis 公司研究人员将 Hadoop 分布式存储系统和 ADS-B 数据分析相结合,使得 ADS-B 数据存储量 and 处理能力大大提高,可同时实现 ADS-B 的报文解析、数据存储和航迹显示等功能^[10]。

欧洲作为 ADS-B 体系的起源地,很早便开展了 ADS-B 数据链的评估工作,目的在于建立包含二次雷达、ADS-B 和多点定位系统的综合监视体系^[2]。

2014 年,Strohmeier M 等人对欧洲 OpenSky 系统的 ADS-B 接收情况进行统计。OpenSky 是搭建在欧洲中部的数个 ADS-B 接收机所组成的地面监视网络,覆盖面积达 72 万平方千米,约占欧洲空域的 30%,可提供大量 ADS-B 数据供研究人员分析^[11]。

2015 年,Ali B S 等人用 GPS 的定位方法来评估 ADS-B 数据的水平容限,结果表明,英国伦敦空域 66.7%的航空器水平位置误差小于 150 米,延迟时间不到一秒,系统可用性为 81.78%,并对数据异常的原因进行了总结^[12]。

2016 年,Sun J 等人针对日益增长的 ADS-B 接收数据,通过机器学习和模糊控制算法识别原始报文数据并进行分类,旨在寻找处理大量航迹数据的方法,比较 K 均值聚类算法与 DBSCAN 算法的分析结果,为 ADS-B 的数据质量评估提供算法基础^[13]。

2017 年,在第 12 届欧美空中交通管理研究与发展研讨会上,Verbraak 等人系统地对大量的 ADS-B 原始报文数据进行整理分类,分别从时间延迟、准确性、更新时间间隔和报文完好性几方面进行分析,证明 ADS-B 尽管存在地面站收发、机载设备应答等方面的问题,未来仍可以作为航空器的主要监视手段^[14]。

1.2.2 国内

2015 年 9 月 20 日,由国防科技大学研发的“天拓三号”微纳卫星发射入轨,该卫星搭载了一架 ADS-B 接收机,可以接收飞机发送的报文,其中包含接收时间、飞机地址码、航班号、空中位置和空中速度等信息^[15]。同年 9 月 25 日,我国首批立方体纳级卫星“上科大二号”发射升空,其中包含三颗立方体卫星,分别载有船舶自动识别接收机、ADS-B 接收机和观测相机。三颗卫星可以组成小型星间链路网络,实现地面观测和信息采集等功能。

我国近几年来也陆续开展了对 ADS-B 数据质量的评估工作,2010 年,刘计民、张兆宁分别介绍了所需通信、导航、监视性能的概念和国内外的研究进展,其中,所需监视性能可作为星基 ADS-B 系统监视性能的评价指标^[16]。

2011 年, 张军、刘伟等人将 ADS-B 报文数据与雷达和 GPS 数据相比较, 分别对 ADS-B 的报文完好性和数据精确性进行评估, 结果表明, ADS-B 报文完好性为 95%, 数据精度最高可达 33m, 整体优于雷达系统定位精度^[17]。倪育德、吕宗平等人给出 ADS-B 导航数据源可用性的评估方法, 对 RAIM 算法的原理进行阐述, 通过软件仿真 HPL、HDOP 数值并与报文指标作比较分析^[18]。

2012 年, 赵焱飞、王晨等人通过计算 ADS-B 航迹数据与航路中心线的水平偏差距离, 寻找 ADS-B 航迹数据误差分布规律, 结果表明 ADS-B 数据的水平误差服从正态分布规律^[19]。

2013 年, 钟建华、刘卫东等人开发了一个 ADS-B 数据质量分析软件, 该软件可以解析报文, 分别计算报文数据的完好率、漏点率和跳点率, 并且能通过运行窗口显示航空器的航行轨迹^[20]。

2015 年, 沈笑云、唐鹏等人根据 ADS-B 报文中的位置导航不确定类别信息, 统计了 ADS-B 航迹点与航路中心线的偏差距离, 并计算出实际误差分布区间, 采用加权平均方法实现 ADS-B 数据与雷达数据的航迹融合^[21]。

1.2.3 小结

虽然星基 ADS-B 的概念刚提出不久, 但已经引起了各国的重视。目前, 美国、英国、澳大利亚和中国等国家相继开展了星基 ADS-B 系统的研究, 并通过了小型 ADS-B 接收卫星来采集数据。目前, 各国对星基 ADS-B 系统的研究尚在起步阶段, 对其监视性能各个指标的分析方法还不明确, 而地基 ADS-B 系统的研究已较为成熟, 已经拥有了一套较为完善的监视性能评估体系。本文参考地基 ADS-B 系统数据分析的方法, 研究重点在于寻找适于星基 ADS-B 系统的监视性能评价指标, 对卫星采集的数据进行评估分析。与地基 ADS-B 系统数据分析方法类似, 可以从星基 ADS-B 报文中提取位置导航完整度类别信息统计数据完好性, 提取接收时间计算报文更新时间间隔, 提取位置信息分析数据准确性, 并综合分析系统监视性能的可用性。

1.3 主要工作和论文结构

星基 ADS-B 系统不同于地面系统, 有别于固定的地面站, 卫星是在移动过程中接

收 ADS-B 报文信息, 伴随的不确定因素也会更多, 那么, 星基 ADS-B 系统的监视性能评估方法也需重新建立。本文采集国防科学技术大学“天拓三号”微纳卫星接收并向地面传送的 ADS-B 报文, 解析报文并提取航空器位置、高度、速度和航班号等信息, 研究航空所需监视性能评估原理方法, 分别对报文数据的更新时间间隔、完好性和准确性统计分析。最后, 通过接收机自主完好性监测算法计算各个时刻航迹数据的水平完好性限制, 并与报文提供的水平保护容限作比较, 评估该系统的可用性。星基 ADS-B 系统监视性能可用性评估的技术路线如图 1-2 所示。

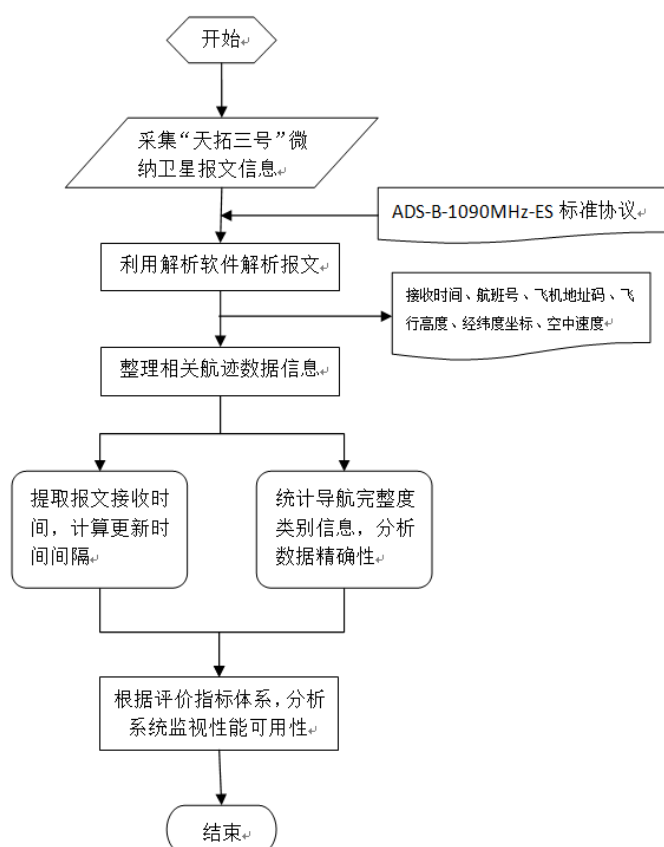


图 1-2 星基 ADS-B 系统监视性能可用性评估技术路线

本文章节结构安排如下:

第一章: 说明星基 ADS-B 系统的研究背景及意义, 分别从卫星系统研究进展和 ADS-B 数据分析情况两方面来介绍国内外的研究现状并进行总结。

第二章: 简单介绍 ADS-B 系统的工作原理并提出地面系统的不足, 从而引出星基 ADS-B 的概念, 说明系统优势和目前存在的技术挑战, 并简单介绍一下全球星基 ADS-B 系统的搭建情况。

第三章: 综合国内外 ADS-B 系统评价指标, 探讨卫星系统监视性能评估的原理方

法，对报文数据的更新时间间隔、完好性和准确性的分析方法加以说明，并提出卫星系统可用性的评估方法。

第四章：说明“天拓三号”卫星下传的报文格式和解析规则，并根据规则解码，整理数据并分类统计报文接收数量。

第五章：建立星基 ADS-B 系统评估的总体架构，分别对各方面指标进行评估，使用 MATLAB 软件仿真并验证系统的可用性。

第六章：总结与展望，总结本文的主要工作，提出创新点，并指出不足之处，对未来研究方向进行展望。

第二章 星基 ADS-B 系统

ADS-B 的定义为采用数据链广播的模式,在指定的时间间隔内自动传递航空器的空中位置、空中速度、航班号等信息,并可为任意空地用户申请使用^[22]。而星基 ADS-B 与现有体系的主要区别在于接收方由地面转移到了卫星,为了区分两者的概念,本章将对 ADS-B 系统的工作原理及主要应用作简单介绍,并阐述卫星系统的优势所在,最后对全球各卫星系统的相关参数加以说明。

2.1 ADS-B 系统

2.1.1 工作原理及应用

ADS-B 的工作原理是利用航空器上的机载设备接收全球定位系统(Global Position System, GPS)信号,然后将获取的位置、速度、飞机地址码和相关状态信息自动地以广播的形式向外发出,并随时接收其他航空器和地面站的广播信息,最终形成空-空、空-地双向传输的数据链^[23]。地面站对接收到的 ADS-B 报文进行解码分析,通过计算机显示航行信息,空管人员随时可以掌握航空器的位置和高度信息,各个航空器之间也可以依靠 ADS-B 系统相互监视来实现防撞功能。

ADS-B 的主要应用包括空-空监视,可以保证各个航空器满足安全间隔,提高航空器防撞能力并提供座舱内交通信息显示(Cockpit Displays of Traffic Information, CDTI);地-空监视,可以实现地面对航空器在航路和终端区的监控;地-地监视,即场面监视,可以防止地面航空器相撞,同时避免发生跑道侵入。

ADS-B 性能依赖全球导航卫星系统,是一项弥补空中交通地面雷达管制不足的重要技术,在单一欧洲空管系统研究项目(Single European Sky ATM Research, SESAR)和美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)的下一代航空运输系统计划中,ADS-B 系统将作为空中交通管制的重要构成,并在 2020 年前为世界各地的航空公司带来巨大收益^[24]。我国民用航空局 ADS-B 实施规划中也计划将航路航线、终端区和机场等区域全部使用以 ADS-B 为主的全新监视技术作为空中交通主要的监视手段,构建完善的 ADS-B 运行保障与信息服务体系^[2]。

2.1.2 现有系统的不足

在世界范围内的大部分海洋区域，以及非洲、南美洲、东南亚和北极点等大陆区域，地面雷达和 ADS-B 地面站的构建过于复杂，不符合成本效益，这些区域被称作无雷达空域(non-radar airspace, NRA)。以地面监视服务目前的技术手段和预算，对这些偏远地区的全面监视还难以实现，因此，目前空中交通监视还是主要部署在地面雷达和 ADS-B 地面站方便建设的区域^[5]。

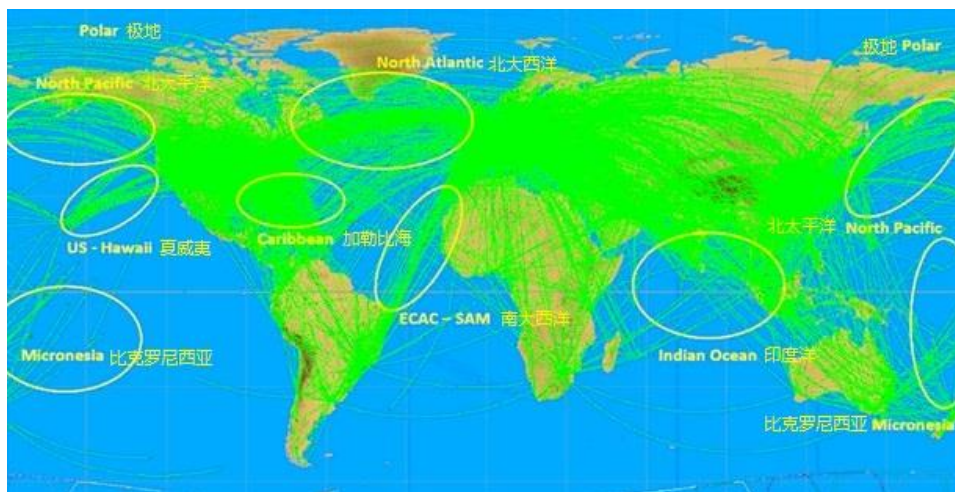


图 2-1 世界航线分布与难以监视区域

如图 2-1 所示，在全球主要航线中，众多跨洋航线和北极航线还做不到全面实时监控，为了解决这个限制，一个潜在的解决方法是通过卫星来接收 ADS-B 报文数据，通过卫星在轨道不停移动可以接收包括海洋、沙漠和极地等偏远地区的航空器航行信息，从而实现真正的全球空中交通监视服务。

2.2 星基 ADS-B 系统简述

2.2.1 系统优势与技术挑战

星基 ADS-B 系统将高灵敏度的 ADS-B 接收机安装在低轨道卫星上，通过卫星采集航空器发送的广播信息，接收 S 模式、1090MHz 数据链，实时传输到地面站并补充到空管系统当中^[25]。

星基 ADS-B 通过接收机位置的改变，航空器广播信息接收范围从固定的一点转换成可动的状态。依靠卫星到地面的大范围覆盖面积，可以轻松实现对偏远地区航空器

的位置监测，安全性提高，并且能够更加有效地利用空域^[4]。卫星在固有轨道面上移动，不受特殊地形或海洋区域的约束，可对监视过的航空器航行信息进行存储及回放，更好地避免了危机情况的发生^[26]。

卫星系统虽然优势明显，由于诸多关键技术难以实现，仍存在很多技术挑战^[27]。比如航空器高度密集区域接收的信息过多，航空器机载设备尚没有针对卫星系统做出相应调整，发射信号功率小，灵敏度低，信息丢失率比较高；ADS-B 的报文信息采用随机存储的方式，报文数量过多容易造成信号重叠，难以处理；空对卫星的传播损失明显大于空对地的传播损失，这就需要改变发射天线的辐射模式，通过链路预算分析来评估低轨道高度是否可以接收 ADS-B 广播信号。

2.2.2 全球星基 ADS-B 系统搭建情况

1. PROBA-V

PROBA 是由欧空局支持、比利时牵头研发的一系列小型卫星，卫星本身加上仪器重量仅 160 公斤，规格为 60cm×60cm×80cm。2013 年 4 月，搭载了由德国宇航中心研制的特殊 ADS-B 接收机的 PROBA-V 卫星发射升空，不到两年时间，已经成功接收了来自全球范围内超过 15000 架航空器的报文信息，总共解析出约 25000 万条的空中位置消息^[7]。图 2-2 描绘了 14 年 2 月 11 日卫星的移动轨迹和接收位置信息的情况，红色圆点代表卫星沿轨道移动时探测到的航空器位置。



图 2-2 PROBA-V 卫星接收示意图

PROBA-V 卫星的主要设备包括广角望远镜、射线传感器、光纤连接器、半导体

无线转发器和一架星载 ADS-B 接收机, 卫星轨道高度 780km, 对地覆盖范围约 60 万平方公里。为评估低轨道卫星基 ADS-B 系统的监视性能, 欧空局正在积极对接收数据进行分类汇总, 供相关科研人员分析改进, 有助于推动后续更多太空新技术的研究。

2. 铱星二代

铱星二代系统由美国 Aireon 公司和 Harris 公司合作设计研发, 2017 年, 搭载了 ADS-B 有效载荷的 30 颗铱星二代卫星分别于 1 月 14 日、6 月 25 日和 10 月 9 日陆续发射升空, 运行状态良好。该系统总共包含 66 颗卫星, 轨道高度 780km, 均匀分布于 6 个轨道面, 运行周期 111 分钟。单颗卫星可以监视 3000 架航空器, 适用于任意符合 DO-260 协议标准的机载设备。系统将于 2018 年 9 月全部部署完毕并提供服务, 并计划应用在空中交通管理、航空器搜救和军事等活动^[28]。

3. 全球星二代

全球星二代系统是美国全球星公司同相关 ADS-B 开发公司联合研发的基于卫星的 ADS-B 链路增强系统(ADS-B Link Augmentation System, ALAS)。ALAS 系统共 48 颗卫星, 8 个轨道面, 轨道高度 920km, 同时兼容 1090ES 和 UAT 数据链传输的 ADS-B 机载设备^[29]。2010 年 10 月 19 日, 前 6 颗全球星二代卫星发射升空; 2012 年, 在阿拉斯加州完成 ALAS 系统测试; 2014 年 9 月, 使用 ALAS 系统监视了为期 4 天长达 7000 英里的测试飞行。

4. 上科大二号

上科大二号 STU-2 由中科院上海微小卫星工程中心研制并于 2015 年 9 月 25 日发射升空。9 月 26 日晚, STU-2 接收了约 51665 条报文信息, 至 9 月 28 日晚, 总共接收了来自全球 12463 架航空器的数十万条报文信息。STU-2 既可监视某一时刻某个区域的航空器分布, 也能获取某一架航空器在不同时刻的航行信息。

5. 天拓三号

天拓三号 TT3 由国防科技大学自主设计并研发, 于 2015 年 9 月 20 日发射升空并准确进入运行轨道。TT3 由 6 颗卫星组成, 包括 1 颗主星、1 颗手机卫星和 4 个微小卫星, 进入轨道后, 通过卫星组网实现集群飞行。卫星群沿 524km 低轨道运行, 轨道周期 95 分钟, 对地幅宽约 2000km。TT3 可以实现对全球范围的航空器的实时监控和流量监测, 为优化航线和提高航行效率提供数据基础, 是我国首次开展的卫星载荷在轨实验。本文便是采集 TT3 号卫星接收的 ADS-B 报文数据进行系统评估, 以 2016 年

10 月 20 日的报文数据为例，接收位置点分布情况如图 2-3 所示。

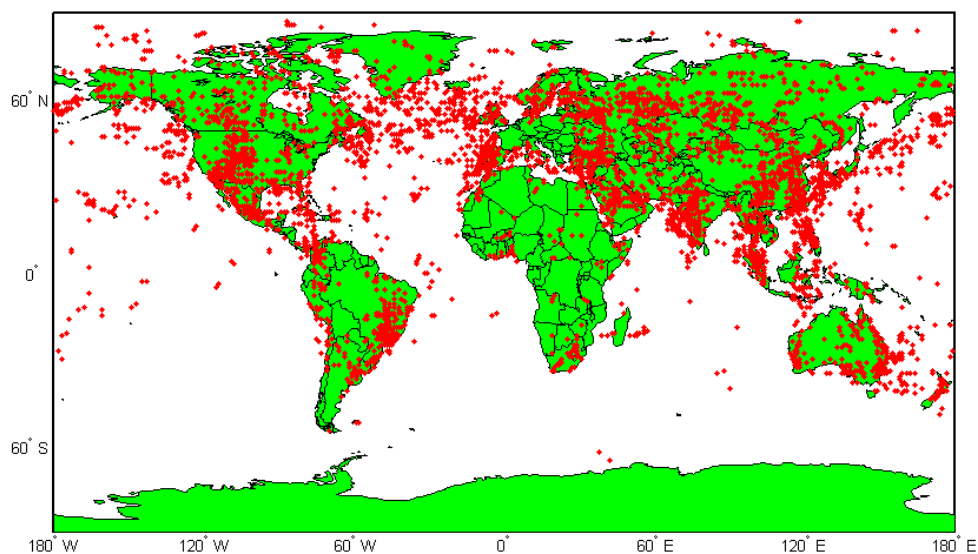


图 2-3 TT3 卫星接收示意图

2.3 本章小结

本章从 ADS-B 的基本概念入手，首先介绍了该系统的工作原理和应用领域，提出现有系统的不足并引出发展星基 ADS-B 系统的必要性。然后阐述星基 ADS-B 的系统优势与现存的技术挑战，最后对全球卫星系统的搭建情况进行说明。

第三章 监视性能评估原理及星基 ADS-B 系统评价指标

为了判断星基 ADS-B 系统是否能应用于未来的航空监视,需要对系统的监视性能进行评估,本章首先提出未来航行系统的规划与要求,接下来对所需监视性能的概念以及其中三个性能指标的定义、公式和要求加以阐述,最后寻找并确立星基 ADS-B 监视系统可用性的评估方法。

3.1 所需监视性能(RSP)

早在 1991 年召开的第 10 次航行会议中,由未来航行系统专门委员会提出并确定了未来航行系统的概念,该系统将长时间满足民用航空运行的需要^[30]。未来航行系统,也就是后来被广泛应用的通信、导航、监视(Communication Navigation Surveillance, CNS)和空中交通管理(Air Traffic Management, ATM)系统,涵盖了一系列以卫星为主导,高端复杂又相互关联的新技术。该系统将卫星应用、数据链通信和计算机互联网技术三者相联合,实质上是通过星基全球 CNS 系统来构建全新的自动化 ATM 系统,也就是说,解决全球 CNS 系统的关键问题是卫星技术的建设与发展。从策略角度来看,未来的发展趋势是地面系统向卫星系统的逐渐过渡,早期阶段技术还不成熟,先将卫星系统作为地面系统的补充;随着卫星系统的大力发展,后期必然会形成以卫星系统为主,地面设备逐渐淘汰的新局面。

为了得到国际认可并满足实行要求,新航行系统需要相应的评价指标来保证各个子系统和程序能够紧密连接,不出差错,并且广泛适用于大部分机载设备和不同的空域用户。由此,国际民航组织提出了基于性能的通信与监视(Performance-Based Communication and Surveillance, PBCS)的基本概念,PBCS 分别规定了总系统的安全性、规范性、有效性、空域资源共享和人为因素等方面的指标要求^[31]。PBCS 中主要包括所需通信性能、所需导航性能和所需监视性能,是评价系统性能的重要参考指标,有助于指导各国各地区制定对应的系统运行标准和实施规划,并计划 2018 年 3 月在全球统一开展实施。

所需监视性能(Required Surveillance Performance, RSP)是 PBCS 中对监视系统提出的性能要求,它表示在一定的数据完好性和时间间隔范围内,获取航空器航行信息的能力^[16]。RSP 标准的建立有助于促进监视技术发展并为用户提供更快、更精准的位置

报告, 通过减少因航空器周围的不确定因素而产生的缓冲区域以达到缩减航路安全间隔的目的。由于 RSP 概念的提出比较晚, 不像通信和导航系统已具备一套完善的评估体系, 所以 RSP 性能参数的划分参照所需导航性能的标准并做出调整, 其中包括更新时间间隔、完整性、准确性、可用性、连续性、覆盖范围等一系列指标^[32], 具体指标要求如表 3.1 所示。

表 3.1 RSP 性能指标要求

参数	特定空域	
	航路(5 海里间隔)	终端区(3 海里间隔)
更新时间间隔/s	12	4.8
延迟时间/s	2.5	2.2
水平位置准确性/nm	$\sigma < 1.0$	$\sigma < 0.2$
水平误差不超过 10%/nm	± 1.4	± 0.28
水平误差不超过 1%/nm	± 2.4	± 0.49
水平误差不超过 0.1%/nm	± 3.3	± 0.65
完整性/%	99.9	99.9
报文失效告警时间/s	20	10
错误报告率/%	0.1	0.1
可用性/%	99.7	99.9
连续性/%	99.9	99.9

监视数据大多以报文的形式呈现, 包括航空器的位置、速度和航行状态等信息, 表中, 更新时间间隔表示连续报告之间的接收时间差; 延迟时间表示每条报告由于不确定因素导致的接收滞后时间; 水平位置准确性表示对航空器位置测量定位时造成的水平误差, 以及不同置信水平所对应的误差分布区间; 完整性表示接收各类别报文的信赖水平, 报文失效后的告警时间和接收错误报告的概率都是影响系统完整性的因素。在 RSP 最新规范中, 完好性表示发送的监视数据中不含检测到的故障的最小概率; 可用性表示预期操作开始时, 系统能够实现其所需功能的能力; 连续性表示规定服务在业务处理开始时即可用的前提下, 规定时间内相关监视数据发送完成的最小比例^[33]。

3.2 星基 ADS-B 监视性能评价指标

在ADS-B-1090MHz-ES标准协议中，单条ADS-B报文共14字节，112bits，被分为5个大的数据块。其中，Bit33~Bit88为ADS-B消息域(ME)，用来记录ADS-B各类消息，总共56个比特位，ME字段根据前5位type字段大小来识别不同的消息类型^[34]，如表3.2所示。

表 3.2 ADS-B 消息类型的确定

Type	ADS-B消息类型
1-4	飞机ID与类型消息
5-8	地表面位置消息
9-18	空中位置消息
19	空中速度消息
29	目标状态与状况
31	飞机运行状况

表中，飞机 ID 与类型消息包含飞机类型和航班号等信息；地表面位置消息和空中位置消息分别记录航空器在地面和空中的经纬度位置信息；空中速度消息记录飞机的速度和航向等信息；目标状态与状况消息和飞机运行状况消息都用于提供航空器在航行中的仪表状态及导航数据源状况，前者在指定时间发布，后者在某些特定情况中作为补充消息发布。

与 RSP 定义类似，星基 ADS-B 系统监视性能可以表示在一定的数据完好性和更新时间间隔内，卫星接收 ADS-B 报文信息的能力。需要寻找相应的监视性能参数指标来评估系统并判断其可用性，根据 TT3 卫星数据的接收情况，本文分别定义卫星监视系统的更新时间间隔、数据完好性和数据准确性，并给出计算公式和指标要求。

3.2.1 更新时间间隔计算方法

更新时间间隔(Update Interval, UI)表示单一 ADS-B 发射装置发送连续报文之间的时间差，包括总体消息时间间隔和单体消息时间间隔(空中位置、空中速度、飞机 ID 与类型等)。更新时间间隔通过采集每架航空器连续报文的接收时间点来计算，计算公

式表示为^[14]:

$$UI_i = t_i - t_{i-1}, i \in 1, 2, \dots, n \quad (3.1)$$

其中, t_i 表示第 i 条报文的接收时间, UI_i 表示第 i 条报文与前一条报文的间隔时间, n 表示接收报文总数。

根据 RTCA DO-181C 中的分配规则, ADS-B 报文传输的最大速率不超过每秒 6.2 个消息, 包含 2 个航空器位置信息、2 个速度信息、0.2 个航班信息和 2 个事件驱动消息^[35], 其中, 事件驱动消息包括目标状态与状况消息和飞机运行状况消息。ADS-B 各类消息相互独立且须满足相应的发射条件, RTCA DO-260B 标准协议中指定的广播频率如表 3.3 所示^[34]。

表 3.3 ADS-B 消息广播频率

ADS-B 消息	广播频率/s		
	地面停留	地面移动	空中
空中位置	无	无	0.4-0.6
地表面位置	4.8-5.2	0.4-0.6	无
飞机 ID 与类型消息	9.8-10.2	4.8-5.2	4.8-5.2
空中速度	无	无	0.4-0.6
目标状态与状况	无	无	1.2-1.3
飞机运行状况	4.8-5.2	2.4-2.6/0.7-0.9	2.4-2.6/0.7-0.9

空中位置消息在航空器处于空中状态时触发发射条件, 相对于先前的空中位置消息, 发射装置应以 0.4-0.6 秒时间间隔进行广播。

地表面消息在航空器处于地面状态时触发发射条件, 发射装置应使用“高”或“低”速率对 ADS-B 地表面消息进行广播。当导航源位置信息在 30 秒内变化不超过 10 米时, 广播速率为“低”速率, 发射装置应以 4.8-5.2 秒时间间隔进行广播。其他情况视为“高”速率, 发射装置应以 0.4-0.6 秒时间间隔进行广播。

飞机 ID 与类型消息在 ADS-B 发射装置广播空中位置消息或“高”速率地表面消息时, 应以 4.8-5.2 秒时间间隔进行广播。当广播“低”速率地表面消息时, 应以 9.8-10.2 秒时间间隔进行广播。

空中速度消息在航空器处于空中状态时触发发射条件，相对于先前的空中速度消息，发射装置应以 0.4-0.6 秒时间间隔进行广播。

目标状态与状况消息在航空器处于空中状态时触发发射条件，相对于先前的消息，发射装置应以 1.2-1.3 秒时间间隔进行广播。

飞机运行状况消息的广播频率取决于下述条件：

1. 目标状态与状况消息没有广播。
2. 在过去 24 秒时间里，目标状态与状况消息中的相关参数发生改变。

当同时满足条件 1 和条件 2 时，飞机运行状况消息应以 0.7-0.9 秒时间间隔进行广播。不满足条件 1 时，飞机运行状况消息应以 2.4-2.6 秒时间间隔进行广播。当航空器以“低”速率处于地面状态时，飞机运行状况消息应以 4.8-5.2 秒时间间隔进行广播。

本文分别提取空中位置、空中速度、飞机 ID 与类型消息，通过计算更新时间间隔，可以发现报文的更新频率，有助于更好地了解卫星 ADS-B 接收机的报文接收情况，并与地基系统接收情况进行比较，也能及时地发现卫星基系统存在的问题。

3.2.2 数据完好性评估方法

数据完好性(Data Integrity, DI)表示接收空中位置消息中符合 ADS-B 监视服务的报文数量占总报文数量的百分比^[20]。“天拓三号”星载 ADS-B 报文中，每个位置信息的更新会附带一个质量指标来表明该报告位置的完好性，该指标称为导航完整度类别信息(Navigation Integrity Category, NIC)，NIC 对 ADS-B 接收机通过 GPS 定位生成的水平完好性限制(Horizontal Protection Limit, HPL)的范围进行编码，HPL 是衡量 GPS 系统水平位置完好性的一个评价标准，它表示一个以报告位置为圆心的圆半径，真实位置落在圈外的概率为 10^{-7} ^[36]。由表 3.2 可知，消息域中 type 字段在 9-18 时表示飞机的空中位置消息，type 字段数值分别对应不同的 NIC 值，其对应关系如表 3.4 所示^[34]。其中，NIC 附加子字段记录在飞机运行状况消息中，与 type 字段共同决定 NIC 的取值，Rc 表示报文提供的空中位置水平半径保护容限，即 ADS-B 接收机输出的 HPL 数值范围。

表 3.4 导航完整度类别信息 (NIC)对应表

Type	NIC附加子字段	Rc/nm	NIC
9	0	$Rc < 0.004$	11
10	0	$Rc < 0.01$	10
	1	$Rc < 0.04$	9
11	0	$Rc < 0.1$	8
12	0	$Rc < 0.2$	7
	1	$Rc < 0.5$	
13	0	$Rc < 0.6$	6
14	0	$Rc < 1$	5
15	0	$Rc < 2$	4
	1	$Rc < 4$	3
16	0	$Rc < 8$	2
17	0	$Rc < 20$	1
18	0	$Rc \geq 20$	0

根据中国民用航空局在无雷达区使用 ADS-B 监视系统的适航和运行批准指南中的规定, 5 海里间隔服务所需的保护半径为 1 海里即 $NIC \geq 5$ 的航迹数据符合无雷达区 ADS-B 监视服务的位置完好性需求^[37]。所以本文从空中位置消息字段中提取 NIC 信息, 选取 $NIC \geq 5$ 的航迹数据作完好性评估, 数据完好性的计算公式如下:

$$DI = \frac{\sum_{i=0}^{11} n_i - \sum_{i=0}^4 n_i}{\sum_{i=0}^{11} n_i} \times 100\% \quad (3.2)$$

其中, i 表示 NIC 数值, n_i 表示 NIC 为 i 时对应的报文数量, 其分析步骤如下:

1. 提取所有空中位置字段消息中的 NIC 信息;
2. 按照 NIC 数值将消息分类并统计各个 NIC 对应的报文数量, 若 $NIC \geq 5$, 表示满足完好性需求, 否则不满足;
3. 根据数据完好性的计算公式, 计算 $NIC \geq 5$ 的航迹数据占总报文数量的百分比, 实现星基 ADS-B 数据的完好性评估。

3.2.3 数据准确性评估方法

数据的准确性评估实质上是对空中位置信息的误差分布进行分析,包括水平误差和垂直误差^[16]。对 ADS-B 来说,数据准确性(Data Accuracy, DA)可以表示为航空器报告位置较基准航迹的水平偏差在一定置信水平下所处的水平误差分布区间。ADS-B 的位置信息由全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)提供,因此,ADS-B 数据的准确性主要受导航数据源定位精度的影响^[38]。但是在卫星导航定位过程中会受到许多因素影响,比如卫星钟差、星历误差和轨道偏差等,都会导致 ADS-B 报告位置出现偏差。

为了更有效地统计 ADS-B 航迹数据的误差分布,需要选取适当的基准航迹来计算基准航迹与报告位置点之间的水平偏差,计算公式表示为:

$$d = \frac{|(x_2 - x_1)(y_1 - y_0) - (y_2 - y_1)(x_1 - x_0)|}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (3.3)$$

其中, (x_0, y_0) 表示报告位置点坐标, (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 表示临近基准航迹上两个位置点的坐标。由于报告位置点坐标都以经纬度的形式给出,需要将经纬度坐标转换成平面直角坐标来计算水平偏差,本文采用高斯投影的方法进行坐标转换。

高斯-克吕格投影将一个椭圆柱面与地球椭球面的某一经圈相切,将中央经线东西各 3° 和 1.5° 经线范围内的地球经纬网格按照等角条件投影到椭圆柱面上,然后展开椭圆柱面形成以中央经线为 X 轴、以赤道为 Y 轴的坐标系^[39]。高斯投影采用分带投影的方法,分为 3 度带和 6 度带,每 3° 经度一个带,将地球划分为 120 个带;每 6° 经度一个带,将地球划分为 60 个带。不同的带之间以各自的中央经线建立坐标系,高斯投影的好处在于长度和面积变形较小,适于小范围区域的距离计算。

假设一个位置点的纬度为 B,经度为 L,该位置点所在 3 度带的中央经线经度为 λ_0 ,则大地坐标(B,L)到高斯-克吕格平面直角坐标(X,Y)的转换公式为^[39]:

$$\begin{cases} X = s + \frac{(L - \lambda_0)^2}{2} N \sin B \cos B + \frac{(L - \lambda_0)^4}{24} N \sin B \cos^3 B (5 - \tan^2 B + 9\eta^2 + 4\eta^4) \\ Y = (L - \lambda_0) N \cos B + \frac{(L - \lambda_0)^3}{6} N \cos^3 B (1 - \tan^2 B + \eta^2) \\ \quad + \frac{(L - \lambda_0)^5}{120} N \cos^5 B (5 - 18 \tan^2 B + \tan^4 B + 14\eta^2 - 58\eta^4 \tan^2 B) \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} s = \frac{\pi BR}{180} \\ N = \frac{a}{\sqrt{1-f^2 \sin^2 B}} \\ \eta = e' \cos B \end{cases} \quad (3.5)$$

其中, s 表示赤道至纬度 B 的经线弧长; R 表示地球半径, 通常取 6371km ; N 表示卯酉圈的曲率半径, 卯酉圈指地平坐标系中的大圆; a 表示地球椭球的长半轴, $a=6378137\text{m}$; f 表示地球扁率, $f=1/298.257$; e' 表示地球的第二偏心率。

目前,“天拓三号”微纳卫星只有一颗,卫星某一时刻所处空间位置与地球圆心的连线同地球表面的交点,称为卫星星下点。星下点随着卫星的轨迹运动与地球自转不断变化,将不同时刻的星下点连接,形成的轨迹称作星下点轨迹^[40]。由于卫星数量限制以及监视范围的不确定性,尚无法实现对某一航班的实时监控,所以不能通过卡尔曼滤波算法处理 ADS-B 航迹的方法来获取基准航迹^[41]。因此本文以航图中的航路中心线作为基准航迹,选取满足完好性要求的航迹点数据,计算报告位置点到航路中心线的水平偏差并分析航迹误差的分布规律,实现星基 ADS-B 数据的准确性评估。

3.3 系统可用性评估方法探究

RSP 中的可用性指预期操作开始时,系统能够实现其所需功能的能力。当前 ADS-B 机载设备使用的导航数据源主要来自 GPS 系统,数据源可靠性与卫星导航技术和机载设备自身性能有关。在 ADS-B 实施过程中需要启动接收机自主完好性监测 (Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM) 和航空器机载设备检查工作,以提高 ADS-B 系统的可用性^[2]。那么,报文数据是否可用便是本文对系统可用性评估的重点评判标准。前一节内容是对星基 ADS-B 接收的报文数据的几个指标进行分析,其中,数据完好性的评估根据 NIC 指标来划分空中位置的水平容限范围,而 ADS-B 位置数据的水平容限取决于 GPS 定位精度,导航数据源的可用性直接决定了 ADS-B 系统监视性能的可用性^[42]。因此可以仿照导航系统可用性的评估方法来评价星基 ADS-B 系统的可用性。

3.3.1 导航数据源的可用性

GNSS 是将空间测量技术、计算机技术和数字通信综合起来的现代化无线电定位系统^[43]。随着 GNSS 的迅速发展和应用人群的不断增多,可用性逐渐成为用户关心的一个综合指标。当前对于导航数据源可用性的概念是面向用户服务而提出的,可以表述为在特定服务区间内,定位系统满足导航服务性能需求的能力。

按照研究对象的不同,GNSS 可用性可以划分为空间信号可用性和服务可用性^[44]。空间信号可用性分为单星可用性和星座可用性,单星可用性即卫星可用性,是从导航信号层面对卫星物理特性进行分析,星座可用性是对星座内各个单星可用性的综合分析;服务可用性是对用户位置的可见卫星累积效应的分析,可以进一步从精度和完好性两方面去展开评估。

在实际情况中,可以通过 RAIM 算法仿真 HPL 数值并判断是否超过所规定的水平告警阈值(Horizontal Alarm Limit, HAL)来表示系统可用性^[45]。HPL 是决定导航系统服务可用性的一个重要参数,表示伪距测量定位用户位置的水平误差限值。只有满足 HPL 小于系统规定 HAL 的条件时,才可以进行卫星的故障检测、识别和排除。

3.3.2 接收机自主完好性监测(RAIM)算法

RAIM 算法对 GPS 接收机测量的定位信息进行监控,可以自动检测并识别故障卫星^[46]。当 GPS 不能满足导航服务的性能需求时,RAIM 立即向用户发出警告,并计算 HPL 限值判断定位信息是否可用。

RAIM 的算法基础是构建误差观测模型,目前常采用的方法有:最小二乘法、比率法、伪距比较法和奇偶矢量法等,这些方法都是依靠多余的可见星数目来检测故障卫星并排除,本文使用最小二乘法来建立 RAIM 模型。

最小二乘法中的 GPS 伪距观测模型为^[46]

$$y = Gx + \varepsilon \quad (3.6)$$

其中, y 表示伪距观测值与用户位置的水平误差; G 为 $n \times 4$ 阶矩阵, n 表示可见星数目; x 表示用户位置参数,包括接收时间、位置和高度信息; ε 表示观测噪声。

$$\hat{X} = (G^T G)^{-1} G^T Y = X + (G^T G)^{-1} G^T \varepsilon \quad (3.7)$$

令 $(G^T G)^{-1} G^T = A$ ，则 $\hat{X} = A\varepsilon$ ， $\hat{Y} = G\hat{X}$ 。

伪距残差向量 v 为：

$$\begin{aligned} v &= Y - \hat{Y} = (I - G(G^T G)^{-1} G^T) Y \\ &= (I - G(G^T G)^{-1} G^T)(GX + \varepsilon) = (I - G(G^T G)^{-1} G^T)\varepsilon \end{aligned} \quad (3.8)$$

令 $S = I - G(G^T G)^{-1} G^T$ 得

$$Q_v = I^{-1} - G(G^T G)^{-1} G^T \quad (3.9)$$

$$v = Q_v Y = Q_v \varepsilon = S\varepsilon \quad (3.10)$$

向量 v 的验后单位权中误差为

$$\hat{\sigma} = \sqrt{v^T v / (n-4)} = \sqrt{SSE / (n-4)} \quad (3.11)$$

若 $\varepsilon \sim N(0, \sigma_0^2)$ ， SSE / σ_0^2 服从自由度为 $n-4$ 的 χ^2 分布；若 ε 均值不为 0， SSE / σ_0^2 服从非中心 χ^2 分布，非中心化参数 λ 为 $E(SSE) / \sigma_0^2$ 。故提出假设：

无故障假设 H_0 ： $E(\varepsilon) = 0$ ，则 $SSE / \sigma_0^2 \sim \chi^2(n-4)$ ；

有故障假设 H_1 ： $E(\varepsilon) \neq 0$ ，则 $SSE / \sigma_0^2 \sim \chi^2(n-4, \lambda)$ 。

无故障条件下，导航系统正常运行，若出现告警，表示误警，给定误警率 P_{fa} ，则满足概率等式：

$$P_r(SSE / \sigma_0^2 < T^2) = \int_0^{T^2} f_{\chi^2(n-4)}(x) dx = 1 - P_{fa} \quad (3.12)$$

通过上式可求得 SSE / σ_0^2 的检验门限 T ，则 $\hat{\sigma}$ 的阈值为

$$\sigma_T = \sigma_0 \times T / \sqrt{n-4} \quad (3.13)$$

由上式可知 σ_T 只与误警率有关，可以根据误警率提前求出 σ_T 数值，将计算的 $\hat{\sigma}$ 与 σ_T 对比，若 $\hat{\sigma} > \sigma_T$ ，则说明卫星出现故障并发出告警。

3.3.3 RAIM 算法的可用性判断

GPS 系统需要 4 颗卫星实现定位，需要 5 颗以上的可见星才可以实现卫星的故障检测功能^[47]。RAIM 算法需要根据用户位置的可见星数目和空间几何分布判断导航系

统的可用性,根据可见星的分布情况可以计算 HPL 数值,并与规定的 HAL 比较。RAIM 可用性判断步骤如下:

1. 提取 GPS 卫星历书文件,解算各个卫星在不同时刻所处的空间位置。
2. 根据用户位置参数计算当前位置的可见星数目并构建观测矩阵。
3. 计算 HPL 数值,并与 HAL 限值进行比较,如果 $HPL < HAL$,表示导航系统可用;否则系统不可用。

HPL 具体计算方法如下^[47]:

首先,每颗卫星都有相应的特征斜率 Slope,它是 G 的相关函数。

$$Slope(i) = \frac{\sqrt{A_{1i}^2 + A_{2i}^2}}{\sqrt{S_{ii}}} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.14)$$

其中, $A = (G^T G)^{-1} G^T$; $S = I - G(G^T G)^{-1} G^T$ 。

λ_{\min} 与可见星数目和给定虚警率 P_{md} 相关,虚警率表示卫星出现故障没有发出警告的概率,满足如下概率等式:

$$\Pr(SSE / \sigma_0^2 < T^2) = \int_0^{T^2} f_{\chi^2 \leq (n-4, \lambda)}(x) dx = P_{md} \quad (3.15)$$

则 HPL 的计算公式可以表示为

$$HPL = Slope_{\max} \times T_{\min} = Slope_{\max} \times \sigma \sqrt{\lambda_{\min} / (n-4)} \quad (3.16)$$

3.3.4 星基 ADS-B 监视性能可用性的定义及评估方法

ADS-B 监视系统的位置信息依靠 GPS 系统来定位,那么,系统可用性评估也可仿照导航系统中的卫星可用性和服务可用性来划分。卫星可用性需要对卫星本身进行评测,涉及卫星的物理参数和数据链结构,暂不做评估,所以本文重点从系统的服务可用性分析方法入手,利用 RAIM 算法预测 GPS 系统定位时产生的 HPL 误差值来进行可用性评估。

导航系统中,以 HAL 为限制来判断可用性,本文参照该方法,将星基 ADS-B 监视系统的可用性(Space-Based ADS-B Availability, SBAA)表示为接收的位置报文中,提供正确水平容限的位置消息占总报文数量的百分比。用仿真得到的 HPL 数值与 ADS-B 报文提供的水平容限 R_c 进行比较, HPL 符合容限范围,表示报文可用;否则报文不可用。最后通过计算两者的吻合度来表示系统监视性能的服务可用性。用公式表述如

下，其中， n 表示接收的位置报文数量；用 J_i 来判断第 i 条报文是否可用，可用取 1，否则取 0。

$$SBAA = \frac{\sum_{i=1}^n J_i}{n} \times 100\% \quad J_i = \begin{cases} 1, HPL_i \in Rc_i \\ 0, HPL_i \notin Rc_i \end{cases}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.17)$$

3.4 本章小结

本章首先提出所需监视性能的概念，然后对星基 ADS-B 系统的更新时间间隔、数据完好性和准确性三个指标要求加以说明，最后从 ADS-B 导航数据源入手，提出通过 RAIM 可用性算法判断报文可用性的方法，并提出星基 ADS-B 系统可用性评估指标。

第四章 星基 ADS-B 报文解析与整理

自国防科学技术大学 2015 年 9 月将“天拓三号”微纳卫星送入预定轨道，其星载航空广播式自动相关监视系统正持续向地面传送 ADS-B 报文数据。该卫星获取的数据可以对我学院正在进行的广域航空安全监控技术及应用项目形成有力支持，目前，我学院已与国防科大达成协议，TT3 卫星获取的报文数据每天会以电子邮件的方式传递给我院指定人员用于对民航航班进行的位置数据提取与分析。

4.1 TT3 星基 ADS-B 报文格式说明

星载 ADS-B 接收机不断采集飞机的报文信息并实时传输到地面站，地面站接收完成 ADS-B 报文数据包后，需要从报文的数据段中提取 ADS-B 数据帧和时间信息帧。其中，ADS-B 数据帧共 18 字节，16 进制记录，以 7e5a 开头，3cdb 结尾，中间为 14 字节的 ADS-B 信息，如图 4-1 所示。

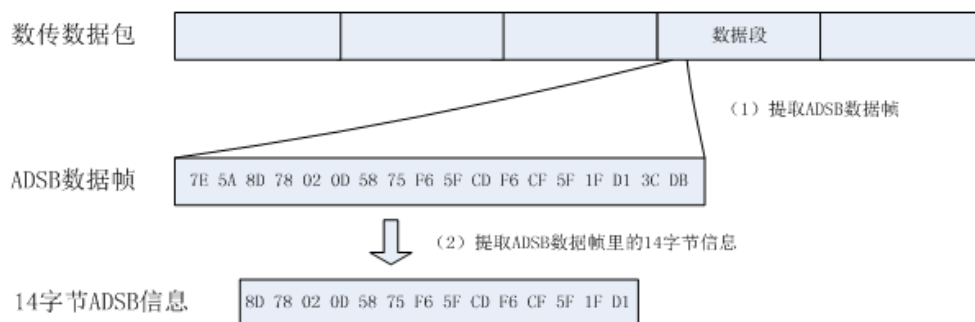


图 4-1 ADS-B 信息提取过程

时间信息帧每分钟记录一次，穿插在 ADS-B 数据帧当中，16 进制记录，以 b87e 开头，后接 8 字节的时间信息。由于传输速率的限制，星上接收的 ADS-B 报文每条报文均未加时标，而是每分钟加一个时标，每条 ADS-B 报文时间可选择相邻的每分钟 UTC 时间插值得到。

我学院每日收到的 ADS-B 原报文数据包以 dat 文件形式来保存，本文采用 Sublime Text 3 软件打开数据包并提取有用信息，Sublime Text 是一款代码编辑器及查看器，界面简洁易操作，支持多种数据读取，界面右侧配有代码略缩图，便于操作者拖动查看信息，同时具有编辑状态恢复功能。

以 b87e 0514 100a 1b16 0600 7e5a 8da8 ab3c 990d 072b 1004 2c7e 030d 3cdb 为例，

b87e 后接时间信息，化成十进制，表示 2016 年 10 月 27 日 22 点 06 分 00 秒，后面接多条该时刻起 1 分钟内顺序接收到的以 7e5a 开头，3cdb 结尾的 14 字节的 ADS-B 报文信息。

4.2 TT3 星基 ADS-B 报文解析规则

4.2.1 报文字段域描述

单条 ADS-B 报文共 14 字节，112bits，被分为 5 个大数据块。数据的前五个比特位，Bit1~Bit5 称为下行数据链路域(Downlink Format, DF)，用来描述下行数据的传输模式。DF 字段在不同的发射机条件下取值也有所不同，S 模式应答机发送 DF 为 17 的 ADS-B 消息；非 S 模式应答机发送 DF 为 18 的 ADS-B 消息；军事应用系统发送 DF 为 19 的 ADS-B 消息。

Bit6~Bit8 为接下来的数据块，该项数据的用处要视 DF 字段的取值而定。DF 为 17 时，该字段为能力字段(Capability, CA)，用于发布 S 模式应答机发射 ADS-B 消息的能力；DF 为 18 时，该字段为编码格式字段(Code Format, CF)，用来区分后续字段的类型与内容；DF 为 19 时，该字段为应用字段(Application Field, AF)，用于识别军事应用系统发送的 ADS-B 消息。

接下来的 Bit9~Bit32 位为地址声明域(Address Announced, AA)，即飞机 24 位 ICAO 地址码。Bit33~Bit88 为 ADS-B 消息域(Message Extended Squitter, ME)，用来记录 ADS-B 各类消息。最后 Bit89~Bit112 为校验识别域(Parity/Identity, PI)，用于校验 ADS-B 报文信息。ADS-B 字段结构如表 4.1 所示^[34]。

表 4.1 ADS-B 报文消息字段结构

比特位置	1-5	6-8	9-32	33-88	89-112
DF=17	DF=10001	CA	AA(ICA0 地址)	ME 字段消息	PI
		CF=000	AA(ICA0 地址)	ME 字段消息	PI
DF=18	DF=10010	CF=001	AA(非 ICA0 地址)	ME 字段消息	PI
		CF=010-011	预留		PI
DF=19	DF=10011	AF=000	AA(ICA0 地址)	ME 字段消息	PI
		AF=000-111	军事应用预留		PI

星基 ADS-B 系统一般接收 DF 为 17、DF 为 18 同时 CF 为 0 或 1 的 ADS-B 报文信息, ICAO 地址代表目标的地址唯一, ME 消息字段的解析参考 ADS-B-1090MHz-ES 标准^[34], 该字段包含的消息类型在第三章有所提及, 由于后文的指标分析主要以位置数据为主, 接下来对空中位置消息的解析规则作简单说明。

4.2.2 空中位置消息解析

ME 消息字段根据前 5 位 type 字段大小来识别不同的消息类型, type 字段在 9-18 时表示飞机的空中位置消息, 其 ME 字段内容的格式定义如表 4.2 所示^[34]。

表 4.2 ADS-B 空中位置消息格式

字段位置	1-5	6-7	8	9-20	21	22	23-39	40-56
字段内容	消息类型	监视状况	单天线	高度	时间	CPR 格式	纬度编码	经度编码

“监视状况”子字段位于 ME 字段的 6-7 比特位, 用于对航空器机载设备上的告警信息进行编码, 0 表示无情景信息; 1 表示长时间告警, 即紧急情况; 2 表示短暂告警; 3 表示特殊的位置识别情况。“单天线”子字段位于第 8 比特位, 用来表明 ADS-B 发射子系统发布信息时采用的天线类别。

“高度”子字段位于 ME 字段的 9-20 比特位, 其中, 第 16 比特被规定为“Q”指示位, 提取“Q”指示位并将剩下的 11bits 代码合并转换为十进制数值 n , 则高度信息的解析公式为:

$$h = \begin{cases} \text{floor}(100 \times n - 1000) & Q = 0 \\ \text{floor}(25 \times n - 1000) & Q = 1 \end{cases} \quad (4.1)$$

其中, h 表示高度, 单位为英尺; floor 函数功能为向下取整。

“时间”子字段位于第 21 比特位, 用来判断该位置信息是否与 UTC 时间同步, 1 表示同步, 0 表示不同步。

空中位置消息中的经纬度信息采用 CPR 算法编码, 处于 ME 字段 22 比特的“CPR 格式”子字段为 0 表示偶编码, 为 1 表示奇编码。一个经纬度信息的计算由一组奇编码加偶编码共同确定, 若上一次收到偶编码消息, 本次收到奇编码消息, 则视两条消息为一组。CPR 算法的实质就是将地球划分成若干个经度区域和纬度区域依次编号, 并根据经度区域和纬度区域的编号来确定航空器的空中位置^[48]。

CPR 算法的解析流程为：假设接收到一条空中位置消息，首先判断其奇偶性，若该消息是偶编码消息，向后寻找一条临近的奇编码消息为一组；若该消息为奇编码消息，则向前寻找一条临近的偶编码消息为一组。分别将两条消息中 23-56 比特的“纬度编码”和“经度编码”子字段代码转化为十进制数据，令偶编码消息的纬度数据为 YZ_0 ，经度数据为 XZ_0 ；奇编码消息的纬度数据为 YZ_1 ，经度数据为 XZ_1 。

首先需要确定单个纬度区域的宽度^[48]

$$Dlat_i = \frac{360}{4 \cdot NZ - i} \quad i = \begin{cases} 0(\text{偶编码}) \\ 1(\text{奇编码}) \end{cases} \quad (4.2)$$

其中，NZ 表示南北极点赤道之间纬度区域的划分数量，一般取 15，即偶纬度区域宽度取 6° ，奇纬度区域宽度取 6.1° 。

接下来计算纬度区域检索值 J

$$J = \text{floor}\left(\frac{59 \cdot YZ_0 - 60 \cdot YZ_1}{2^{Nb}} + \frac{1}{2}\right) \quad (4.3)$$

其中， 2^{Nb} 表示每个经纬度区域再次细化成各个小区间的个数，Nb 一般取 17。J 的作用在于检索纬度值所处的区域编号，则纬度值表示为

$$Rlat_i = Dlat_i \cdot \left(\frac{YZ_i}{2^{Nb}} + \text{MOD}(J, 60 - i)\right) \quad i = \begin{cases} 0(\text{偶编码}) \\ 1(\text{奇编码}) \end{cases} \quad (4.4)$$

式中，MOD 函数功能是前后两数作除法取余数。

比较奇偶纬度值的大小，若不相等，表示两次接收到的位置信息不在同一个纬度区域内，即解码失败；若相等，则可以确定经度区域的宽度

$$N_i = \max(1, \text{NL}(Rlat_i) - i) \quad (4.5)$$

$$\text{NL}(Rlat_i) = \text{floor}\left(2\pi \cdot \left[\arccos\left(1 - \frac{1 - \cos\left(\frac{2\pi}{2NZ}\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi}{180} \cdot |Rlat_i|\right)}\right)\right]^{-1}\right) \quad (4.6)$$

$$Dlon_i = \frac{360}{N_i} \quad i = \begin{cases} 0(\text{偶编码}) \\ 1(\text{奇编码}) \end{cases} \quad (4.7)$$

经度区域检索值 m

$$m = \text{floor}\left(\frac{XZ_0 \cdot (\text{NL}(Rlat_i) - 1) - XZ_1 \cdot \text{NL}(Rlat_i)}{2^{Nb}} + \frac{1}{2}\right) \quad (4.8)$$

经度值表示为

$$Rlon_i = Dlon_i \cdot \left(\frac{XZ_i}{2^{Nb}} + \text{MOD}(m, N_i) \right) \quad i = \begin{cases} 0(\text{偶编码}) \\ 1(\text{奇编码}) \end{cases} \quad (4.9)$$

奇偶经度值的选取依据当前消息的奇偶性来判断，若该消息是偶编码消息，经度值取 $Rlon_0$ ；若该消息是奇编码消息，经度值取 $Rlon_1$ 。

4.3 报文解析与整理

4.3.1 整理步骤

本文采用的ADS-B解析软件由国防科技大学设计搭建，并交与我实验室进行解码和检测，经过多次的问题反馈与软件改进，最后修改为比较完善的版本。该软件可以快速地对星基ADS-B原报文进行解码，并将解析生成的数据存储在文本文件中。软件界面显示如图4-2所示。

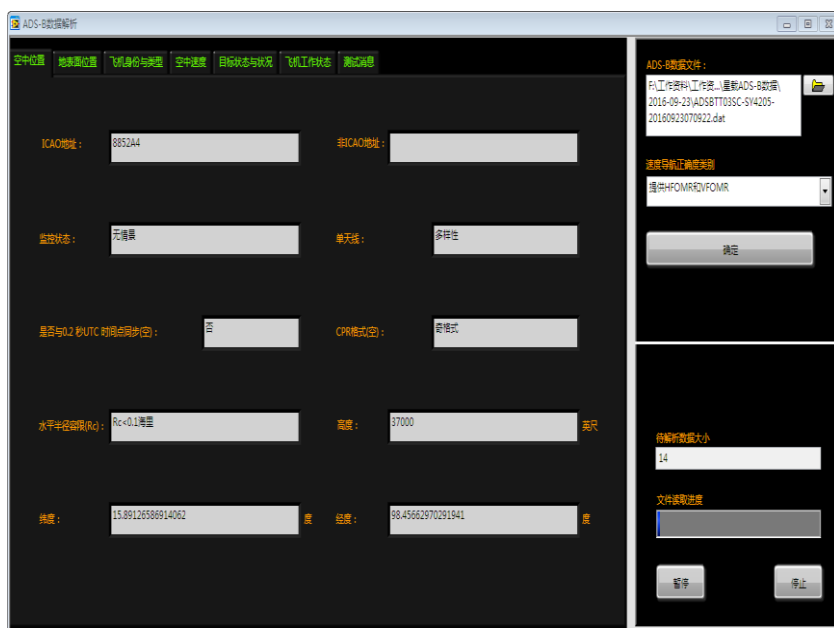


图4-2 ADS-B数据解析软件界面

进入软件界面后，首先选择“ADS-B 待解析数据文件”及“速度导航正确度类别”（一般为默认值），然后单击“开始”按钮，软件即可自动解析数据。数据解析过程中，左侧的状态消息显示当前数据包的解析结果，可以点击不同的消息类型进行查看。单击“暂停”按钮，可暂停 ADS-B 数据解析，单击“继续”按钮，软件可继续对 ADS-B 数据进行解析。“文件读取进度”为满，则表示 ADS-B 数据已全部读取成功；若“待解析数据大小”大小为 ≤ 14 ，则表示该文件解析完成。数据解析完成后，根目录下会建立

一个“ADS-B 状态信息文件”，文件夹内将生成一个 TXT 文件，并保存相应的解析结果。单击“停止”按钮，即可停止 ADS-B 数据解析功能。

通过解析结果可以看出，每条ADS-B报文均未加上时标，而是每分钟加一个时间信息，后面接多条报文信息，所以该软件顺序解码后的数据时间信息会穿插在报文数据当中。为便于后期整理分析，需要定位每个时间信息位置并将时间插值到每条ADS-B报文中，本文通过VBA编程实现该功能。

Visual Basic for Application是Visual Basic的一种宏语言，可以在微软应用程序内部实现语言编程来代替人工操作^[49]。VBA的优点在于它嵌套在Excel内部，可以轻松编写实用便捷的自动化程序；界面简单，便于操作；可以通过运行VBA代码快速实现多步骤且复杂的人工操作。利用VBA编程可以快速查找时间信息并插值到每条报文中，本文以2016年10月20日接收的报文数据为例，其整理流程如下：

1. 提取一天接收的卫星数据，利用软件解析报文生成TXT文件，并导入文本数据到Excel表格中。

2. 打开Excel开发工具选项中的VB编辑器，编写代码实现全部时间信息定位查找并作循环运算，将接收时间线性插值到每一条报文中，单条报文消息如表4.3所示。

表 4.3 报文数据示例

接收时间	ICAO 地址	消息类别	水平容限/nm	高度/ft	CPR 格式	纬度/°	经度/°
00:28:01	780B01	空中位置	Rc < 0.1	31100	奇	24.3924	102.1225

3. 整理表格，利用Excel中的数据透视表将各类型消息汇总成一张报文数量统计表。该统计表包含了一天的报文数量接收情况，每行首列有一个时间标签，记录了不同时刻各类消息的接收数量，依据这张统计表，可以快速查看卫星每分钟接收的报文数量，将时间行标签展开可以获取每分钟每架航空器发送的报文数量以及消息类型的分布情况。

4. 每个航班号信息包含在飞机ID与类型消息中，将航班号与空中位置消息中的飞机地址码进行匹配，并提取报文中的接收时间、飞机地址码、航班号、水平容限、经纬度和高度信息，制作一张空中位置表，单条位置消息如表4.4所示。

表4.4 空中位置消息示例

接收时间	飞机地址码	航班号	水平容限/nm	高度/ft	纬度/°	经度/°
00:28:01	780B01	3U8926	Rc < 0.1	31100	24.3924	102.1225

该表中,有些航班信息无法显示,这是因为航班信息记录在飞机ID与类型报文消息中,有的航空器在航行过程中不会向卫星ADS-B接收机发送该类消息或有遗漏,导致出现能接收空中位置消息却匹配不到航班号的情况。该表包含的接收时间、水平容限和经纬度信息依次用来对报文数据的更新时间间隔、完好性和准确性等指标作分析。

4.3.3 接收数量统计

星基ADS-B报文的类型包括飞机地面位置、空中位置、空中速度、飞机航班号、飞机运行状况与目前运行状态六大类,一天中各类消息的接收比例不同。为统计卫星系统的报文接收情况,本文选取2016年10月17日到10月21日五天的数据,分别按以上整理步骤解析报文并分类,对每天接收的各消息类型数量作统计,统计结果如表4.5所示,总体分布情况如图4-3所示。

表4.5 各类型消息统计结果

日期	飞机航班号	地面位置	空中位置	空中速度	飞机运行状况	目标状况和状态	总数
10.17	5677	9374	37253	38368	2354	1141	94167
10.18	5681	8242	38902	39767	2499	1351	96442
10.19	5422	10026	32605	33700	1919	870	84542
10.20	5282	7995	36457	37730	2682	1144	91290
10.21	6324	11235	41048	42273	2319	1201	104400
总计	28386	46872	186265	191838	11773	5707	470841

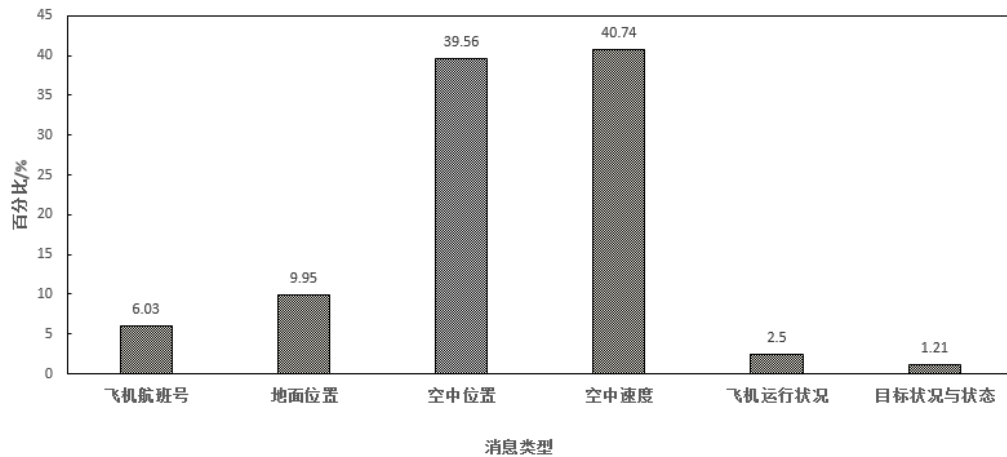


图 4-3 星基 ADS-B 报文消息分布

经统计，五天总共接收了470841条报文数据，从图中可以看出，总体接收到的报文数据中，空中位置消息和空中速度消息比较多，其中，空中速度消息大多显示飞机在沿固定航向保持巡航速度飞行，变化不大，暂不做数据统计，本文主要针对空中位置消息做接收数量的统计，以便分析卫星接收ADS-B报文位置消息的情况。分别对空中位置报文的航空器、航班、解码位置数量和丢包率进行统计，统计结果如表4.6所示。

表 4.6 空中位置报文数量统计

日期	航空器数量	航班数量	可解码数量	丢包率/%
10.17	1534	1327	33173	10.95
10.18	1954	1119	34083	12.39
10.19	1618	947	28408	12.87
10.20	1747	1052	32038	12.12
10.21	2203	1267	35628	13.20
平均	1811	1142	32066	12.31

在报文消息的接收过程中，容易造成数据丢失，本文引用丢包率的概念来表征报文的接收情况。丢包率指接收报文过程中丢失数据量占所发送数据量的比例，由于ADS-B报文位置消息的经纬度采用CPR算法解码，需要一组奇偶编码才能解算出位置信息。前文提到，每条位置消息中均有一位用来存储报文奇偶性，解码失败则表明有一条奇报文或偶报文丢失，本文对接收到的空中位置消息作丢包率计算，丢包率=未解析成功的报文数量/空中位置消息总报文数量。

根据表 4.6 的统计结果，可以发现接收的航班数量普遍低于航空器数量，一天中接收到的可解码的空中位置消息有 3 万 2 千条左右，丢包率普遍在 12.31%，表明卫星在接收飞机报文信息过程中会出现遗漏，一是因为目前仅有一颗试验卫星，接收范围不全面，二是因为卫星沿 524km 的低轨道运行，传输距离远，在飞机密集的地区容易造成信息丢失。

4.4 本章小结

本章分别介绍了星基 ADS-B 报文的数据来源、字段格式和解析原则，阐述了 CPR 算法的解码流程并提出数据丢包的原因。利用软件解析报文数据并整理分类，统计报文每日每分钟平均接收数量，为下一章的具体指标评估打好基础。

第五章 星基 ADS-B 监视性能可用性评估

本章将对星基 ADS-B 系统监视性能的分析评估流程作详细介绍,给出系统评估总体架构,依照架构中的各个性能指标依次进行评估,包括报文更新时间间隔计算、数据完好性、准确性评估和系统可用性评估。

5.1 系统评估总体架构

为实现星基 ADS-B 系统监视性能的可用性评估,需要先对其监视性能的基本指标进行评估,再综合评价系统的可用性,总体结构如图 5-1 所示。

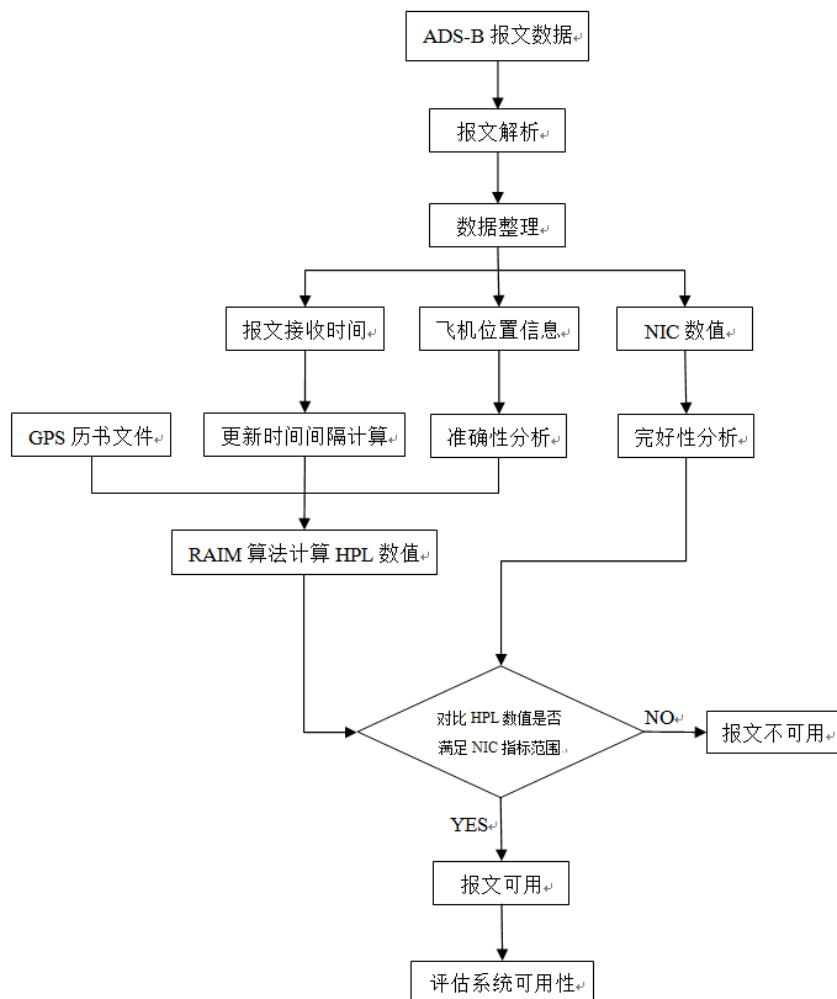


图 5-1 系统评估结构

由结构图可以看出,星基 ADS-B 所需监视性能评估主要流程包括:首先解析报文并整理数据,然后分别提取报文接收时间计算更新时间间隔;提取 NIC 指标进行数据

完好性评估；提取空中位置消息的经纬度信息进行数据准确性评估，最后综合各项性能指标，利用 MATLAB 软件仿真 RAIM 算法并计算 HPL 数值，通过对比报文提供的水平容限来分析系统的可用性。

5.2 监视性能评价指标评估

5.2.1 更新时间间隔计算

本文提取 2016 年 10 月 17 日到 10 月 21 日五天报文数据中的接收时间、飞机地址码和消息类型，根据公式(3.1)依次对报文总体消息、空中位置消息、空中速度消息和飞机 ID 和类型消息的更新时间间隔进行计算，首先计算每架航空器所发送的连续报文间的时间差并汇总，报文总体更新时间间隔统计结果和累积分布如图 5-2、5-3 所示。

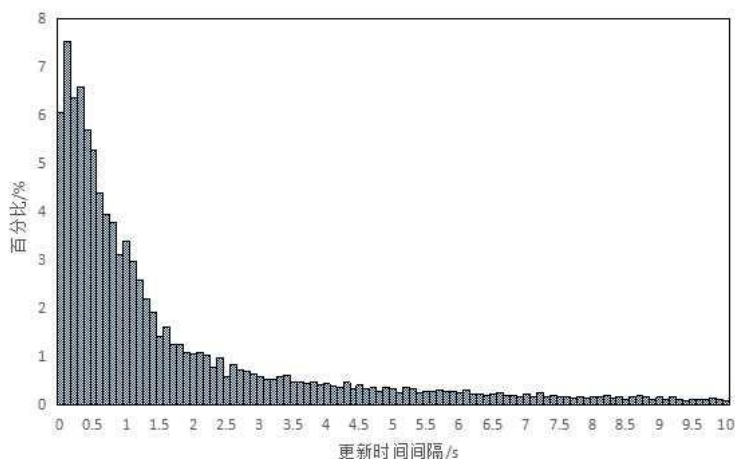


图 5-2 总体更新时间间隔直方分布

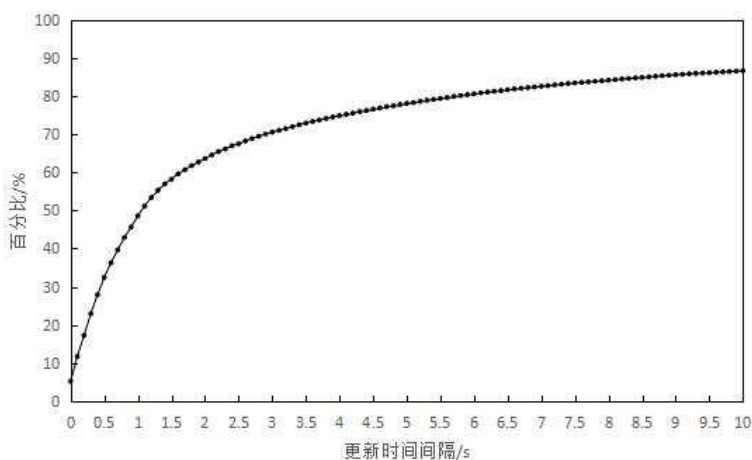


图 5-3 总体更新时间间隔累积分布

从图 5-2 中可以看出, 报文数量百分比随更新时间间隔的增加整体呈下降趋势, 6s 以后趋于平稳, 多数分布在 0-0.7s 之间, 10s 内平均更新时间间隔为 1.78s。从图 5-3 累积分布中可以看出, 报文更新时间间隔在 0-1.5s 累计百分比上升速度较快, 2s 后变为缓慢增长并逐渐稳定在 85% 左右。总体报文消息中, 有 50% 的报告在 1.2s 内更新, 86.61% 的报告在 10s 内更新。

为计算空中位置消息的更新时间间隔, 需提取接收时间、飞机地址码和空中位置消息, 然后计算每架航空器发送的连续位置报文间的时间差并汇总, 报文位置消息的更新时间间隔统计结果和累积分布如图 5-4、5-5 所示。

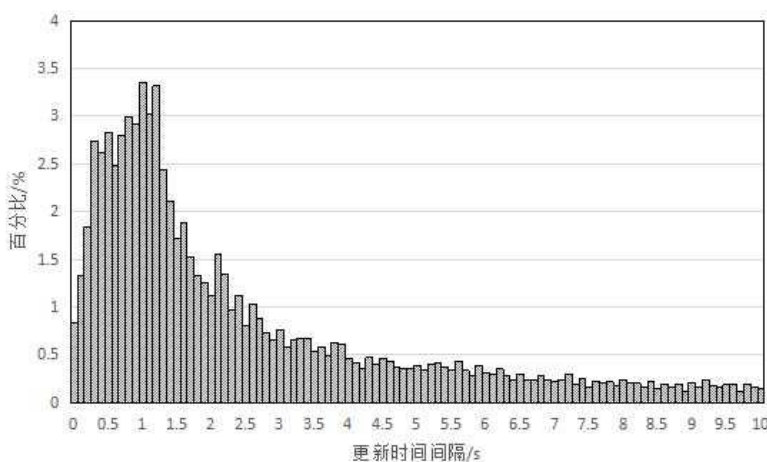


图 5-4 空中位置消息更新时间间隔直方分布

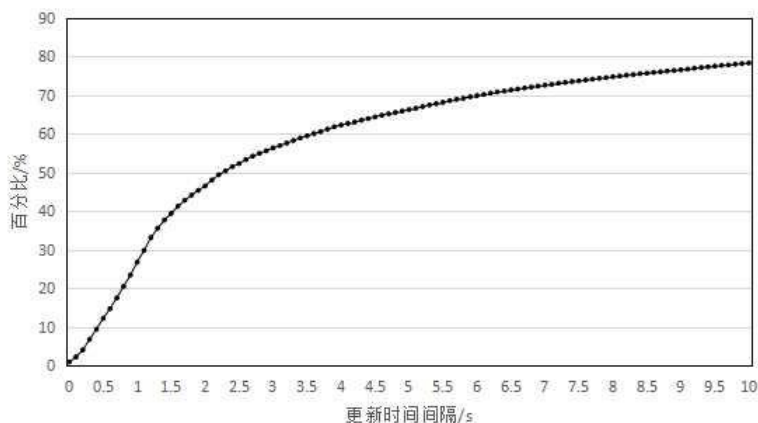


图 5-5 空中位置消息更新时间间隔累积分布

从图 5-4 中可以看出, 位置报文的数量百分比随更新时间间隔的增加先呈增长趋势, 1.3s 以后开始呈下降趋势, 7.5s 以后趋于平稳, 多数分布在 0.5-1.5s 之间, 10s 内平均更新时间间隔为 2.53s。从图 5-5 累积分布中可以看出, 报文更新时间间隔在 0-1s 累计百分比上升速度较快, 2.5s 后稳步增长。空中位置消息中有 50% 的报告在 2.4s 内更新,

77.4%的报告在 10s 内更新，其中有 64%的位置报告点可以满足雷达监视的 4s 更新间隔要求。

接下来计算空中速度消息的更新时间间隔，提取接收时间、飞机地址码和空中速度消息，计算每架航空器发送的连续速度报文间的时间差并汇总，报文速度消息的更新时间间隔统计结果和累积分布如图 5-6、5-7 所示。

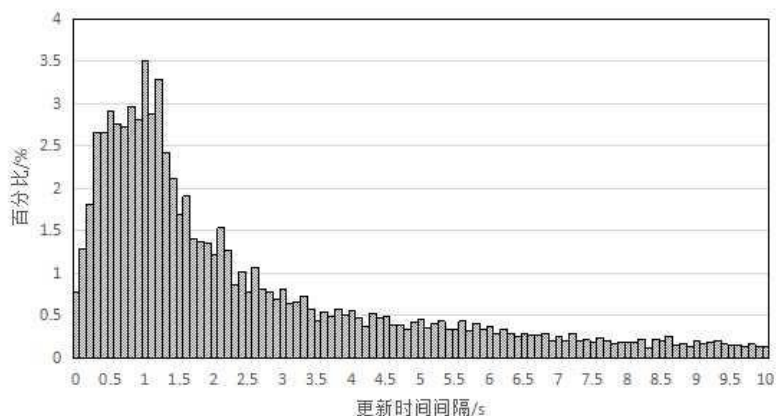


图 5-6 空中速度消息更新时间间隔直方分布

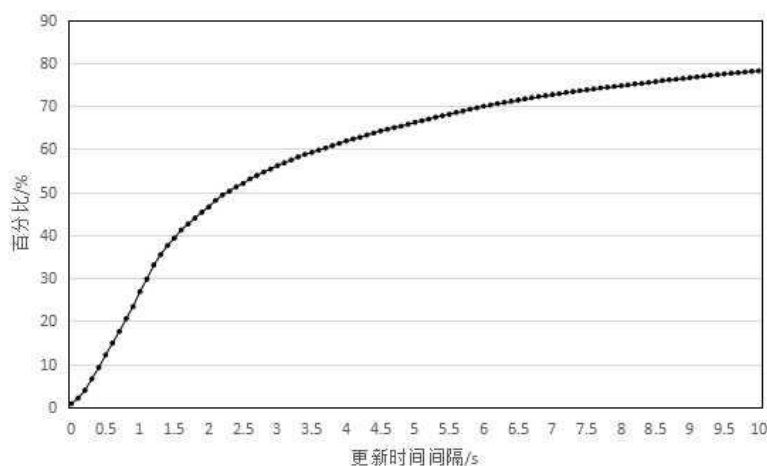


图 5-7 空中速度消息更新时间间隔累积分布

空中速度消息的更新时间间隔分布与空中位置消息的分布图类似，其中，10s 内平均更新时间间隔为 2.52s，速度消息中有 50%的报告在 2.3s 内更新，78.16%的报告在 10s 内更新。

最后计算飞机 ID 和类型消息的更新时间间隔，提取接收时间、飞机地址码和飞机 ID 类型消息，计算每架航空器发送的连续类型报文间的时间差并汇总，报文飞机 ID 消息的更新时间间隔统计结果如图 5-8 所示。该消息类型的更新时间间隔分布比较杂乱，10s 内平均更新时间间隔为 5.11s。

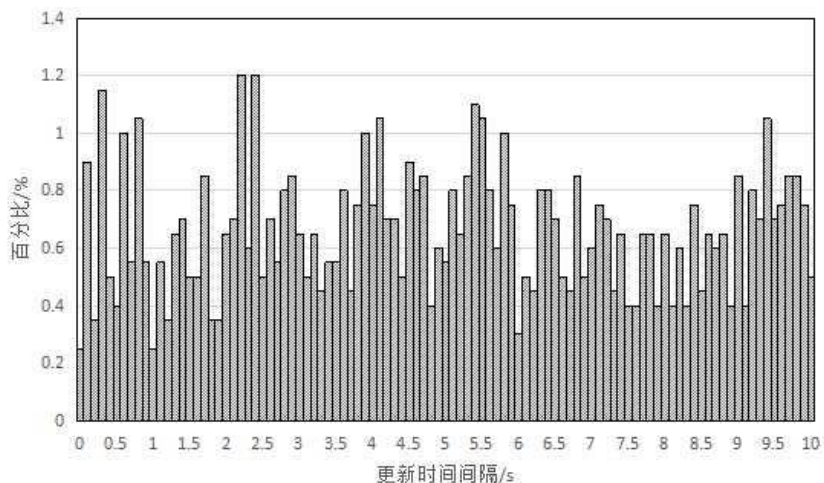


图 5-8 飞机 ID 与类型消息更新时间间隔直方分布

从以上绘制的分布图中可以发现,星基 ADS-B 报文的更新时间间隔明显偏高,并不符合 DO-260B 协议中更新消息的要求。在文献[14]中,地基系统的位置消息更新时间间隔集中分布在 0.5s 左右,少量分布在 1s 和 1.5s 之间,其余间隔几乎没有,这是由于地基 ADS-B 地面站接收覆盖区域的边缘受限,直接影响时间间隔的统计结果,故在计算时截取接收天线的某一范围内进行报告,将地球曲率和接收范围的影响最小化,从而实现更精准的分析。

而星基 ADS-B 通过卫星接收机获取报文信息,由于卫星的持续运动,卫星星下点不断变化,覆盖范围遍布全球,导致每架航空器的平均接收时间只能持续 2-3 分钟,难以确定每条报文的接收区域,加上报文丢失率较高,目前无法限定接收范围来获取更有效的信息,故直接对每架航空器的时间间隔进行统计,会出现时间间隔分布不均,平均值偏高的结果。

5.2.2 数据完好性评估

汇总2016年10月17日到10月21日五天的报文数据的空中位置信息表,总共186265条空中位置消息,提取每条空中位置消息中的NIC指标,根据NIC数值的不同进行分类统计,统计结果如表5.1和图5-9所示。

表5.1 NIC统计结果

NIC	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
数量/条	7694	0	23	0	108	229	1945	23020	152312	0	929	5
百分比/%	4.13	0	0.01	0	0.06	0.12	1.04	12.36	81.77	0	0.5	0

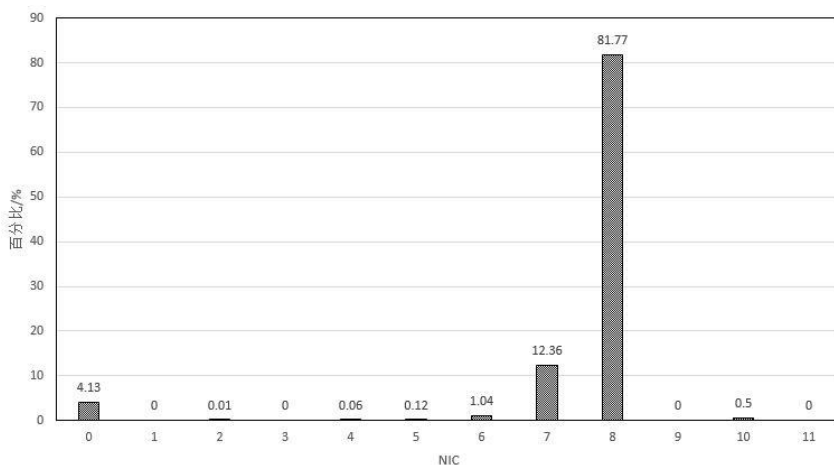


图 5-9 导航完整度类别信息分布

从 NIC 数值分布中可以看出，NIC 主要分布在 0、7 和 8，少量分布于 4、5、和 10，其他数值几乎没有，原因在于多数航空器的应答机不完全按照 NIC 类别对应表来发布水平容限信息，比如 18.52-185.2m 范围内的水平误差，都以 NIC=8 向 ADS-B 接收机发布；超过 1 海里限值，都以 NIC=0 发布，表示接收航空器的水平容限过大或不不确定。根据公式(3.2)， $NIC \geq 5$ 的航迹数据占总数的 95.79%，可以认为星基 ADS-B 系统有超过 95% 的航迹数据符合无雷达区 ADS-B 监视服务的位置完好性需求，NIC 数值绝大数集中于 8，说明卫星数据的水平半径容限整体在 0.1 海里以内。

5.2.3 数据准确性评估

由于卫星系统尚不完善，无法实现对某一航班的实时监控，不能寻找某条固定航班来绘制航迹，故本文提取大量数据点，采取与航路中心线比较的方法来探寻航迹数据的分布规律并计算置信区间。

仅用上文 5 天整理数据不足以发现航迹分布规律，故选取途经 G470 奇台至长武航段的从 2016 年 10 月 18 日到 11 月 16 日时间段的所有航迹数据建立样本空间。由于不用考虑航迹数据的具体接收时间，所以无需对报文进行系统地整理分类，仅提取每条空中位置消息中的经纬度信息并匹配航班信息。本文通过 MATLAB 绘制航线并计算水平偏差距离，G470 奇台至长武航段如图 5-10 所示。

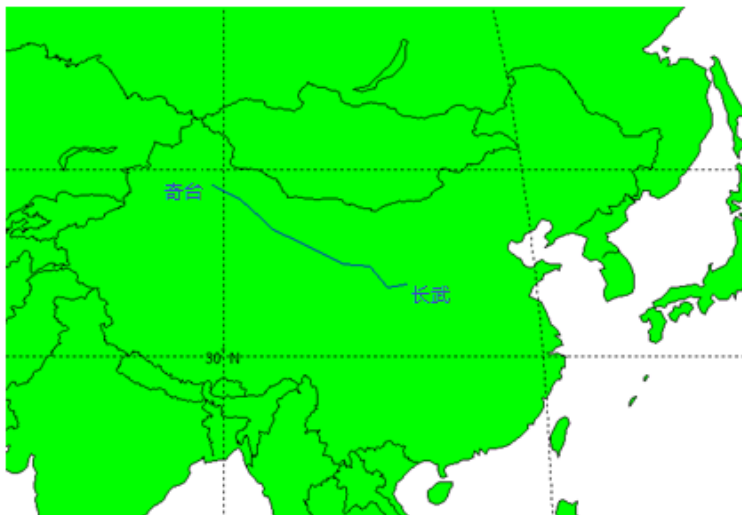


图5-10 G470奇台至长武航路图

该航段主要包含于西安到乌鲁木齐的飞行航路中，该航路的特点为：贯穿中国自西至东，交叉航线少，便于航迹数据的寻找。坐标点选取标准为：首先找寻西安至乌鲁木齐的航班数据(比如MU2299、MU2769、CZ6960、RY8939等)，由于本文选取的基准航迹为航路中心线，不能保证飞机沿中心线飞行，通过上一节的数据完好性分析可以发现，航迹数据NIC集中于8，大部分水平容限小于0.1海里，故以0.1海里范围为选取标准，若航迹数据点与中心线的水平偏差小于或趋于0.1海里，本文默认该航空器正在沿航路中心线航行。水平偏差计算步骤为：获取航迹点和临近航路中心线上的两个导航点的经纬度坐标，以航迹点所处的3度带中央经线为X轴，以赤道为Y轴建立高斯-克吕格平面直角坐标系，分别套入公式(3.4)和(3.5)转换航迹点和两个导航点的坐标并根据公式(3.3)计算水平偏差距离。则样本空间建立步骤如下：

1. 提取 NIC=8 的航迹数据，确定 G470 奇台至长武航段的坐标选取范围。
2. 筛选符合选取范围的航迹点，剔除错误重复的数据。
3. 以一天数据量为一组样本，计算每组样本中的空中位置点到航路中心线的水平偏差距离，并构建样本空间。

分别以一天接收到的星基ADS-B空中位置信息为一组样本，总共由30组样本组成样本空间，对每组样本计算分析。假设航迹点到航路中心线的水平偏差为 x_i ，则偏差距离的样本均值为：

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.1)$$

依次对30组样本作均值计算，计算结果如表5.2所示。

表 5.2 偏差距离的样本均值

样本号	样本日期	样本均值/m
1	2016-10-18	176.77
2	2016-10-19	174.04
3	2016-10-20	150.47
4	2016-10-21	140.23
5	2016-10-22	161.48
6	2016-10-23	184.41
7	2016-10-24	182.62
8	2016-10-25	166.09
9	2016-10-26	156.21
10	2016-10-27	150.37
11	2016-10-28	139.07
12	2016-10-29	119.55
13	2016-10-30	159.23
14	2016-10-31	118.68
15	2016-11-01	142.61
16	2016-11-02	156.78
17	2016-11-03	176.75
18	2016-11-04	185.23
19	2016-11-05	177.51
20	2016-11-06	146.83
21	2016-11-07	150.48
22	2016-11-08	152.22
23	2016-11-09	127.75
24	2016-11-10	150.79
25	2016-11-11	168.31
26	2016-11-12	167.09
27	2016-11-13	152.93
28	2016-11-14	158.75
29	2016-11-15	139.28
30	2016-11-16	169.86

在不知道总体服从什么分布的情况下，需要根据样本数据的分布形式来检验总体数据的特征，称为分布拟合检验，其中最常见的是总体分布正态性检验^[50]。当一组不

少于30个的随机变量服从同一分布且样本均值和方差可求，则认为该组变量近似服从正态分布^[51]。本文分别选用正态概率纸检验和Jarque-Beran检验法来判别样本数据是否服从正态分布。

正态概率纸以样本数据为横坐标，以标准正态分布函数 $\Phi(\frac{x-\mu}{\sigma})$ 为纵坐标，在正态概率图中，均值为 μ ，标准差为 σ 的正态分布图像为一条直线，该直线通过点 $(\mu, 0.5)$ ，斜率为 $\frac{1}{\sigma}$ 。每个样本数据用 ‘+’ 表示，若样本点很靠近该条直线，则说明总体分布很接近正态分布。将表5.2数据绘制到正态概率图中，如图5-11所示。观察发现样本点有向中间直线汇聚的趋势，可初步认定样本数据服从正态分布。

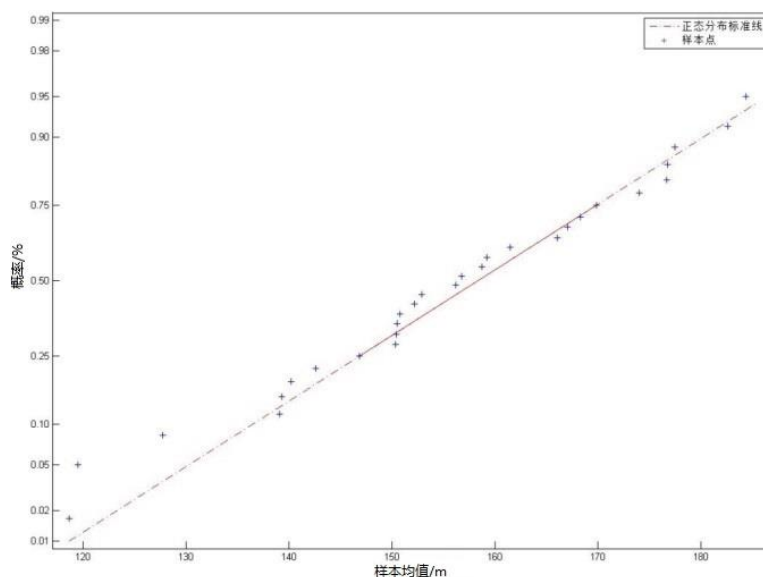


图 5-11 概率纸检验结果

为进一步验证样本数据的分布情况，本文还调用 MATLAB 工具箱的 `jbtest` 函数来进行 Jarque-Beran 检验。Jarque-Beran 检验通过样本数据的偏度系数和峰度系数构成检验统计量，在调用 `jbtest` 函数进行分布检验时，依据实际的样本数据和给定显著性水平，用样条插值的方法计算临界值^[52]。若检验统计量的观测值不小于这个临界值时，`jbtest` 函数会拒绝原假设的判断，原假设即样本服从正态分布。

调用 $[h, P, Jbstat, CV] = jbtest(X, 0.05)$ 作正态性检验， h 表示测试结果，若 h 为 0，则接受原假设，认为样本数据 X 服从正态分布，否则拒绝原假设； P 表示接受原假设的概率值； $Jbstat$ 表示检验统计量的观测值； CV 表示原假设的临界值，代入样本数据到 X 中，输出如下： $h=0$ 、 $P=0.5000$ 、 $Jbstat=0.8001$ 、 $CV=4.4039$ ，表示接受原假设，即样本数据服从正态分布。

样本均值 \bar{X} 是总体均值 μ 的无偏估计量, 且 $\bar{X} \sim N(\mu, \frac{\sigma^2}{n})$, $\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \sim N(0, 1)$, 可知 μ 的置信水平为 $1 - \alpha$ 的置信区间为^[53]

$$(\bar{X} \pm t_{\alpha/2}(n-1) \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}) \quad (5.2)$$

已验证样本数据服从正态分布, 现在求总体均值 μ 的置信水平为 0.95 的置信区间。由置信水平 $1 - \alpha = 0.95$, 得 $\alpha = 0.05$, 查 t 分布表得

$$t_{\alpha/2}(n-1) = t_{0.025}(29) = 2.0452 \quad (5.3)$$

由表 5.2 数据算得 $\bar{X} = 156.7463$, $S = 17.9673$, 代入得 $(156.7463 \pm 2.0452 \times \frac{17.9673}{\sqrt{30}})$, 即 (150.037, 163.455)m。

求得总体均值 μ 的置信区间后, 为更好地了解实际误差与总体均值的偏差波动情况, 还需计算总体标准差 σ 的置信区间。由样本均值 \bar{X} 是总体均值 μ 的无偏估计量, 得标准差 σ 的置信水平为 $1 - \alpha$ 的置信区间为^[53]

$$(\frac{\sqrt{(n-1)}S}{\sqrt{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)}}, \frac{\sqrt{(n-1)}S}{\sqrt{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n-1)}}) \quad (5.4)$$

现在计算总体标准差 σ 的置信水平为 0.95 的置信区间, 由置信水平 $1 - \alpha = 0.95$, 得 $\alpha = 0.05$, 查 χ^2 分布表得

$$\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(n-1) = \chi_{0.025}^2(29) = 45.722, \chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n-1) = \chi_{0.975}^2(29) = 16.047 \quad (5.5)$$

代入式(5.4)得(14.309, 24.153)m。

求得实际误差的总体均值和标准差后, 可以大致推算 G470 奇台至长武航段的航迹误差分布规律, 在 2σ 即 95.5% 的概率下空中位置的实际误差在 $\mu \pm 2\sigma$ 即(101.694, 211.761)m, 满足 ADS-B 监视服务的 0.5 海里监视要求。

5.3 系统可用性评估

为验证星基 ADS-B 系统的可用性, 本文选取 ADS-B 报文 2016 年 10 月 20 日的所有航迹数据的接收时间、经度、纬度和高度信息, 并提取网络下载的 YUMA 格式卫

星历书文件,通过 RAIM 算法计算每个位置点的可见星数目和 HPL 数值,与报文自身提供的 NIC 指标对应的水平容限相比较,根据公式(3.17)计算两者的吻合度,以此来表示卫星系统监视性能的服务可用性。

5.3.1 卫星历书数据提取

GPS 卫星的历书数据包含在导航电文中,相当于卫星星历数据的简化版本,以 GPS 周数来记录,用于计算每天不同时刻在轨运行卫星的大概位置^[54]。YUMA 是美国海岸警备队导航中心公开提供的用来存储卫星历书数据的一种格式,用户可以登录其官网,点击选择相应的年份、周数和日期后,便可获取当天所有卫星的运行参数。以 2016 年 10 月 20 日的 1 号 GPS 卫星为例,其历书格式如表 5.3 所示。

表 5.3 YUMA 历书格式

Week 895 almanac for PRN-01	
ID	01
Health	000
Eccentricity	0.5964279175E-002
Time of Applicability(s)	405504.0000
Orbital Inclination(rad)	0.9651519496
Rate of Right Ascend(r/s)	-0.7817468486E-008
SQRT(A) (m 1/2)	5153.650391
Right Ascend at Week(rad)	0.1491379490E+001
Argument of Perigee(rad)	0.563336843
Mean Anomaly(rad)	-0.2960185943E+001
Af0(s)	0.3814697266E-004
Af1(s/s)	0.0000000000E+000
week	895

表中,采用伪随机噪声码(pseudo random noise code, PRN)对 GPS 卫星编号,除去 4 号卫星,PRN 编码范围在 1-32,包含了目前正在运行的 31 颗在轨卫星;Health 表示卫星的健康状态,0 表示良好,非 0 表示故障;Eccentricity 轨道偏心率,表示椭圆轨

道焦点间距离与轨道长轴的比值；Time of Applicability 表示历书基准时间，时间以秒数记录，从 895 周起始时间 10 月 16 日 61440s 开始，到表中基准时间 405504s 正好间隔 4 天，对应 10 月 20 日；Orbital Inclination 轨道倾角，指地球赤道面与卫星轨道面的夹角，GPS 卫星轨道倾角为 55° ，历书文件角度信息都用弧度表示，表中参数转化后约为 55.3° ；Right Ascend at Week 升交点赤经初始值，表示春分点到卫星轨道升交点间的角距；Rate of Right Ascend 表示升交点赤经变化率；SQRT(A)表示卫星轨道半长轴的平方根；Argument of Perigee 近地点角距，表示近地点与卫星轨道升交点对地心的张角；Mean Anomaly 表示平近点角初始值，是卫星在当天开始时刻相对于轨道中心点的运行角度；Af0 和 Af1 分别表示卫星时钟修正的钟差和钟速。

5.3.2 可见星数目与 HPL 数值计算

从历书文件中提取各个卫星轨道参数，为计算各接收位置点的可见卫星数目，需要解算卫星在 WGS-84 坐标系中各个时刻的空间坐标位置。WGS-84 坐标系作为国际确定的地心地固坐标系，以原点为地球质心，以协议地球极(Conventional Terrestrial Pole, CTP)方向为 Z 轴，以 CTP 赤道面上的 BIH1984.0 零子午线为 X 轴，从而构成的一个笛卡尔直角坐标系^[55]。

已知报文接收时间 t 和平近点角初始值 M_0 ，则 t 时刻的平近点角 M 为

$$M = M_0 + 2\pi / 43080 \cdot t \quad (5.6)$$

其中，GPS 卫星的运行周期为 11 小时 58 分钟，换算成秒数为 43080s， $2\pi / 43080$ 表示卫星沿轨迹运动的平均角速度。

代入轨道偏心率 e_c ，偏近点角 E 表示为

$$E = M + e_c \cdot \sin E \quad (5.7)$$

则真近点角 V 为

$$V = \arctan \frac{\sqrt{1 - e_c^2} \cdot \sin E}{\cos E - e_c} \quad (5.8)$$

由以上条件，分别可求得升交角距 u 和轨道向径 r

$$u = V + w \quad (5.9)$$

$$r = a \cdot (1 - e \cdot \cos E) \quad (5.10)$$

其中, w 表示近地点角距, a 表示轨道面半长轴。

根据历书文件中的升交点赤经初始值 Ω_0 和升交点赤经变化率 R_Ω , 结合地球自转角速度, 可得到 t 时刻的升交点经度 λ 为

$$\lambda = \Omega_0 + (R_\Omega - \omega_e) \cdot t \quad (5.11)$$

其中, ω_e 表示地球自转角速度, $\omega_e = 7.2921151467 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ 。

结合上述变量, 代入轨道倾角 i , 便可得到卫星在 WGS-84 坐标系中的 t 时刻坐标为^[55]

$$\begin{cases} x_t = r \cos u \cos \lambda - r \sin u \cos i \sin \lambda \\ y_t = r \cos u \sin \lambda + r \sin u \cos i \cos \lambda \\ z_t = r \sin u \sin i \end{cases} \quad (5.12)$$

ADS-B 报文中提供了航迹数据的经纬度和高度信息, 通过大地坐标(B,L,H)来表示, 其中 B 和 L 分别表示纬度和经度, H 表示航空器到 WGS-84 椭球面的高度。为统一坐标系, 现在需要实现大地坐标(B,L,H)到 WGS-84 空间直角坐标(X,Y,Z)的坐标转换, 转换公式如下:

$$\begin{cases} X = (N + H) \cos B \cos L \\ Y = (N + H) \cos B \sin L \\ Z = [N(1 - f^2) + H] \sin B \end{cases} \quad (5.13)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - f^2 \sin^2 B}} \quad (5.14)$$

其中, N 表示卯西圈的曲率半径, 卯西圈指地平坐标系中的大圆; a 表示地球椭球的长半轴, $a = 6378137 \text{ m}$; f 表示地球扁率, $f = 1/298.257$ 。

将前两步计算的卫星坐标和转化后的航迹点坐标相减求向量差, 得

$$\begin{cases} dx = x_t - X \\ dy = y_t - Y \\ dz = z_t - Z \end{cases} \quad (5.15)$$

通过向量差可得各个卫星仰角为

$$EL = \arctan \frac{dz}{\sqrt{dx^2 + dy^2}} \quad (5.16)$$

作可见星判断，若仰角在 7.5° 到 175° 之间，则认为该卫星在 t 时刻可见，记录每个位置点的可见卫星数目并存储到特定列矩阵当中。将每个位置点与其可见卫星坐标的向量差汇总，建立观测矩阵 G

$$G = [\frac{dx}{\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}}, \frac{dy}{\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}}, \frac{dz}{\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}}, \text{ones}(n,1)] \quad (5.17)$$

其中， n 表示该位置点的可见星个数， G 为 $n \times 4$ 阶矩阵。

代入公式(3.14)得到每颗可见星的特征斜率，筛选出最大的特征斜率 Slope_{\max} ，HPL 计算公式中的 λ_{\min} 取值与 t 时刻的可见卫星数目和虚警率有关，根据文献[56]，虚警率取 0.001， λ_{\min} 与可见星数目的对应关系如表 5.4 所示^[56]。根据表中可见星数目对应的 T_{\min} 数值，代入公式(3.16)即可得到 HPL 数值。

表 5.4 λ_{\min} 和最小检验门限 T_{\min} 参考值

可见星数目	最小检验门限 T_{\min}	λ_{\min}
5	49.85	50.0
6	38.76	54.5
7	33.82	57.8
8	30.87	60.6
9	28.86	63.0
10	27.38	65.2
11	26.24	67.2
12	25.31	69.0
13	24.55	70.8
14	23.91	72.4
15	23.26	74.0
16	22.88	75.5
17	22.46	76.9
18	22.08	78.3

5.3.3 仿真结果分析

本文采用 MATLAB 软件对以上算法进行仿真, 仿真时间从 2016 年 10 月 20 日 0 时 28 分 01 秒到 23 时 59 分 55 秒, 共 31631 个航迹点坐标, 导入当天历书文件和报文航迹数据后开始仿真, 运行时间 12.52 秒。将仿真生成的可见星数目和 HPL 数值提取并导出到 excel 文件, 与报文相关参数一一对应, 包括接收时间、飞机地址码、空中位置和水平容限等, 单条消息示例如表 5.5 所示。

表 5.5 报文位置数据与仿真数据整合示例

接收时间	飞机地址码	纬度/°	经度/°	高度/ft	可见星数目	HPL/m	水平容限/nm
00:28:01	780B01	24.3924	102.1224	31100	9	47.9271	Rc < 0.1

与地基系统不同, 星基 ADS-B 系统接收机与 GPS 卫星同时处于移动的状态, 为探究各个位置点的接收情况, 以每接收数量的 500 为间隔, 分别绘制可见星数目和 HPL 数值随时间的变化曲线图, 如图 5-12 和图 5-13 所示。

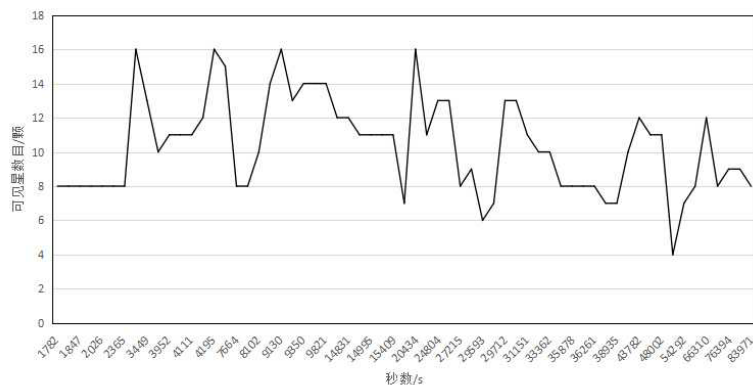


图 5-12 可见星数目随时间变化曲线

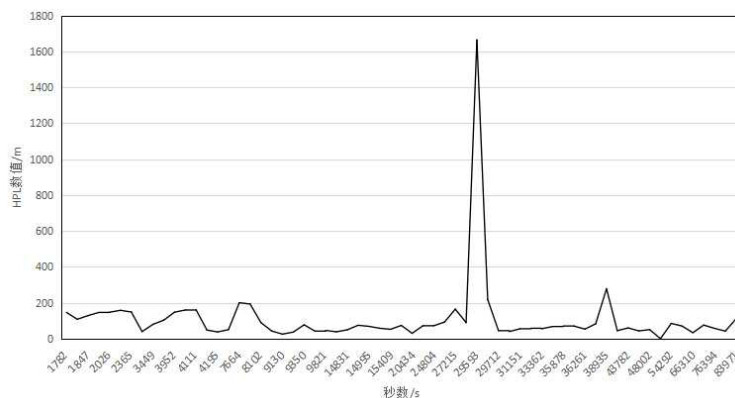


图 5-13 HPL 数值随时间变化曲线

由图 5-12 可以看出, 可见卫星数量大部分处于 8 颗以上, 很少在 6 颗以下, 可见星数目平均为 10.343 颗, 相应地, 图 5-13 中的 HPL 数值绝大部分处于 0 至 200m 之间, 平均值为 151.387m。两个参数的变化存在一定的相关性, 在两张图的对比中可以看出, 29693-297712s 可见星的数量在 6-7 颗之间, 对应的 HPL 数值也很大, 达到了 1664.39m; 54292s 时可见星数目为 4 颗, 对应 HPL 数值为 0, 这是因为 RAIM 算法只有满足可见卫星数目在 5 颗以上的条件时才能进行故障检测并计算 HPL, 故取 0 表示未知。由此说明可见卫星数目越多, 航空器的位置越容易被观测, 求得的 HPL 数值也越小。

现在开始探究报文中水平容限参量与 RAIM 算法仿真得到的 HPL 数值的对应关系及吻合程度, 经统计分析, 两者的对应关系存在以下几种情况:

情况 1: 连续一段时间报文水平容限保持不变, 比如持续为 $R_c < 0.1$ 海里, 仿真得到的 HPL 数值也满足范围要求, 见表 5.6:

表 5.6 情况 1 数据示例

接收时间	飞机地址码	纬度/ $^{\circ}$	经度/ $^{\circ}$	高度/ft	可见星/颗	HPL/m	R_c /nm
00:28:01	780B01	24.392	102.122	31100	9	47.927	$R_c < 0.1$
00:28:02	780D8C	27.833	102.246	30100	9	45.914	$R_c < 0.1$
00:28:03	780E8E	26.275	104.999	31075	9	47.390	$R_c < 0.1$
02:12:23	8990DA	42.708	-128.141	30000	8	183.408	$R_c < 0.1$
02:12:24	76CD6D	49.231	-135.993	36000	10	101.246	$R_c < 0.1$
02:12:24	A2DD0C	44.716	-134.409	45000	9	137.269	$R_c < 0.1$
07:25:33	8991B9	35.871	149.156	38000	9	266.416	$R_c < 0.2$
07:25:35	8991B9	35.869	149.166	38000	9	266.356	$R_c < 0.2$
07:25:38	8991B9	35.865	149.153	38000	9	266.303	$R_c < 0.2$

从表格中可以看出, HPL 数值符合报文的水平容限要求。其中, NIC 为 8 还是 9 的判别取决于 NIC 附加子字段的数值, 该字段存储在报文的飞机状态消息当中, 由完好性指标的分析中可以发现, 接收到的状态消息该项字段都为 0, 根据表 3.4 的对应原则, NIC 取 8, 即 $R_c < 0.1$ 海里, 所以可以默认在 18.52-185.2m 范围内的 HPL 数值都符合 0.1 海里限制要求, 认为情况 1 的数据吻合度为 100%。

情况 2: 连续时间内的报文水平容限不统一, 仿真 HPL 数值波动也比较大, 部分满足限制要求, 如表 5.7 所示。

表 5.7 情况 2 数据示例

接收时间	飞机地址码	纬度/°	经度/°	高度/ft	可见星/颗	HPL/m	Rc/nm
00:30:00	884201	13.701	100.763	400	8	292.073	$Rc < 0.2$
00:30:01	780083	11.436	100.041	33000	8	261.029	$Rc < 0.1$
00:30:01	424324	17.046	97.046	35000	7	1745.004	$Rc \geq 20$
00:30:01	8840F8	10.720	100.388	21250	8	257.030	$Rc < 0.2$
00:30:02	780AA7	14.561	103.041	37000	8	180.815	$Rc < 0.1$
00:30:02	424324	17.042	97.051	35000	7	1744.759	$Rc \geq 20$
00:30:02	88044A	14.505	100.506	16850	7	1823.636	$Rc < 0.2$
00:30:03	461F4E	15.766	98.599	41000	7	1761.896	$Rc < 0.1$
00:30:03	881044	13.845	100.448	7175	8	145.376	$Rc < 0.1$

表中, 当 HPL 数值在 1800m 左右时, 虽不满足 $Rc \geq 20nm$ 的条件, 可是从图 5-9 可以发现, 接收到的报文中的水平容限 NIC 为 1-4 的情况几乎没有, 这是由于多数航空器 ADS-B 接收机编码时并不严格按照协议标准来划分, 超过一定限值便认为 $NIC=0$, 表示 Rc 水平误差过大或未知, 在这里, 可以认定 1 海里左右的 HPL 数值满足报文所提供的限制条件。该类情况接收数据多, 报文更新速率快, 数据丢失率较高, 所以接收位置的水平误差也会更高, 报文提供的水平容限与仿真 HPL 数值容易造成偏差, 以表格数据为例, 吻合度达 66.67%。

情况 3: HPL 数值与报文提供的水平容限差别较大, 如表 5.8, 该类情况认为报文提供水平容限与仿真结果不符, 数据吻合度为 0%。

表 5.8 情况 3 数据示例

接收时间	飞机地址码	纬度/°	经度/°	高度/ft	可见星/颗	HPL/m	Rc/nm
01:08:08	800728	17.269	77.953	9250	12	101.565	$Rc \geq 20$
14:47:25	E48C04	-22.815	-49.251	39000	5	2802.916	$Rc < 0.1$
21:14:32	780171	-2.179	115.871	35000	9	113.518	$Rc < 0.2$

仿照报文解析标准协议中水平容限的划分原则，将仿真求得的 HPL 数值归类成 0-11 的假定 NIC 数值，分类统计，统计结果如图 5-14 所示。

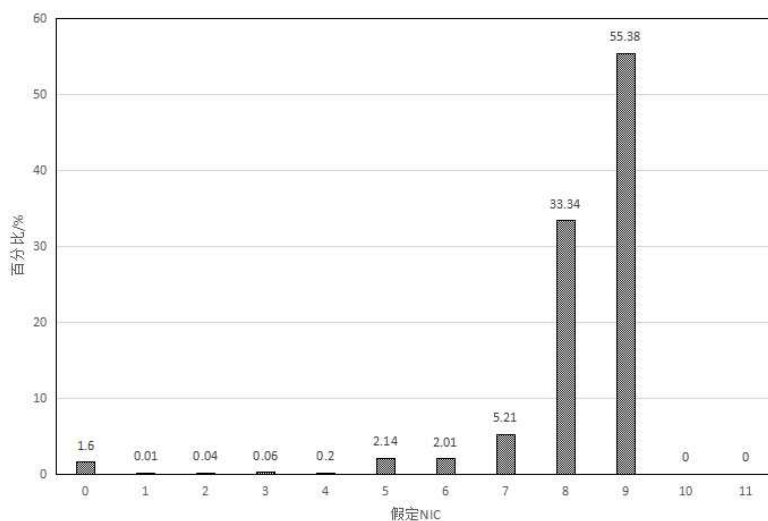


图 5-14 假定导航完整度类别信息分布

从假定的 NIC 分布图中可以看出， $NIC \geq 5$ 的航迹数据占总数的 98.08%，与报文中的 NIC 分布情况相仿，区别在于 NIC 数值集中于 9，与上文情况 1 类似，星基 ADS-B 报文将 18.52-185.2m 的水平误差区间都归结为 $R_c < 0.1$ 海里，对应 NIC 数值 8。

根据公式(3.17)，将仿真 HPL 数值与报文提供水平容限的吻合度以每小时为一时段进行统计，统计结果如图 5-15 所示。可以发现，数据吻合度在不同时段变化不一，普遍能达到 50% 以上。14-15h 出现明显不匹配的情况，可认为该时段报文数据有误，不能提供给用户使用。

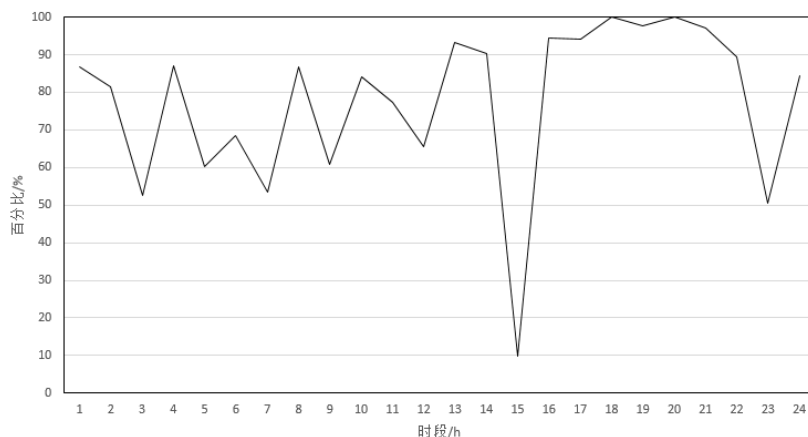


图 5-15 报文可用性分布情况

综上所述，MATLAB 仿真得到的 HPL 数值与报文提供水平容限的整体吻合度达 74.52%，可以认为星基 ADS-B 系统监视性能的可用性为 74.52%，不能满足所需监视

性能中 99.9%的可用性要求。可用性不理想的主要原因是数据丢包率过高，导致位置信息解码过程中奇偶编码匹配易出错，造成接收机水平容限提供有误。还有一个原因在于不同接收机给定水平容限的计算方法及评估参数不一，而且报文接收时间秒数采用线性插值求得，数据不精确，容易与本文仿真结果产生偏差。

5.4 本章小结

本章首先提出星基 ADS-B 系统评估的总体架构，然后依据第四章解析整理的报文数据，提取报文接收时间，计算总体消息、空中位置消息、空中速度消息和飞机 ID 类型消息的更新时间间隔；提取空中位置消息中的 NIC 指标，统计符合 ADS-B 监视服务位置完好性需求的报文数量，评价空中位置数据的完好性；选取符合完好性要求的航迹点数据，计算到航路中心线的水平偏差，运用统计学方法寻找航迹误差的分布规律，实现报文数据的准确性评估。最后采用 RAIM 算法，提取卫星历书文件和报文的接收时间、经纬度和高度信息，通过 MATLAB 软件仿真计算报文位置信息的可见星数目和 HPL 数值，与报文提供的水平半径保护容限 R_c 的范围区间进行比较，完成星基 ADS-B 系统的可用性评估。

第六章 总结与展望

一、工作总结

本文提出了星基 ADS-B 系统所需监视性能评估原理及指标,并根据指标要求,研究内容主要分为三个方面:ADS-B 数据解析与分类整理、监视性能指标评估和系统可用性评估。本文采集国防科技大学“天拓三号”微纳卫星接收的 ADS-B 报文信息,解析数据并统计接收数量,分别对报文的更新时间间隔、完好性和准确性三个指标进行分析评价,利用 RAIM 算法仿真报文接收位置点的水平限制,通过与报文提供限值的比较评估系统可用性。

本文的主要工作及进展如下:

1. 对 ADS-B 系统做简单介绍,并通过现有系统的不足引出星基 ADS-B 的优势,简述目前全球卫星系统的搭建情况。
2. 说明 TT3 星基 ADS-B 报文格式及解析原则,解析数据并提取相关信息,为后续指标分析提供数据基础。
3. 分别提取报文接收时间计算更新时间间隔;提取 NIC 指标进行数据完好性评估;提取空中位置消息的经纬度信息进行数据准确性评估,最后综合各项性能指标,利用 MATLAB 软件仿真 RAIM 算法来分析系统的可用性。

本文的创新点包括:

1. 建立星基 ADS-B 系统监视性能的评估方法,分别阐述更新时间间隔、数据完好性和准确性的指标要求,并依据整理后的数据对各个指标进行评估。
2. 仿照导航系统可用性的评估方法,提取卫星历书文件,仿真每个位置点的可见星数目和 HPL 数值,并与报文提供水平容限相比较,最终实现卫星系统的可用性评估。

二、未来研究方向及展望

本文初步实现了星基 ADS-B 系统监视性能的评估工作,由于卫星数量的限制,获取数据较少,丢失率较高,指标分析结果并不理想,后续通过项目的研究进展以及接收卫星数目的逐渐增加,主要可以完善以下几个方面:

1. 随着后期接受卫星数目的增多,逐步可以满足对航班的实时监视,若能获取一条完整航迹,便能采用卡尔曼滤波算法获取基准航迹,并完成航迹数据的跳点率和漏点率计算,实现报文数据的连续性评估。

2. 可以依据卫星移动轨迹来圈定不同时刻对地面的接收范围, 截取一定范围区间内的报文可以减小数据丢失所造成的影响, 实现更精确的更新时间间隔计算以及完好性、准确性等指标的评判。

3. 虽然卫星监视系统概念已提出了几年, 由于技术复杂, 实现困难, 国际上还尚未有对该系统的具体评估方法。随着后几年的技术与进步, ICAO、中国民航局等国际组织亦会出台星基 ADS-B 系统的全新指标要求, 供研究人员完成更详细的系统评估与改进。

致谢

研究生三年，转瞬即逝。回望这三年的学习时间，有所收获，有所失去，但我相信这都会成为我人生中的宝贵经验，在这里，我要对我的老师、同学、朋友和家人表示由衷的感谢。

首先，感谢我的导师赵巍飞教授，赵老师治学严谨，学识渊博。入学之初，便教导我们做研究要考虑实际问题，叮嘱我们认真阅读文献并作阅读笔记。我的研究方向是基于赵老师的项目下进行的，开题之初便提供给我大量的国外文献和参考数据，有助于我更快地熟悉专业知识并确定接下来的工作安排。在研究过程中，老师不断与我探讨问题，提供给我新思路，这三年时间里，我学到的不只是学术知识，更多的是独立思考问题、努力钻研并学以致用用的能力，在此，特别向不辞辛苦的赵老师致以崇高的敬意与感谢！

同时感谢同实验室的岳仁田老师、张勰老师和王红勇老师，三位老师认真负责，为我们树立了很好的榜样。张老师总是耐心解答我的各种问题，为我的研究课题提供了很多帮助；感谢负责项目的王洁宁老师，王老师为我解决了很多研究中遇到的困难，比如报文解析、指标选择等；感谢论文答辩的所有老师在论文开题和中期答辩时对我提出的不足和修改意见。

接下来感谢华闪闪、文思敏师姐和瞿也丰、王龙、龚铎、胡殿华师兄，对我的科研和生活给予了很多帮助。感谢万俊强、杨程凯、杨明泽、杨芮和武伟璐几位师弟师妹营造的良好的科研环境。

特别感谢同一师门的赵胖胖、刘伟、王运帷、王辉和贾天琪，感谢我的室友高经东、李诣和李海良，感谢裴一麟，三年时光他们给予我非常多的快乐与帮助，使我的研究生生活丰富多彩，难以忘怀。

最后感谢我的父母一直以来默默无闻的奉献与支持，让我知道不论什么时候总有一个温暖的港湾在静候着我，在此，深深祝福父母身体健康，开心快乐。

感谢所有的老师、同学和朋友！

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 2016年全国民航航班运行效率报告[R]. 北京: 中国民用航空局, 2017.
- [2] 中国民用航空局. 中国民用航空ADS-B实施规划(2015年第一次修订)[S]. 北京: 中国民用航空局, 2015.
- [3] 吴丹. 民航局将持续加强星基 ADS-B 技术研究[N]. 中国民航报. 2016-08-29(001).
- [4] Parkinson A. Space-based ADS-B: a small step for technology a giant leap for ATM[C]. Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. IEEE, 2011: 159-164.
- [5] Blomenhofer H, Rosenthal P, Pawlitzki A, et al. Space-based automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) payload for in-orbit demonstration[C]. Advance Satellite Multimedia Systems Conference. IEEE, 2012: 160-165.
- [6] Bettray A, Litschke O, Baggen L. Multi-beam antenna for space-based ADS-B[M]. 2013: 1-3.
- [7] Werner K, Bredemeyer J, Delovski T. ADS-B over satellite: Global air traffic surveillance from space[C]. Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. IEEE, 2014: 47-52.
- [8] Knudsen B G, Jensen M, Birklykke A, et al. ADS-B in space: decoder implementation and first results from the GATOSS mission[C]. Electronic Conference. IEEE, 2015: 57-60.
- [9] Garcia M A, Dolan J, Hoag A. Aireon's initial on-orbit performance analysis of space-based ADS-B[C]. Integrated Communication, Navigation, and Surveillance Conference. IEEE, 2017: 4A-1-4A-8.
- [10] Boci E, Thistlethwaite S. A novel big data architecture in support of ADS-B dataanalytic[C]. Integrated Communication, Navigation, and Surveillance Conference. IEEE, 2015: C1-1-C1-8.
- [11] Strohmeier M, Lenders V, Martinovic I, et al. Bringing up OpenSky: a large-scale ADS-B sensor network for research[C]. International Symposium on Information

- Processing in Sensor Networks. IEEE, 2014: 83-94.
- [12] Ali B S, Schuster W, Ochieng W, et al. Framework for ADS-B Performance Assessment: the London TMA Case Study[J]. Navigation, 2014, 61(1): 39-52.
- [13] Sun J, Ellerbroek J, Hoekstra J. Large-Scale Flight Phase Identification from ADS-B Data Using Machine Learning Methods[C]. International Conference on Research in Air Transportation. 2017.
- [14] Verbraak T L, Ellerbroek J, Sun J, et al. Large-scale ADS-B data and signal quality analysis[C]. USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar. 2017.
- [15] 陈利虎, 陈小前, 赵勇. 星载 ADS-B 接收系统及其应用[J]. 卫星应用, 2016(3): 34-40.
- [16] 刘计民, 张兆宁. 浅谈所需 CNS 性能及参数指标的发展[J]. 交通运输工程与信息学报, 2010, 8(1): 89-95.
- [17] 张军, 刘伟, 朱衍波. ADS-B 数据评估技术研究(英文)[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011(4): 76-82.
- [18] Lv Z, Wang L, Ni Y. Navigation data resource availability of ADS-B[C]. International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering. IEEE, 2011: 572-575.
- [19] 赵焱飞, 王晨, 王红勇. 基于 ADS-B 的航迹误差分布规律研究[J]. 中国民航大学学报, 2012, 30(6): 48-52.
- [20] 钟建华, 刘卫东, 王东东, 等. ADS-B 监视数据质量分析研究[J]. 西安航空学院学报, 2013, 31(3): 72-75.
- [21] 沈笑云, 唐鹏, 张思远, 等. ADS-B 统计数据的位置导航不确定类别质量分析[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 3128-3136.
- [22] ICAO Annex 10 Radio Navigation Aids Ed 6[S]. Canada, International Civil Aviation Organization, 2007.
- [23] 杜实. 空中交通监视服务[M]. 北京: 中国民航出版社, 2012: 29-32.
- [24] Strohmeier M, Martinovic I, Fuchs M, et al. OpenSky: A swiss army knife for air traffic security research[C]. Digital Avionics Systems Conference. IEEE, 2015.

- [25]Garcia M A, Stafford J, Minnix J, et al. Aireon space based ADS-B performance model[C]. Integrated Communication, Navigation, and Surveillance Conference. IEEE, 2015: C2-1-C2-10.
- [26]李国圣. 星载 ADS-B 系统性能分析及可行性研究[D]. 四川: 电子科技大学, 2015.
- [27]吴骏. 星载高灵敏度 ADS-B 接收机信号解算算法研究及实现[D]. 四川: 电子科技大学, 2016.
- [28]吴建军, 程宇新, 梁庆林, 等. 第二代铱星系统及其搭载应用[J]. 卫星应用, 2010(6): 25-29.
- [29]王洪全, 刘天华, 欧阳承曦, 等. 基于星基的 ADS-B 系统现状及发展建议[J]. 通信技术, 2017(11): 2483-2489.
- [30]刘宏志. 通信、导航与监视[M]. 天津: 中国民航大学出版社, 2011: 3-8.
- [31]ICAO DOC 9869 Performance-based Communication and Surveillance (PBCS) Manual Ed2[S]. Canada, International Civil Aviation Organization, 2016.
- [32]Thompson S D, Andrews J W, Harris G S, et al. Required Surveillance Performance Accuracy to Support 3-Mile and 5-Mile Separation in the National Airspace System[R]. Washington, D. C.: Federal Aviation Administration, 2006.
- [33]ICAO DOC 4444 PANS-Air Traffic Management[S]. Canada, International Civil Aviation Organization, 2016.
- [34]Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA). DO-260B Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squatter automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) [S]. Washington, D. C.: RTCA, 2009.
- [35]Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA). DO-181C Minimum Operational Performance Standards For Air Traffic Control Radar Beacon System/Mode Select (ATCRBS/Mode S) Airborne Equipment[S]. Washington, D. C.: RTCA, 2008.
- [36]阎芳, 马赞. 广播式自动相关监视系统适航要求和位置质量指标要求研究[J]. 航空维修与工程, 2013(4): 86-89.
- [37]中国民航局. 在无雷达区使用 1090 兆赫扩展电文广播式自动相关监视的适航和运行批准指南[S]. 北京: 中国民用航空局, 2010.

- [38]曹娜. 基于海量实测的 ADS-B 数据质量分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
- [39]孙达, 蒲英霞. 地图投影[M]. 南京: 南京大学出版社, 2012: 142-150.
- [40]蒋卫国, 王文杰, 李京. 遥感卫星导论[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 28-31.
- [41]唐鹏. 基于 ADS-B 数据监视性能评估技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2015.
- [42]Ni Y, Wang L, Wang K. Research on data resource availability of ADS-B based on GPS and Compass[C]. International Conference on Electronics, Communications and Control. IEEE, 2011: 1619-1622.
- [43]Ali B S, Schuster W, Ochieng W, et al. Analysis of anomalies in ADS-B and its GPS data[J]. GPS Solutions, 2016, 20(3): 1-10.
- [44]赵立都. BDS 完好性监测和可用性评估[D]. 陕西: 长安大学, 2016.
- [45]高翔宇. 基于 RAIM 的 ADS-B 防欺骗技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
- [46]郭睿, 唐波, 陈刘成. GPS 系统下 RAIM 算法可用性及结果分析[J]. 海洋测绘, 2007, 27(6): 40-44.
- [47]王鹏飞. 中国民航 RAIM 预测系统研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
- [48]彭良福, 郑超, 刘志刚, 等. 1090ES 广播式自动相关监视系统的 CPR 算法[J]. 中国民航大学学报, 2010, 28(1): 33-37.
- [49]PERRY G L W. SpPack: spatial point pattern analysis in Excel using Visual Basic for Applications (VBA) [J]. Environmental Modeling & Software, 2004, 19(6): 599-569.
- [50]何正风. MATLAB 在数学方面的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 170-172.
- [51]王红勇, 王晨, 赵巍飞. 基于 ADS-B 统计数据的航路安全间隔研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(2): 103-108.
- [52]ERIKSSON A, PREVE D, JUN Y U. Forecasting realized volatility using a nonnegative semiparametric time series model[J]. Research Collection School of Economics. 2010.
- [53]郭跃华, 朱月萍. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 169-174.
- [54]王梦丽, 陈华明, 王飞雪. GPS 历书数据的有效龄期[J]. 遥测遥控, 2007, 28(3): 31-35.
- [55]雷波, 李青, 李雄. 实时 GPS 卫星坐标计算方法[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(2): 444-446.

- [56]陈君. 基于 GNSS 完好性信息的 ADS-B 自主式防欺骗技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.

作者简介

个人资料:

姓名:	于克非	性别:	男
出生年月:	1993.02	籍贯:	天津
研究方向:	交通信息工程及控制	导师:	赵巍飞 教授

教育背景:

2015.09-至今	中国民航大学	空中交通管理学院	交通信息工程及控制	硕士
2011.09-2015.06	南开大学	计算机与控制工程学院	自动化	学士

参与科研项目:

国家重点研发计划项目	2016YFB0502400
------------	----------------

论文发表情况:

- [1] 于克非, 裴一麟. 基于 SNOPT 优化的交互式航迹规划软件设计[J]. 工业控制计算机. 2018(3): 59-61.
- [2] 赵巍飞, 于克非. 星基 ADS-B 监视数据空中位置信息质量分析[J]. 科学技术与工程. 已录用, 2018 年 5 月 18 日见刊.