

星基 ADS-B 系统发展现状调研报告

Release

作者： 刘通

审核： 苏志刚 教授

地点： 中国民航大学，天津

完成日期： 2019 年 2 月 3 日

文档作者联系方式：刘通（sunnyliutong@qq.com）。

本文档最佳浏览方式为 PC 端 pdf 文档阅读器，由于内部超链接较多，在阅读器上点击高亮超链接可以相互跳转（部分 pdf 阅读器不能对本文档中的超链接高亮显示，会影响阅读效果）。

目 录

第 1 章 ADS-B 系统简介	13
§ 1.1 ADS-B 系统的技术原理	13
§ 1.1.1 概述	13
§ 1.1.2 数据链类型	14
§ 1.2 ADS-B 系统的应用意义	14
§ 1.3 ADS-B 系统的发展现状	15
§ 1.3.1 国外应用现状	15
§ 1.3.2 国内应用现状	17
§ 1.3.3 技术发展现状	17
§ 1.4 全球 ADS-B 覆盖情况	17
§ 1.4.1 全球	17
§ 1.4.2 澳大利亚	18
§ 1.4.3 北美地区	18
§ 1.4.4 欧洲	20
§ 1.4.5 中国	24
§ 1.4.6 东南亚	26
第 2 章 星基 ADS-B 原理概述	31
§ 2.1 传统陆基 ADS-B 系统的不足	31

§ 2.2 星基 ADS-B 的实验背景	32
§ 2.3 星基 ADS-B 的工作原理	32
§ 2.4 星基 ADS-B 的应用意义	32
§ 2.4.1 安全性	32
§ 2.4.2 环境/效率	33
§ 2.4.3 可预测性和可靠性	33
第 3 章 现阶段发展及应用情况	35
§ 3.1 DLR 的 AOS 实验项目	35
§ 3.1.1 项目概述	35
§ 3.1.2 体系结构	36
§ 3.1.3 实验结果	36
§ 3.1.4 项目意义	38
§ 3.2 丹麦 GOMX 实验项目	40
§ 3.2.1 项目概述	40
§ 3.2.2 体系结构	42
§ 3.2.3 实验成果	44
§ 3.3 Aireon 星基 ADS-B 系统	45
§ 3.3.1 系统概述	45
§ 3.3.2 体系结构	48
§ 3.3.3 系统性能	50
§ 3.3.4 系统评价	51
§ 3.4 ALAS 系统	51
§ 3.4.1 系统概述	51

§ 3.4.2 体系结构	55
§ 3.4.3 系统性能	56
§ 3.4.4 系统评价	56
§ 3.5 “吕梁一号”微纳卫星	56
§ 3.5.1 项目概述 ²	56
§ 3.5.2 实验结果	58
第 4 章 系统面临的挑战	61
§ 4.1 卫星星座规模与数据价值	61
§ 4.2 信号强度	62
§ 4.3 调制方案	63
§ 4.4 静锥区	63
§ 4.5 报文冲突	66
§ 4.6 其他的考虑	67
第 5 章 总结	69

插图目录

图 1.1-1 ADS-B 系统工作原理 ³	13
图 1.4-2 全球陆基 ADS-B 覆盖情况 ⁴	17
图 1.4-3 澳洲 5000ft 空域覆盖范围 ⁵	18
图 1.4-4 澳洲 10000ft 空域覆盖范围 ⁶	18
图 1.4-5 澳洲 20000ft 空域覆盖范围 ⁷	18
图 1.4-6 澳洲 30000ft 空域覆盖范围 ⁸	18
图 1.4-7 美国陆基 ADS-B 覆盖情况 ⁹	19
图 1.4-8 预测的 ADS-B 全面实施后的覆盖率 ¹⁰	19
图 1.4-9 欧洲 ADS-B 地面监控系统的实施现状 ¹¹	20
图 1.4-10 欧洲各国现阶段飞机 ADS-B 终端装备情况 ¹²	21
图 1.4-11 欧洲 2020 年 ADS-B 地面监控系统实施计划 ¹³	22
图 1.4-12 欧洲 2020 年之后 ADS-B 地面监控系统实施计划 ¹⁴	24
图 1.4-13 中国 3300m 空域 ADS-B 覆盖情况 ¹⁵	25
图 1.4-14 中国 6600m 空域 ADS-B 覆盖情况 ¹⁶	25
图 1.4-15 中国 8400m 空域 ADS-B 覆盖情况 ¹⁷	26
图 1.4-16 印度尼西亚 ADS-B 基站布置情况 ¹⁸	27
图 1.4-17 印度尼西亚 ADS-B 覆盖情况模拟 ¹⁹	27
图 1.4-18 马来西亚 ADS-B 覆盖情况 ²⁰	28
图 1.4-19 马来西亚 ADS-B 基站监测数据 ²¹	28
图 1.4-20 泰国 20000 英尺及以上空域 ADS-B 覆盖 ²²	29
图 1.4-21 菲律宾马尼拉 ATM 中心 ADS-B 监控范围 ²³	30
图 2.3-1 星基 ADS-B 系统工作原理 ²⁴	33
图 3.1-1 单转换超外差接收机 ²⁵	36
图 3.1-2 Proba-V 卫星上搭载的 ADS-B 载荷 ²⁶	37
图 3.1-3 技术验证阶段的单颗卫星 ²⁷	37
图 3.1-4 未来全球卫星组网方案	37
图 3.1-5 AOS 在世界范围内记录的飞机航迹（2014 年 2 月 11 日） ²⁸	38

图 3.1-6 所有接收到的位置信息在天线覆盖区中的分布足迹 ²⁹	38
图 3.1-7 Proba-V 卫星天线辐射图 ³⁰	39
图 3.1-8 顶部安装的 L 波段天线的垂直天线辐射图 ³¹	39
图 3.2-9 GOMX-1 (GATOSS) 卫星 ³²	40
图 3.2-10 GOMX-3 卫星 ³³	41
图 3.2-11 GomSpace 的星载 ADS-B 概念图 ³⁴	43
图 3.2-12 GATOSS 上的 ADS-B 接收器框图 ³⁵	43
图 3.2-13 截至 2013 年 12 月 GATOSS 收到的几架飞机位置的初步图 ³⁶	44
图 3.2-14 GomX-3 在 2016 年 4 月的前六个月从国际空间站发布以来接收到的飞行中的飞机信号 ³⁷	45
图 3.3-15 第一代铱星星座系统 ³⁸	47
图 3.3-16 第二代铱星卫星	47
图 3.3-17 Iridium NEXT 上的 ADS-B 接收器 ³⁹	48
图 3.3-18 ADS-B 接收器搭载方式 ⁴⁰	48
图 3.3-19 Aireon 天基 ADS-B 系统布局原理 ⁴¹	49
图 3.3-20 Aireon 天基 ADS-B 系统架构 ⁴²	49
图 3.3-21 125W 功率下的全球覆盖范围 ⁴³	50
图 3.3-22 250W 功率下的全球覆盖范围 ⁴⁴	50
图 3.3-23 Aireon 的星基 ADS-B 覆盖三角冗余区域 ⁴⁵	51
图 3.4-24 ALAS 系统的飞行演示 ⁴⁶	52
图 3.4-25 ALAS 系统墨西哥湾上空的飞行演示 ⁴⁷	52
图 3.4-26 ALAS 于 2015 年 7 月 21 日的飞行演示 ⁴⁸	53
图 3.4-27 Globalstar 第二代卫星 ⁴⁹	54
图 3.4-28 依托 Globalstar 的 ALAS 系统体系结构 ⁵⁰	55
图 3.4-29 Globalstar 的双工网络全球覆盖范围 ⁵¹	56
图 3.5-30 天拓三号卫星主星吕梁一号 ⁵²	58
图 4.1-1 AOS 项目中接收到的中国丽江机场附近某架飞机的航迹 ⁵³	62
图 4.4-2 顶部安装的 L 波段天线的垂直天线辐射图 ⁵⁴	64
图 4.4-3 Proba-V 卫星天线辐射图 ⁵⁵	65
图 4.4-4 所有接收到的位置信息在天线覆盖区中的分布足迹 ⁵⁶	65
图 4.4-5 125W 功率下的全球覆盖范围 ⁵⁷	66
图 4.4-6 250W 功率下的全球覆盖范围 ⁵⁸	66
图 4.4-7 静锥区的影响 ⁵⁹	66
图 4.5-8 报文冲突 ⁶⁰	67

表格目录

表 1.3-1 部分有 ADS-B Out 装备要求和建议的国家 ⁶¹	15
表 3.1-1 DLR 的 AOS 项目基本描述	35
表 3.1-2 ESA 的 Proba-V 小卫星任务描述	36
表 3.2-3 GATOSS 卫星项目相关参数 ⁶²	41
表 3.2-4 GOMX-3 卫星项目相关参数 ⁶³	42
表 3.3-5 Aireon 星基 ADS-B 系统的利益攸关方	46
表 3.3-6 第二代铱星卫星基本参数	48
表 3.3-7 Aireon 星基 ADS-B 系统的性能	50
表 3.4-8 使用全球星卫星的 ALAS 系统端到端测试性能 ⁶⁴	57

缩写目录

ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, 广播式自动相关监视
1090ES	1090 MHz Extended Squitter, 1090 兆赫扩展震荡信标
978UAT	978 MHz Universal Access Transceiver, 978 兆赫通用访问收发机
VDL Mode4	Mode 4 Very High Frequency, 模式 4 甚高频
ICAO	International Civil Aviation Orgnaizition, 国际民航组织
ETSI	European Telecommunication Standards Institute, 欧洲电信标准协会
GPS	Global Position System, 全球定位系统
IFR	Instrument Flight Rules, 仪表飞行规则
FL	Flight Level, 飞行高度层
MTOW	Maximum Take-Off Weight, 最大起飞重量
TMA	Terminal Control Area, 终端控制区
NAS	National Airspace System, 国家空域系统
FAA	Federal Aviation Administration, 联邦航空局
ANSP	Air Navigation Service Provider, 空中导航服务供应商
ADS-C	Automatic Dependent Surveillance-Contract, 合同式自动相关监视
ATC	Air Traffic Control, 空中交通管制
SESAR	Single European Sky ATM Research, 单一欧洲天空计划
LOS	Line of Sight, 视距
ATS	Air Traffic Service, 空中交通服务
ATM	Air Traffic Management, 空中交通管理
MLAT	Multilateration, 多点定位

NATS	National Air Traffic Service, 空中交通局（英国）
WAM	Wide Area Multilateration, 广域多点定位
CAAC	Civil Aviation Administration of China, 中国民用航空总局
FIR	Flight information area, 飞行情报区
AEROTHAI	Aeronautical Radio of Thailand, 泰国航空无线电有限公司
CAAT	Civil Aviation Authority of Thailand, 泰国民航管理局
CNS	Communication/Navigation/Surveillance, 通信/导航/监视
DCPC	Direct Controller Pilot Communication, 管制员驾驶员直接通信
NRA	Non-Radar Area, 非雷达空域
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 德国航空航天中心
LEO	Low Earth Orbit, 低地球轨道
AOS	ADS-B over Satellite
IOD	In-orbit demonstrator, 在轨演示器
DF	Downlink Format, 下行格式
ESA	European Space Agency, 欧洲航天局
TID	Total Ionizing Dose, 总电离剂量
IF	Intermediate Frequency, 中频
ADC	Analog to Digital Converter, 模数转换器
FPGA	Field Programmable Gate Array, 现场可编程门阵列
PPP	Public Private Partnership, 公私合作伙伴关系
AIS	Automatic Identification System, 自动识别系统

第 1 章

ADS-B 系统简介

S 1.1 ADS-B 系统的技术原理

S 1.1.1 概述

ADS-B 技术是现代空中交通管理中一项非常重要的监视手段，该项监视技术无需地面设备询问，它以自动广播的方式，按照固定的频率向其它航空器或者地面空中交通管制中心广播飞机的状态信息，这些信息是通过一定的渠道从飞机本身或者卫星设备上获取的，通常这些信息由飞机呼号、位置、高度、速度和航向等信息组成。ADS-B 的信息以报文形式传输，通过空-空、空-地数据链广播式传播。

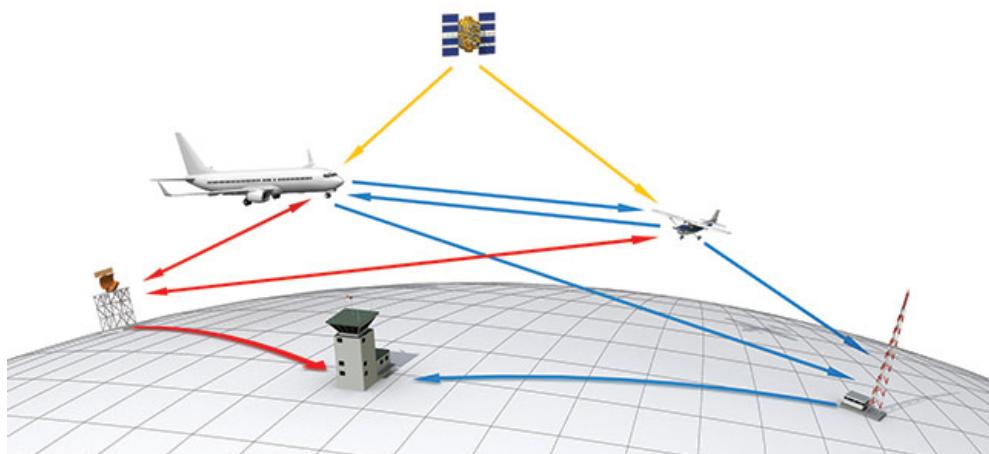


图 1.1-1 ADS-B 系统工作原理¹

ADS-B 分为两个部分：ADS-B In 和 ADS-B Out。ADS-B In 是系统的接收部分，负责接收 ADS-B 信息；ADS-B Out 是安装有发射器的面板，负责向其他飞机和地面站发送信号，这将告诉其他飞机和地面站本飞行器的位置、速度和航向等信息。注意 ADS-B Out 设备是始终安

¹ 图片来源：<https://www.aopa.org/advocacy/advocacy-briefs/>

装在飞机上的并且需要经过认证，这个设备不可拆卸。这样做的目的是为了防止在未授权的情况下，人为关闭 ADS-B 等其他监视跟踪设备，致使无法追踪飞机位置，导致像马来西亚航空 MH370 航班那样的事故。

S 1.1.2 数据链类型

为了避免频率过载，ADS-B 可以使用不同的数据链以使用不同的频率收/发数据。目前可以支持 ADS-B 技术的数据链主要有三种，分别是基于 S 模式的 1090ES 数据链、978UAT 数据链和 VDL Mode4 数据链。这三种数据链技术各有优缺点，当前美国同时使用 1090ES 和 978UAT 数据链，欧洲同时使用 1090ES 和 VDL Mode4 数据链，而澳大利亚仅使用 1090ES 数据链。目前只有 S 模式 1090ES 数据链获得国际无线电组织的批准，同时国际民航组织对 1090ES 数据链的支持力度最大，标准也最完善。你可以拥有多种 ADS-B 产品：仅 978 In、978 In&Out、仅 1090ES Out 等等。

1090ES 数据链

1090ES 是一个使用扩展震荡信标的改进的 S 模式转发器（使用转发器的 1090MHz 频率），使用高度要超过 18000 英尺。

978UAT 数据链

在美国，18000 英尺以下的高度层使用这种数据链，它在 978MHz 上传输，在技术上称为通用访问收发机。

VDL Mode4 数据链

模式 4 甚高频数据链是经 ICAO 和 ETSI 标准化的甚高频数据链技术，用于提供移动基站（飞行器和机场地面车辆）、移动单元和固定基站之间的数字通信，它的传输频率在 25 kHz^[42]。

S 1.2 ADS-B 系统的应用意义

当前世界范围内空中交通流量与密度不断增加，在未来的几十年内，随着无人机的普及，有人驾驶飞机和无人机都需要在同一片空域正常且无冲突地运行。下一代空中交通管理系统是处理空中流量爆发式增长和保证数十亿乘客安全的关键所在。ADS-B 是这一关键的核心技术，它的出现，将大幅提升航行监视系统的态势感知能力。当前我国民航空中监视系统的中流砥柱是二次雷达，这种基于传统通信模式的的监视设备一般可以报告飞机的身份识别代码、高度代码、飞机地址等信息，由于消息长度限制，不能提供位置完整性报告。为了保持空中交通的效率，同时保证安全，需要提供更精确的监测系统和消息的完整性，ADS-B 可以克服当前雷达系统的局限性并提高其监视性能，增加空域容量，在无法部署雷达的内陆地区，ADS-B 能为飞机提供优于雷达间隔标准的虚拟雷达管制服务；在有雷达覆盖地区，在不增加雷达设备的情况下，能够以较低代价辅助现有雷达系统。ADS-B 系统并非一个独立的监视系统，它对外部系统的高度依赖，比如 GPS 系统将为其提供位

置报告，正因为此，ADS-B 的监视精度可以提高至 10 米量级，监视数据更新速度可达 1 秒 1 次。另外，ADS-B 技术成本较低，其地面站建设成本是传统二次雷达的九分之一。ADS-B 技术将为传统空管监视领域带来重大变革。

§ 1.3.3 ADS-B 系统的发展现状

国际民航组织于第十一届航行大会确定 ADS-B 技术为全球新航行技术的主要发展方向，目前全球各国都在不懈推广 ADS-B 技术的应用。目前对 ADS-B Out 进行强制装备或建议装备的国家越来越多^[41]，部分有 ADS-B Out 装备要求和建议的国家见表 1.3-1。

表 1.3-1 部分有 ADS-B Out 装备要求和建议的国家²

美国	美国联邦航空局已要求在 2020 年 1 月 1 日之后所有飞机需要装备 ADS-B Out，目前大部分空域需要装备 C 模式转发器。有一个重要的例外情况：在墨西哥湾以上的某个空域也需要 ADS-B。目前，只有美国允许将 978UAT 数据链路用于 ADS-B Out。如果计划在美国以外的 ADS-B 空域飞行，则需要使用 S 模式 1090ES 数据链路
澳大利亚	所有 IFR 飞行都需要 1090ES。2020 年 6 月 6 日之前，配备转发器的外国注册飞机在飞行高度低于 FL290 时免于装备 1090ES
加拿大	目前没有要求，但自愿装备 1090ES（特别是在哈德逊湾和附近的海洋空域）的运营商可以获得更高水平的服务。NAV CANADA 是 Aireon 联合空中交通监控机构的一部分，在低地球轨道卫星上安装 ADS-B 设备。NAV CANADA 将在 2018 年提供服务时成为启动客户，并且最初打算将 1090ES ADS-B 纳入北大西洋空域
欧洲	MTOW 超过 12566 磅，或最大巡航速度超过 250 节的 IFR 飞机需要装备 1090ES，对于新生产的飞机要求强制装备，并且必须在 2020 年 6 月 7 日之前对所有飞机进行改装
香港	所有空域 FL290 及以上需要 1090ES
印度尼西亚	FL290 及以上需要 1090ES
墨西哥	从 2020 年 1 月 1 日开始，在平均海平面 10000 英尺以上 A、B、C、E 级空域以及其他指定的空域需要 1090ES；目前要求在墨西哥湾的 E 级空域和墨西哥海岸 12 海里以内平均海平面 3000 英尺以上需要 1090ES
新加坡	指定的航空公司需要 1090ES
斯里兰卡	Colombo 的 TMA，FL290 及以上需要 1090ES
台湾	所有空域 FL290 及以上需要 1090ES
越南	指定的航空公司需要 1090ES

§ 1.3.1 国外应用现状

目前欧美等航空发达国家已制定本国和本地区的 ADS-B 实施规划，建立相关的规章和标准，开展验证与应用。

² 数据来源：<https://www.aopa.org/go-fly/aircraft-and-ownership/ads-b/where-is-ads-b-out-required>

北美地区

在国外，美国是最先开展 ADS-B 技术研究和应用的国家之一，是美国 NextGen 计划的基础之一，帮助飞行员和空中交通管制员创建一个更安全、更高效的 NAS。美国的 ADS-B 应用路线是：先通用航空，后商用运输。目前，在通用航空方面，美国已经完全实现使用 ADS-B 技术来为自己的航空器提供监视服务。

2016 年 9 月，FAA 开始提供 500 美元奖励，以帮助通用航空运营商支付 ADS-B 设备和安装费用，并鼓励他们现在就装备。

FAA 要求在 2020 年之前，所有在受控空域飞行的飞机都必须安装有 ADS-B OUT，而对 ADS-B IN 的安装没有强制要求。

2016 年，FAA 与墨西哥的空中交通服务提供商 SENEAM 合作，使用合资建立的 ADS-B 地面站扩展在墨西哥湾上空的 ADS-B 监视覆盖水平。新的地面站有助于飞行器飞过美国和墨西哥之间的墨西哥湾。

墨西哥的其他地面站对于空中交通路线提供无缝监控覆盖，使海湾地区的容量从每小时 75 架增加到约 85 架。到 2035 年，这些地面站将为美国-墨西哥领空边界提供更多的海湾航班，从而为运营商节省 7000 万美元。增加容量可减少高峰期的延误，从而节省飞机运营成本和乘客时间。

FAA 正在开发 Interval Management，这是一套借助 ADS-B 的能力对航班进行排队和分配的应用软件。间隔管理的精确间距可以在拥挤的空域内实现更高效的飞行路径，并最大限度地提高空域和机场利用率。这些功能需要新的航空电子设备、地面自动化、决策支持系统和程序。FAA 也在探索 ADS-B 在越来越多的商用太空飞行器发射方面的能力。FAA 也在和运营商和其他的 ANSP 合作，以评估向海洋空域的管制方提供 ADS-B 数据潜在利益。减少分离标准的替代方法包括使用 ADS-B 或使用增强版本 ADS-C。

澳大利亚

澳大利亚的 ADS-B 应用水平也达到了很高的程度，该国地广人稀，雷达监视系统建设部署比较薄弱，鉴于这种情况，澳大利亚开始投资部署 ADS-B 系统以配合为数不多的航管雷达设备。

欧洲

欧洲各国 ADS-B 应用水平也在大力推进，当前位于欧洲中部的 OpenSky 感知网络的 ADS-B 系统可以捕捉到欧洲大约 30% 的商业航班，其监视能力相当可观。ADS-B 也是 SESAR 的基石，欧盟（欧洲共同体和欧控）是 SESAR 的创始人。

欧洲 ADS-B 实施计划要求从 2015 年起，质量大于 5700kg 或速度超过 250 节的新飞行器当在以 IFR 下飞行时要装备 ADS-B Out，已经运营的飞机从 2017 年底开始进行改装，在 2020 年 ADS-B 监视系统需要开始运作^[36]。

§ 1.3.2 国内应用现状

在 ADS-B 技术的研发应用方面，中国民航紧跟国际发展动态，努力与世界接轨。当今 ADS-B 监视技术已在中国民航处于实用阶段，截至 2014 年底，中国民航全行业运输飞机注册架数已达 2370 架，部分已完成 1090ES ADS-B OUT 机载设备加改装。中国民航在西部高原地区实施了 B213 航路（成都-拉萨）ADS-B 试验工程和试验运行，并缩小了航路间隔；在 B330 成都-九寨航路、南中国海开展了 ADS-B 试验验证工作。2015 年，中国民用航空 ADS-B 实施规划颁布，是指导中国民航 ADS-B 实施的纲领性文件。

§ 1.3.3 技术发展现状

在硬件设备的发展上，由于 ADS-B 非独立监视的特性，就像接收广播一样，只要找到合适的设备，用户就可以通过各种渠道接收 ADS-B 信号，由于其技术门槛与成本相对较低，所以 ADS-B 技术目前被广泛推广。在硬件方面，虽然商用 ADS-B 接收器比较昂贵，但是相较于雷达这种高度精密的设备，其成本也大大降低了。事实上，目前通过一些廉价的接收设备，比如数字电视棒，也可以接收 ADS-B 信号。国内外许多厂家也推出了廉价的 ADS-B 接收设备，例如 RTL-SDR、AirNav RadarBox、三航雷达等。目前国内在民航局政策与标准引导下，工业界已基本具备 ADS-B 设备产业化能力。

§ 1.4 全球 ADS-B 覆盖情况

本小节将介绍世界上几个典型的国家和地区的 ADS-B 实施情况。

§ 1.4.1 全球

全球 ADS-B 覆盖情况如图 1.4-2 所示。

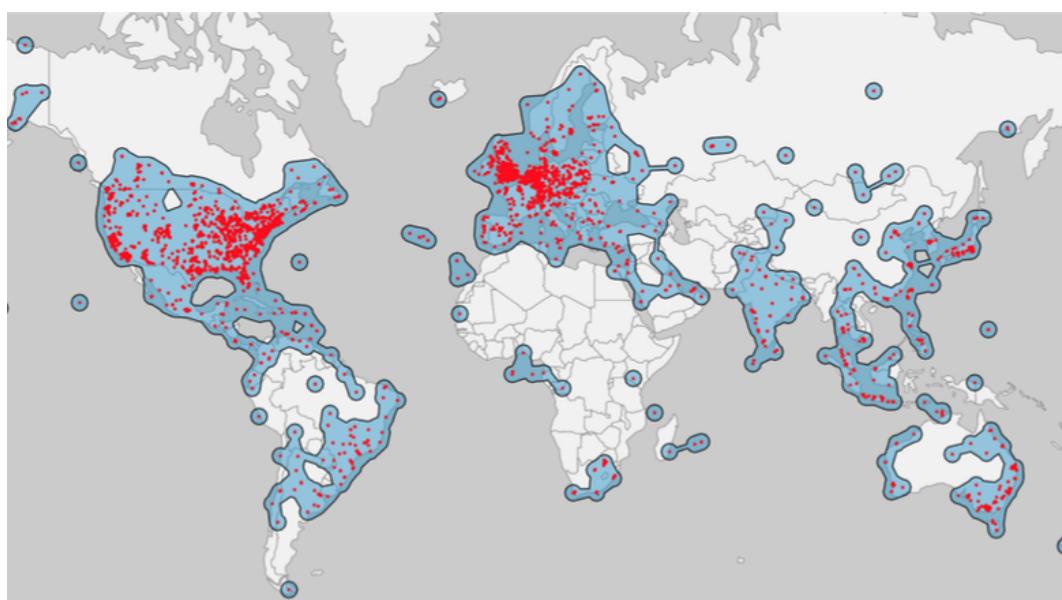


图 1.4-2 全球陆基 ADS-B 覆盖情况³

§ 1.4.2 澳大利亚

ADS-B 地面站是 LOS⁴设施，地面站接收下行 ADS-B 数据的能力取决于飞机的高度、飞机与地面站的距离以及障碍物。在海拔较低的低空区域（接近地面），覆盖范围在距离地面站 20 海里半径内，高空空域覆盖半径可以超过 250 海里。

在雷达覆盖范围与 ADS-B 覆盖范围重叠的空域，雷达探测到的飞机位置将会提交给 ATC。

截至 2017 年 1 月，澳大利亚纯 ADS-B 覆盖区域如图 1.4-3、1.4-4、1.4-5、1.4-6 所示，澳大利亚 30000 英尺以上高空已实现 ADS-B 密集覆盖，航路管制间隔已缩至 5 海里水平。

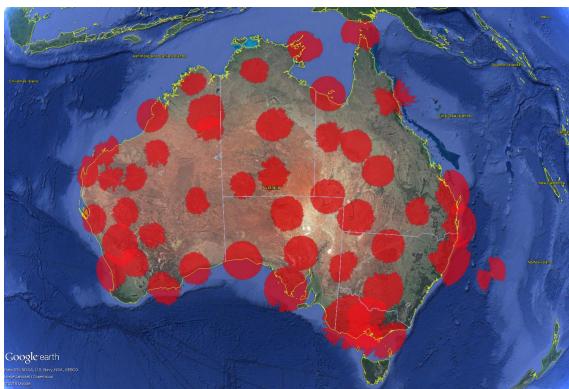


图 1.4-3 澳洲 5000ft 空域覆盖范围⁵

图片来源: <http://www.airservicesaustralia.com/projects/ads-b/ads-b-coverage/>

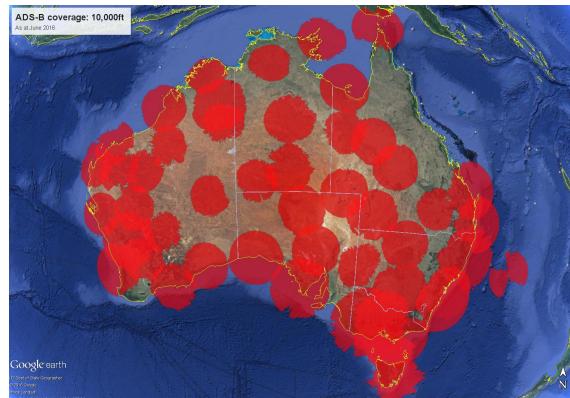


图 1.4-4 澳洲 10000ft 空域覆盖范围⁶

图片来源: <http://www.airservicesaustralia.com/projects/ads-b/ads-b-coverage/>

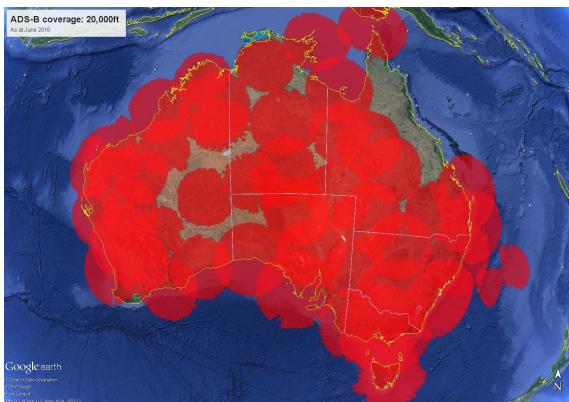


图 1.4-5 澳洲 20000ft 空域覆盖范围⁷

图片来源: <http://www.airservicesaustralia.com/projects/ads-b/ads-b-coverage/>

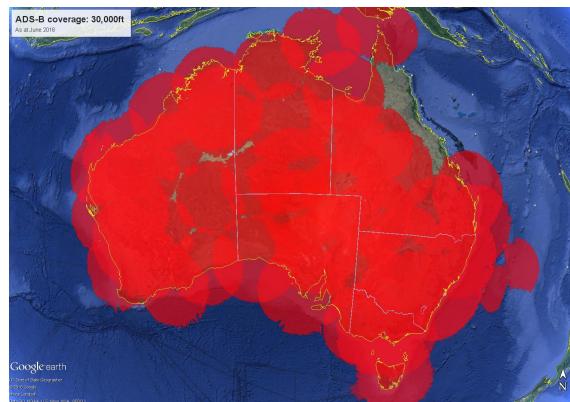


图 1.4-6 澳洲 30000ft 空域覆盖范围⁸

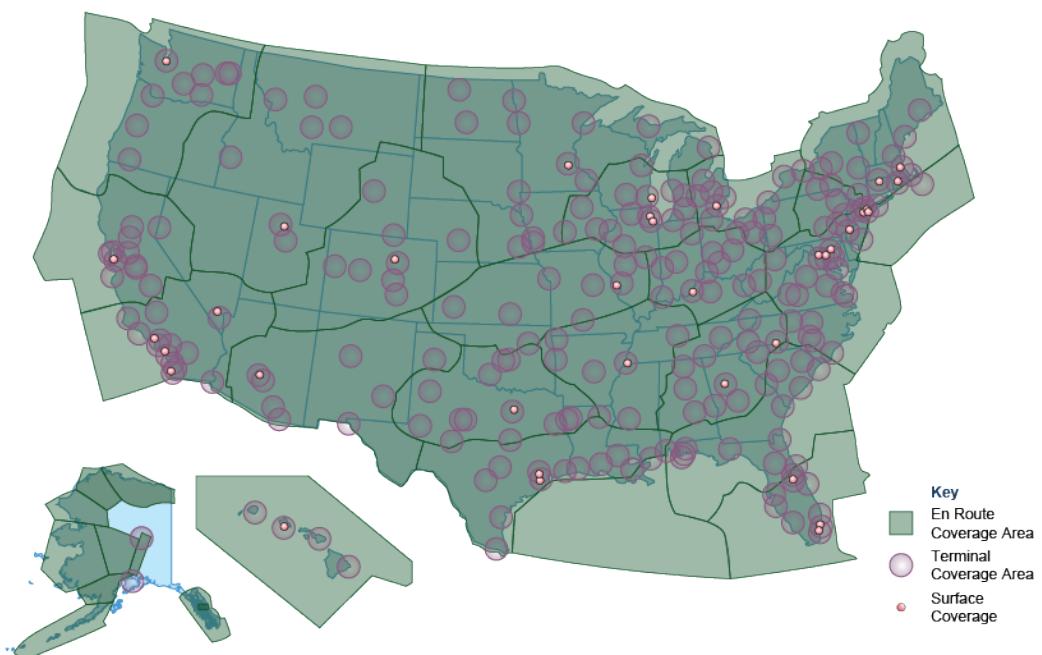
图片来源: <http://www.airservicesaustralia.com/projects/ads-b/ads-b-coverage/>

§ 1.4.3 北美地区

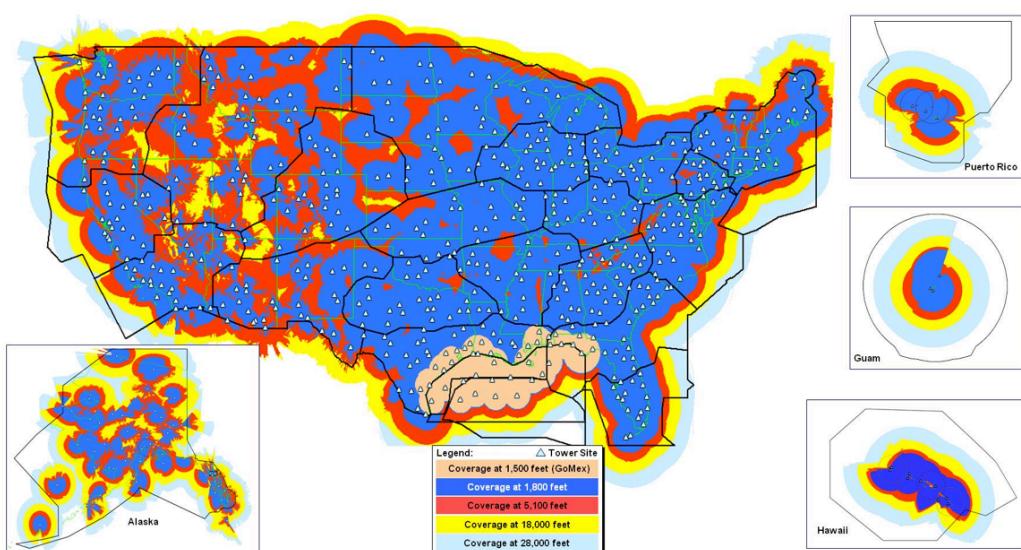
截至 2017 年 4 月，ADS-B 在美国全境的覆盖情况如图 1.4-7 所示。

⁵ 图片来源: <https://jdasolutions.aero/blog/ads-b-update-bits-information-around-world/>

⁶ 通常指波的传播路径为直线，不能沿曲线或者跨障碍物行进

图 1.4-7 美国陆基 ADS-B 覆盖情况⁹

根据美国麻省理工学院 2011 年 6 月的一份报告^[16] 显示，预计 ADS-B 在美国全面实施后其覆盖情况如图 1.4-8 所示。

图 1.4-8 预测的 ADS-B 全面实施后的覆盖率¹⁰

更为详细的 ADS-B 覆盖情况可以在 FAA 网站¹¹上查询，它提供了一个动态的可交互式的 ADS-B 覆盖范围查询网页。

⁹ 图片来源：Corporate Fleet Service (CFS)，<http://cfsjets.com/2017/12/14/ads-b-where-we-are-now/>

¹⁰ 图片来源：参考文献 [16, 17]

¹¹ <https://www.faa.gov/nextgen/programs/adsb/>

§ 1.4.4 欧洲

现阶段

- 地面段 ADS-B（基站部署）- 空域和机场监视

2018 年 5 月 15 日的 SESAR 关于欧洲 ADS-B 系统建设的阶段性报告展示了欧洲 ADS-B 系统的相关情况^[18]。

图1.4-9显示了欧洲 ADS-B 监控系统的实施现状、相关覆盖范围，以及 ATM 系统中相关监控数据的集成水平。

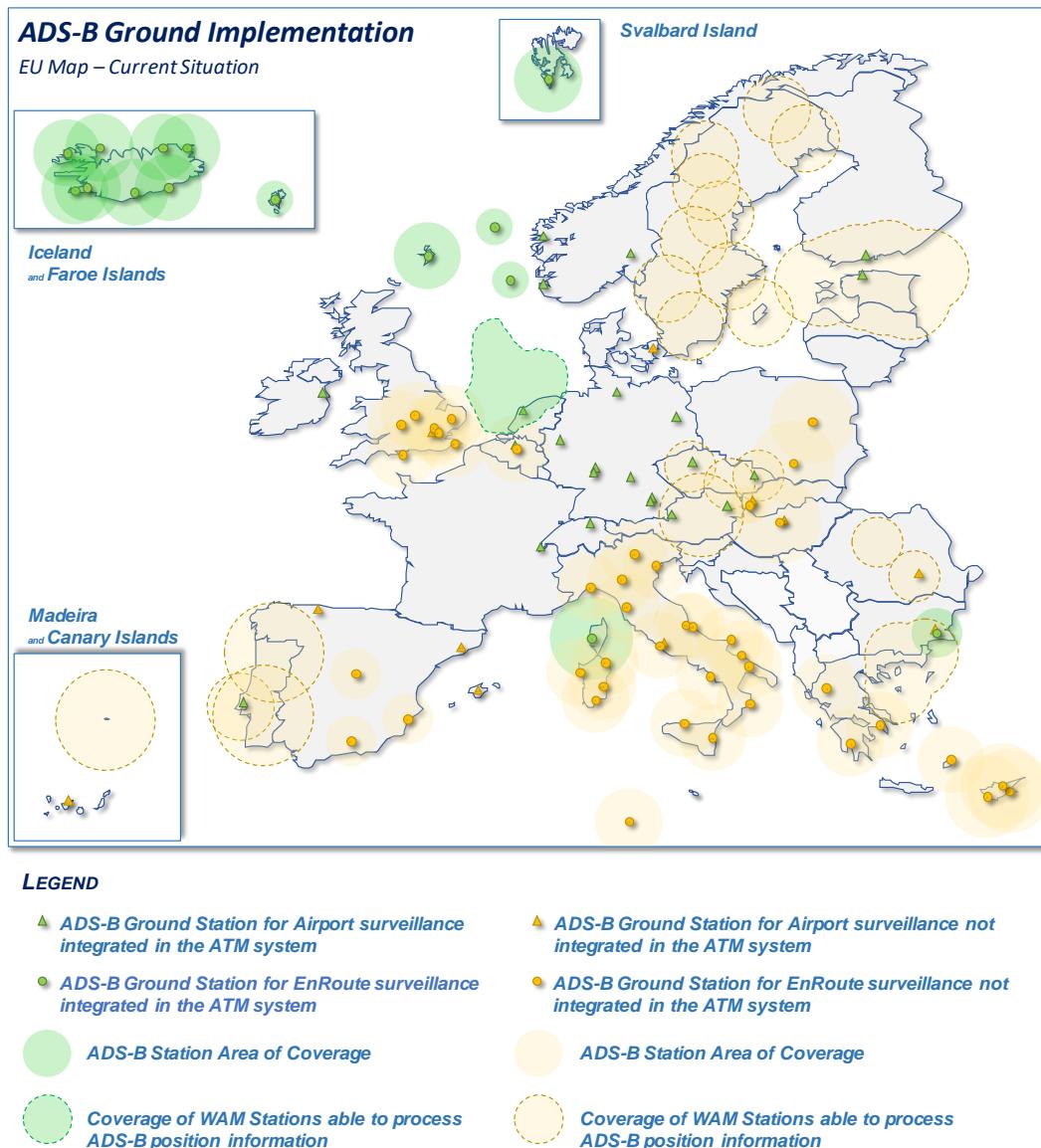


图 1.4-9 欧洲 ADS-B 地面监控系统的实施现状¹²

- 空域 ADS-B 监视

欧洲 ADS-B 接收机的安装现状比较零散。总共安装了 70 多个具备航路 ADS-B 监控

¹² 图片来源：参考文献 [18]

能力的基站，其中约 90% 在运行中，其余 10% 用于测试和验证。现有 ADS-B 站的剩余平均寿命为 12 年。

- 机场 ADS-B 监视

用于机场监控的 ADS-B 系统非常广泛，目前，欧洲共安装了 34 个机场 ADS-B 站：其中 23 个被集成到 ATM 系统中，11 个没有被集成到 ATM 系统中，但计划将它们与 MLAT 系统集成。机场 ADS-B 在与 ATM 系统集成时，无论是否与 MLAT 结合，都只用于地面车辆的识别和定位数据，因为数据质量要求没有飞机那么严格。现有 ADS-B 站的剩余平均寿命为 8 年。

• 空中段 ADS-B（机上终端）

图1.4-10显示了符合 ADS-B ED-102A (DO-260B) 规定的 ADS-B 应答器的实施现状，该应答器共装备于 35 家总部位于欧盟的航空公司的共 3108 架飞机上。

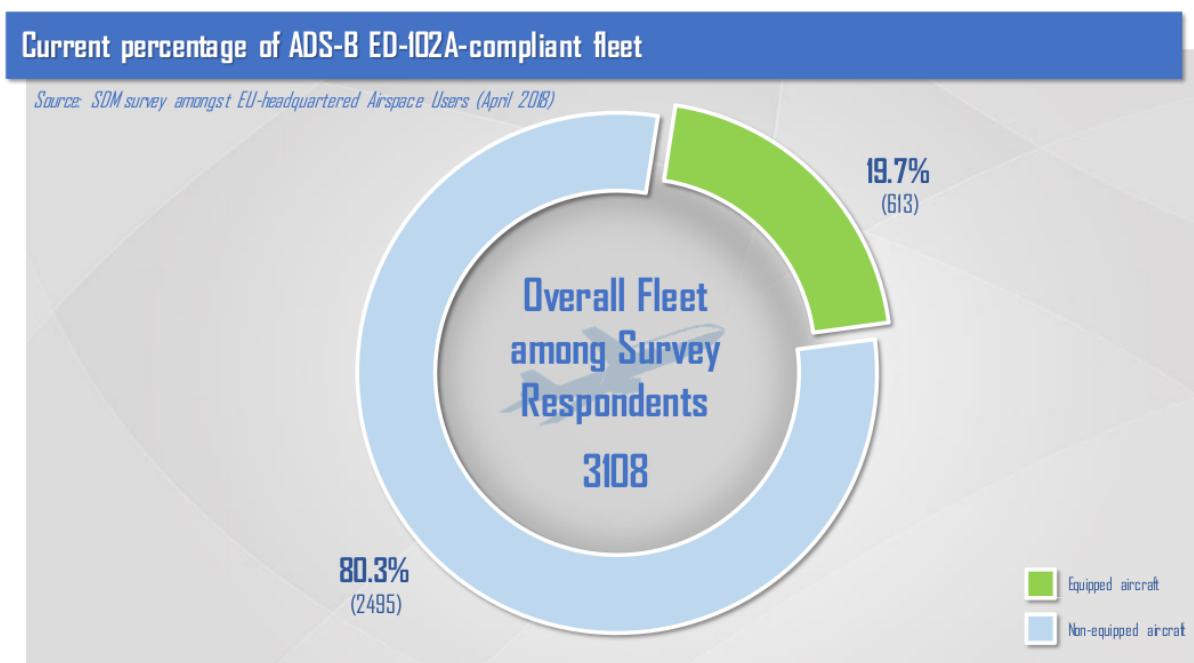


图 1.4-10 欧洲各国现阶段飞机 ADS-B 终端装备情况¹³

• 星基 ADS-B

关于星基 ADS-B 信息的地面使用情况，28 家 ANSP 在回答问卷时表示，15 家 ANSP 没有使用星基 ADS-B 数据的计划，而 13 家 ANSP 表示，一旦服务可用，他们正在考虑使用该数据。

NATS 和 NAV CANADA 计划在 2019–2020 年期间在北大西洋和加拿大部署星基 ADS-B (Aireon)。一些欧洲的 ANSP 计划从 2019 年第一季度开始使用它。

¹³ 图片来源：参考文献 [18]

2020 年及以后

- 2020 年地面段 ADS-B（基站部署）- 空域和机场监视

图1.4-11显示了利益攸关方在全欧洲实施 ADS-B 监控系统的短期计划。特别是，该图包括所有预计在 2020 年之前安装和/或运行的 ADS-B 系统。

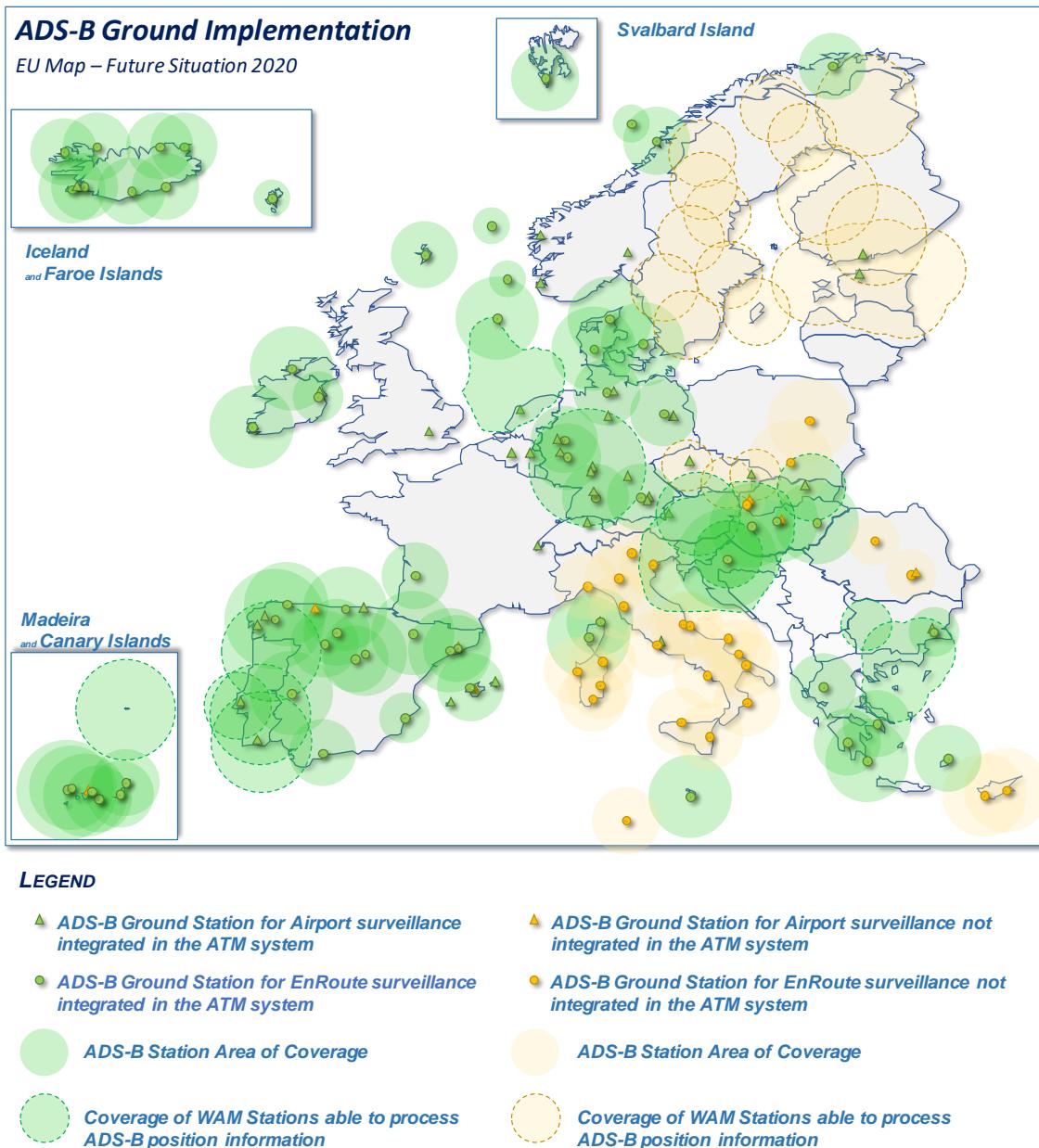


图 1.4-11 欧洲 2020 年 ADS-B 地面监控系统实施计划¹⁴

- 空域 ADS-B 监视

未来欧洲 ADS-B 接收机的安装情况显示，采用 ADS-B 的趋势越来越明显。在 ANSP 的投资计划中，总共有 60 多个具备 ADS-B 能力的航路监测站。值得强调的是，由 WAM 或 ADS-B 基站顶部的 S 模式雷达将提供大量计划中的 ADS-B 功能。

¹⁴ 图片来源：参考文献 [18]

ADS-B 基站的典型寿命为 15-18 年。

- 机场 **ADS-B** 监视

作为上述投资的补充, ANSP 和机场运营商计划在 2018 年至 2020 年间安装/更新大约 25 个 ADS-B 站, 用于机场监控。这些监测站将补充和/或取代现有的基础设施, 并将扩大 ADS-B 在欧洲机场的覆盖范围。

在短期内, ADS-B 基础设施将继续集成到 ATM 系统中, 首先跟踪车辆的位置, 然后将其增强到飞机上。从 2018 年起, 现有 ADS-B 站的剩余平均寿命为 15 年。

• 2020 年以后地面段 **ADS-B** (基站部署) - 空域和机场监视

图1.4-12补充了前一段展示的短期规划, 包括业务利益相关者在未来数年实施 ADS-B 监测系统的长期计划。特别地, 该图包括了所有 ADS-B 系统, 预计从 2021 年开始安装和运行。

- 空域 **ADS-B** 监视

与 2020 年的情况相比, 欧洲的 ADS-B 前景略有改善, 计划在航线上安装几个具有 ADS-B 能力的监测站。

西班牙计划增加新的 ADS-B 站, 覆盖南部空域(通过在新安装的 S 模式雷达内集成 ADS-B 接收器)。另一方面, 意大利和捷克共和国将在业务上使用 ADS-B 数据, 从而将信息集成到 ATM 系统中。最后, 一个能够接收 ADS-B 数据的额外 WAM 站将覆盖芬兰东部领空, 但是没有将这些信息纳入 ATM 系统。

- 机场 **ADS-B** 监视

为配合上述情况, 机场服务供应商及机场运营商计划于 2021 年至 2030 年期间安装/更新 6 个 ADS-B 监测站, 进行机场监察。这些监测站将补充和/或取代现有的基础设施, 并将扩大 ADS-B 在欧洲的覆盖范围。从 2018 年起, 现有 ADS-B 站的剩余平均寿命为 16 年。

• 空中段 **ADS-B** (机上终端)

在未来, 各主要航空公司正计划顺应规定对新飞机安装 ADS-B, 而对现有飞机进行“翻新计划”的情况则有所不同。欧盟可能决定将 2020 年至 2025 年的过渡期延长 5 年, 并进一步豁免 2025 年之前退役的飞机, 由此引发的预期进一步放大了这一设想, 导致该法规再次修订。

除欧盟和美国外, ADS-B Out (DO-260B 应答器) 在中国、澳大利亚或日本等其他国家也有或将被授权使用。

• 星基 **ADS-B**

一些 ANSP 正在考虑基于 ADS-B 的空间服务, 并且正在进行调查(基于 Aireon 的服务可用性)。三家 ANSP 正计划使用基于空间的 ADS-B。在意大利, 星基 ADS-B 系统将集成在 ATS 测试平台上, 预计 2020 年后的业务用途将作为地面独立的 ATS 监视层, 用于应急和增强监视。中期而言, 这可能是传统监控基础设施全球优化的一部分。

¹⁹ 图片来源: 参考文献 [18]

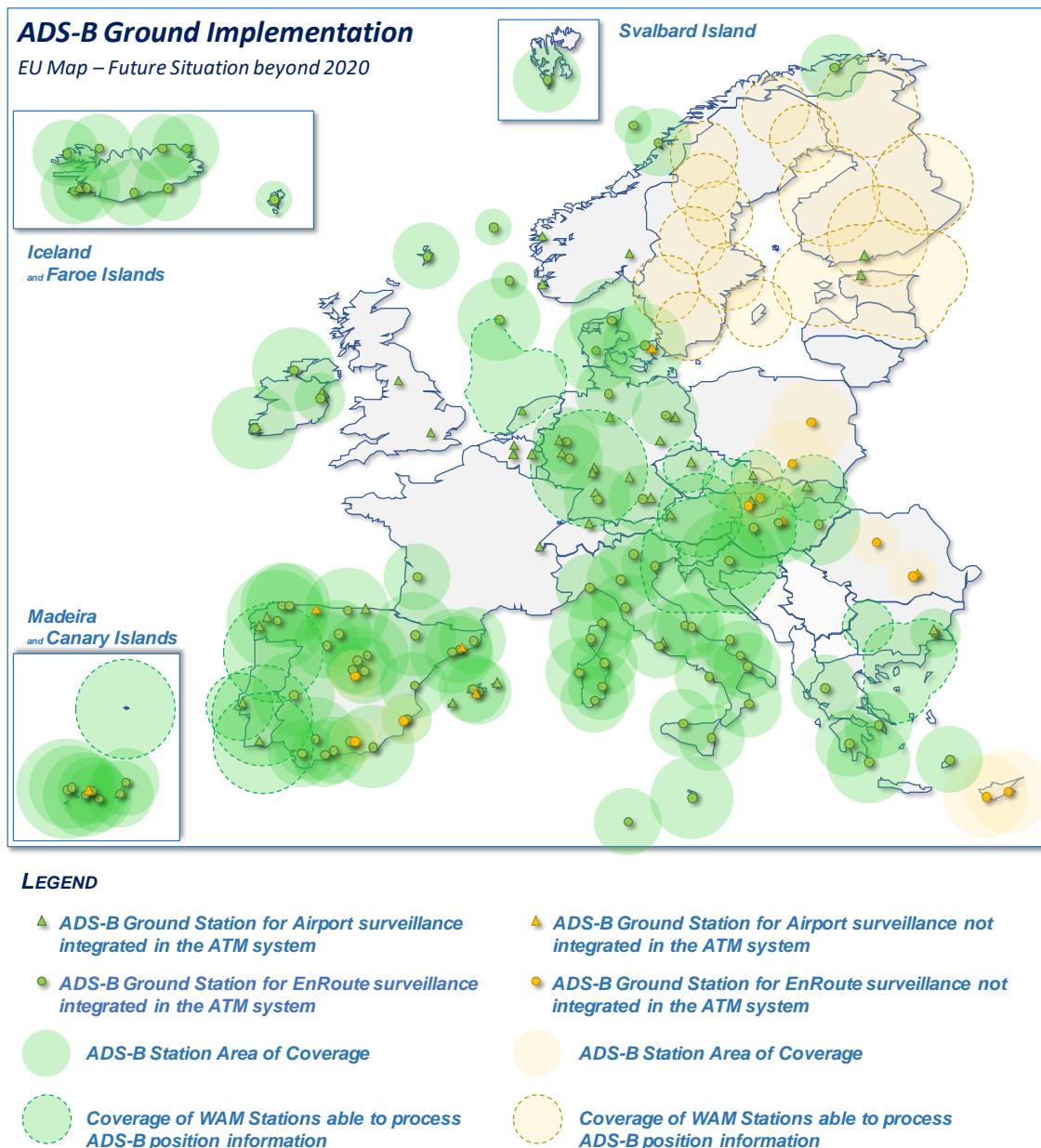


图 1.4-12 欧洲 2020 年之后 ADS-B 地面监控系统实施计划¹⁵

§1.4.5 中国

根据 ICAO 第十五次 ADS-B 研究和实施研讨会 (ADS-B SIFT/15) 议信息论文 (IP, Information Paper) IP/31^[19] 显示, CAAC 于 2015 年 12 月修订了《中国民用航空 ADS-B 实施方案》。根据国家 ADS-B 建设项目审批及实施进度, 主要修改是调整各阶段的实现时间。

- **第一阶段:** 2017 年底, ADS-B 在中国开始初步运营, 以及在 ATS 路线上实施 ADS-B : B213、B345、B215、A460、H66、L888、H15、Z1、B206、A368、M771、L642、N892 和 A1。
- **第二阶段:** 2017 年至 2020 年, 重点任务是全面推进 ADS-B Out, 并对 ADS-B Out 进

行安全评估。

- **第三阶段:** 2020 年至 2025 年, 建成完善的 ADS-B 运营监控系统和信息服务系统, 为航空公司提供全空域监控手段和综合 ADS-B 信息服务, 增强空中交通管制安全保障能力和服务水平。

2017 年底(阶段一)将部署 310 个 ADS-B 地面站、2 个 ADS-B 主数据处理中心、8 个 ADS-B 次数据处理中心。本阶段全国 ADS-B 覆盖率如图 1.4-13、1.4-14、1.4-15 所示。

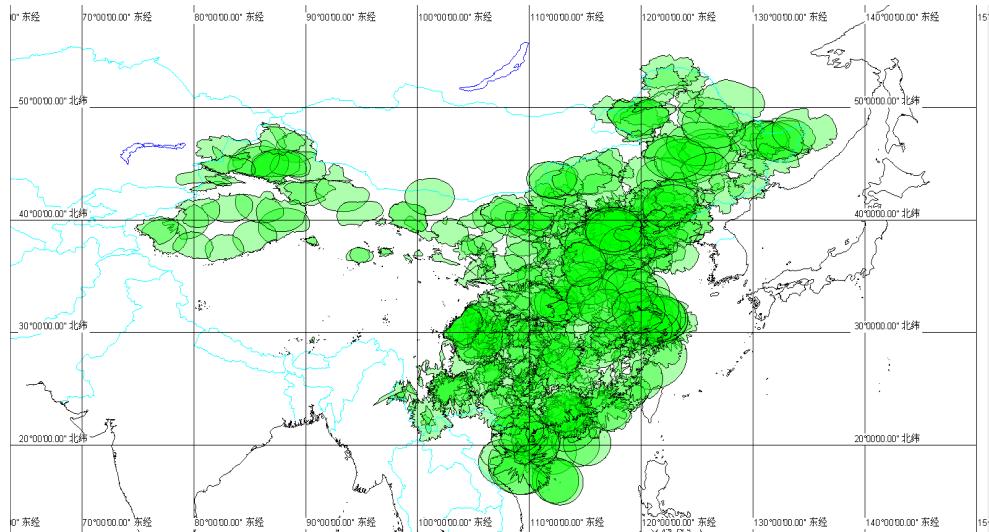


图 1.4-13 中国 3300m 空域 ADS-B 覆盖情况¹⁶

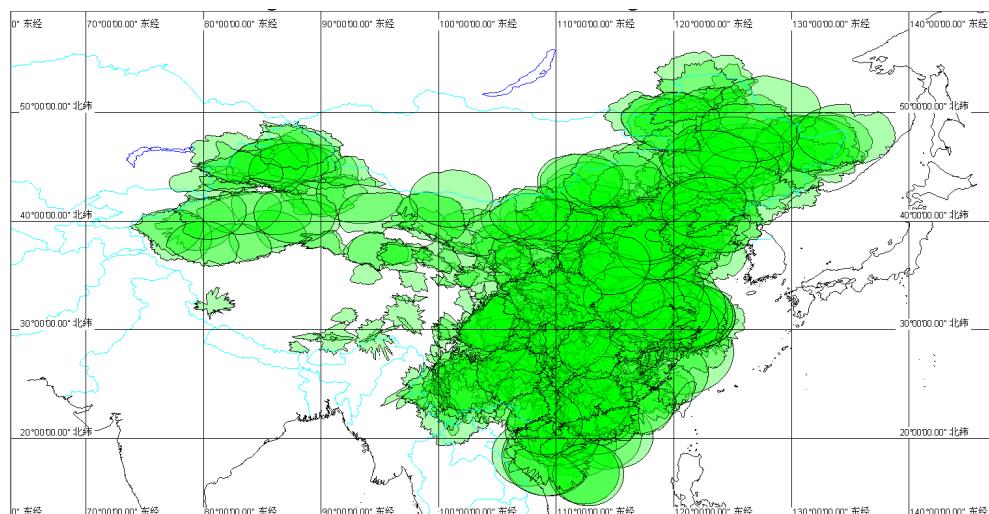


图 1.4-14 中国 6600m 空域 ADS-B 覆盖情况¹⁷

在中国南海, 为满足 L642 路和 M771 路 ADS-B 监控控制需求, 提升三亚 FIR 的 ADS-B 监控能力, CAAC 在 FIR 内增设了 4 个 ADS-B 站。截至 2016 年 4 月 19 日文档发布期

¹⁶ 图片来源: 参考文献 [19]

¹⁷ 图片来源: 参考文献 [19]

¹⁸ 图片来源: 参考文献 [19]

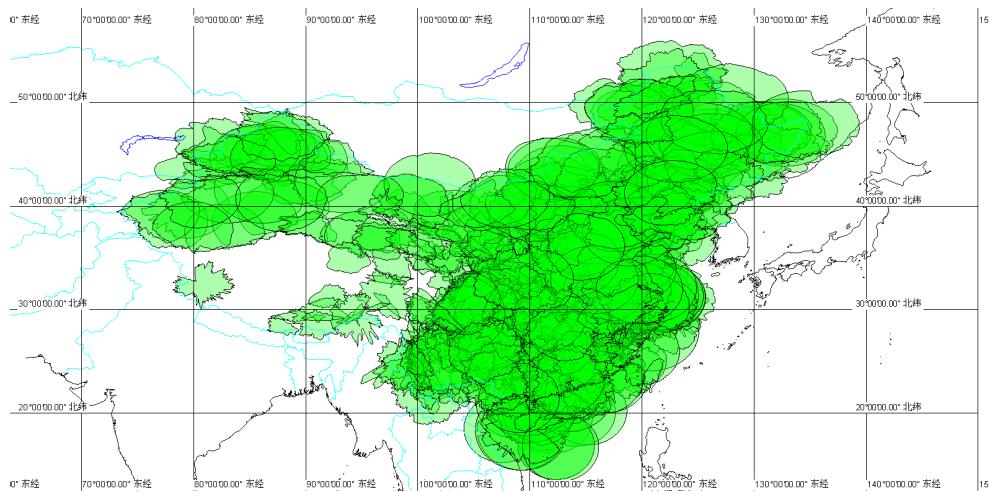


图 1.4-15 中国 8400m 空域 ADS-B 覆盖情况¹⁸

间，已有 4 个 ADS-B 站和 1 个 ADS-B 数据处理站完成了安装调试和现场验收测试，空中交通管制自动化系统已完成软件升级测试，即将投入运作，这一地区的监测范围将大大改善。

中方愿将 ADS-B 数据处理中心的 ADS-B 数据与周边国家/行政部门共享。

根据 ICAO 第十四次东南亚和孟加拉湾区域 ADS-B 实施工作组会议（SEA/BOB ADS-B WG/14）信息论文（IP, Information Paper）IP/3^[20] 显示，自 2016 年起，中国一直在规划国家 ADS-B 项目，该项目由 308 个地面站和 3 级网络架构组成，用于处理和分发 ADS-B 数据。根据项目方案，所有的安装部署活动已经完成，所有的现场验收测试和飞行检查将于 2018 年底完成。ADS-B 服务的初步运营将于 2019 年初准备就绪。2019 年 7 月 1 日，ADS-B 在全国空域试运行。

S 1.4.6 东南亚

印度尼西亚

根据 ICAO 十四次 ADS-B 研究和实施研讨会（ADS-B SIFT/14）议信息论文（IP, Information Paper）IP/23^[21] 显示，澳大利亚、新加坡和印度尼西亚是全球实施 ADS-B 数据共享的领导者。到目前为止，印度尼西亚一直在执行国际民航组织关于与邻国（澳大利亚和新加坡）进行 ADS-B 数据共享的建议。

实施 ADS-B 监视的地区包括雅加达 FIR 和 Ujung Pandang FIR，飞行高度 FL290 至 FL460 的 A 级空域，以及前往印尼访问的使用 ADS-B 的外国注册飞机。如果飞机在印度尼西亚领空携带 ADS-B 发射设备，该设备必须符合经批准的 ADS-B 设备配置。

印度尼西亚 ADS-B 基站以及数据处理和共享中心的布置情况如图1.4-16所示，印尼上空 ADS-B 覆盖范围的仿真模拟如图1.4-17所示。

¹⁹图片来源：参考文献 [21]

²⁰图片来源：参考文献 [21]

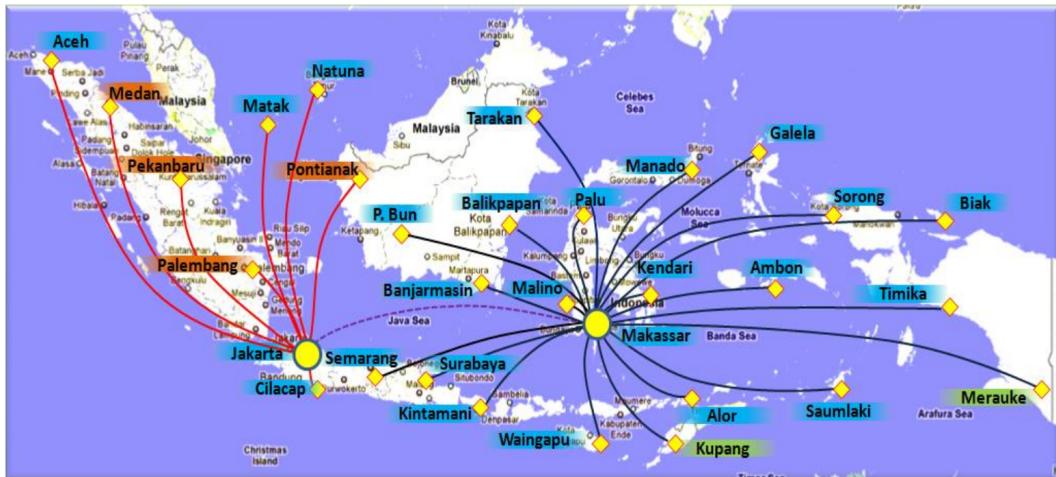


图 1.4-16 印度尼西亚 ADS-B 基站布置情况¹⁹

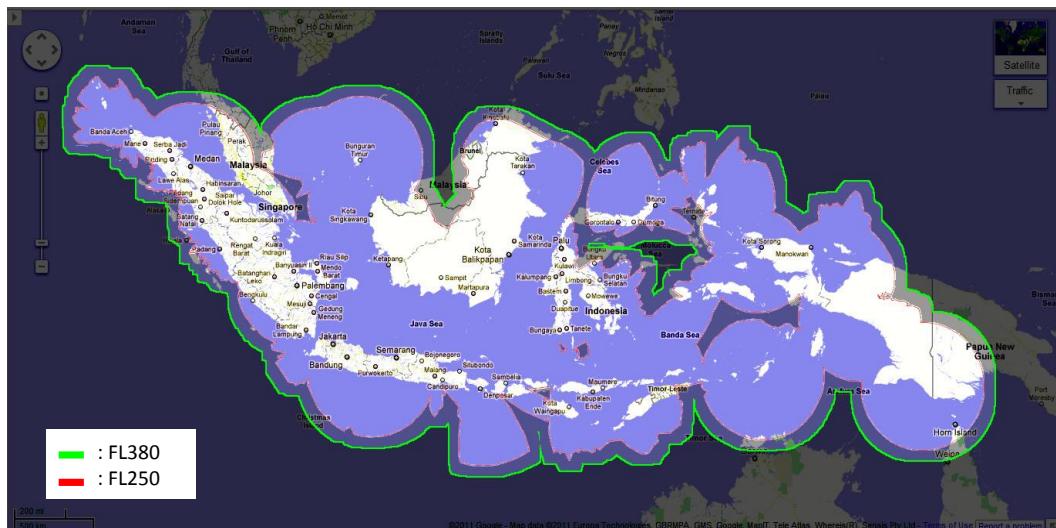
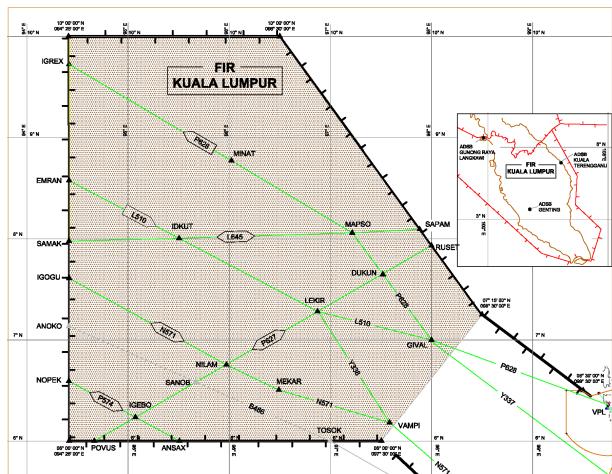


图 1.4-17 印度尼西亚 ADS-B 覆盖情况模拟²⁰

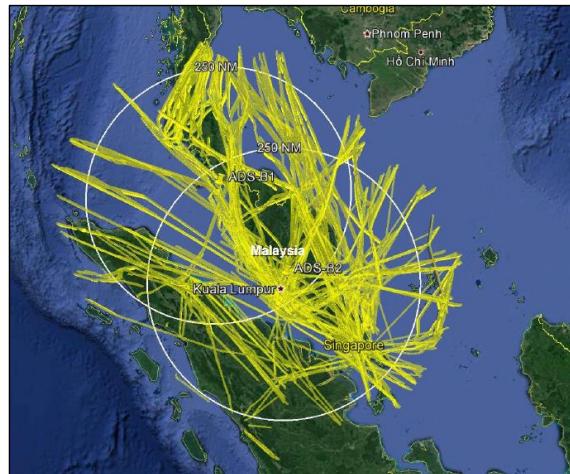
马来西亚

根据 ICAO 第十三次东南亚和孟加拉湾区域 ADS-B 实施工作组会议 (SEA/BOB ADS-B WG/13) 信息论文 (IP, Information Paper) IP/09^[22] 显示, Genting ADS-B 站安装工作进展顺利, 2016 年 12 月完成设置和用户验收测试。但是, Langkawi 的 ADS-B 安装工作由于安装规范的变更, 完成时间较长。安装已于 2017 年 10 月完成, 用户验收测试已于 2017 年 11 月初成功完成。

2017年11月两个ADS-B基站监测数据记录显示，各方向覆盖范围均超过250NM，如图1.4-19所示。两个监测站的ADS-B数据将被融合到多监视融合系统中进行进一步的观测和测试，然后才能进行验证投入使用。

图 1.4-18 马来西亚 ADS-B 覆盖情况²¹

图片来源: <http://aip.dca.gov.my/aip/eAIP/2017-09-07/html/eAIC/WM-eAIC-2017-03-en-MS.html>

图 1.4-19 马来西亚 ADS-B 基站监测数据²³

图片来源: 参考文献 [22]

泰国

根据 ICAO 第十二次东南亚和孟加拉湾区域 ADS-B 实施工作组会议 (SEA/BOB ADS-B WG/12) 信息论文 (IP, Information Paper) IP/09^[23] 显示, 2006 年, AEROTHAI 在其位于曼谷的总部安装了首个 ADS-B 地面站, 可以 ASTERIX CAT 21 0.26 版本的格式输出信息, 以供研发之用。2014 年, 在清迈、Ubon Ratchathani、Udon Thani、Hat Yai、Samui 市等地增设了 5 个 ADS-B 地面站, 并取得了良好的实验效果。这些地面站能够支持 ASTERIX CAT 21 1.4 版和 2.1 版格式。同样在 2014 年, 在曼谷安装的第一个地面站升级为支持 ASTERIX CAT 21 1.4 版和 2.1 版格式。此外, 所有 ADS-B 地面站均符合 ED-129 标准。

每个 ADS-B 地面站提供的覆盖范围在半径 250 海里和海拔 4.5 万英尺以内。目前泰国各地共设置了 6 个 ADS-B 地面站, 20000 英尺及以上空域基本覆盖如图1.4-20所示, 可为曼谷 FIR 20000 英尺及以上航路运行提供 ADS-B 监控服务。目前, 上述 ADS-B 地面系统正在通过 CAAT 的认证, 预计于 2017 年完成 (文献于 2016 年发布)。

为了能够在较低的管制空域提供 ADS-B 服务, 需要更多的 ADS-B 地面站。因此, 这些地面站需要具备双重功能, 即 ADS-B 和 WAM, 计划部署在泰国, 旨在能够从 13000 英尺到 45000 英尺为航路运行提供 ADS-B 覆盖, 从 2000 英尺到 11000 英尺为 8 个机场提供 TMA 运行服务。预计这些地面站的安装工作将于 2017 年中后期开始 (文献于 2016 年发布)。

菲律宾

根据 ICAO 第十三次东南亚和孟加拉湾区域 ADS-B 实施工作组会议 (SEA/BOB ADS-B WG/13) 信息论文 (IP, Information Paper) IP/17^[24] 显示, 在菲律宾的 CNS/ATM 系统开发项目, 截至 2017 年 10 月 16 日, 已经完成 99.9%, 包括安装新的监视系统, 新监视系统

²⁴ 图片来源: 参考文献 [23]

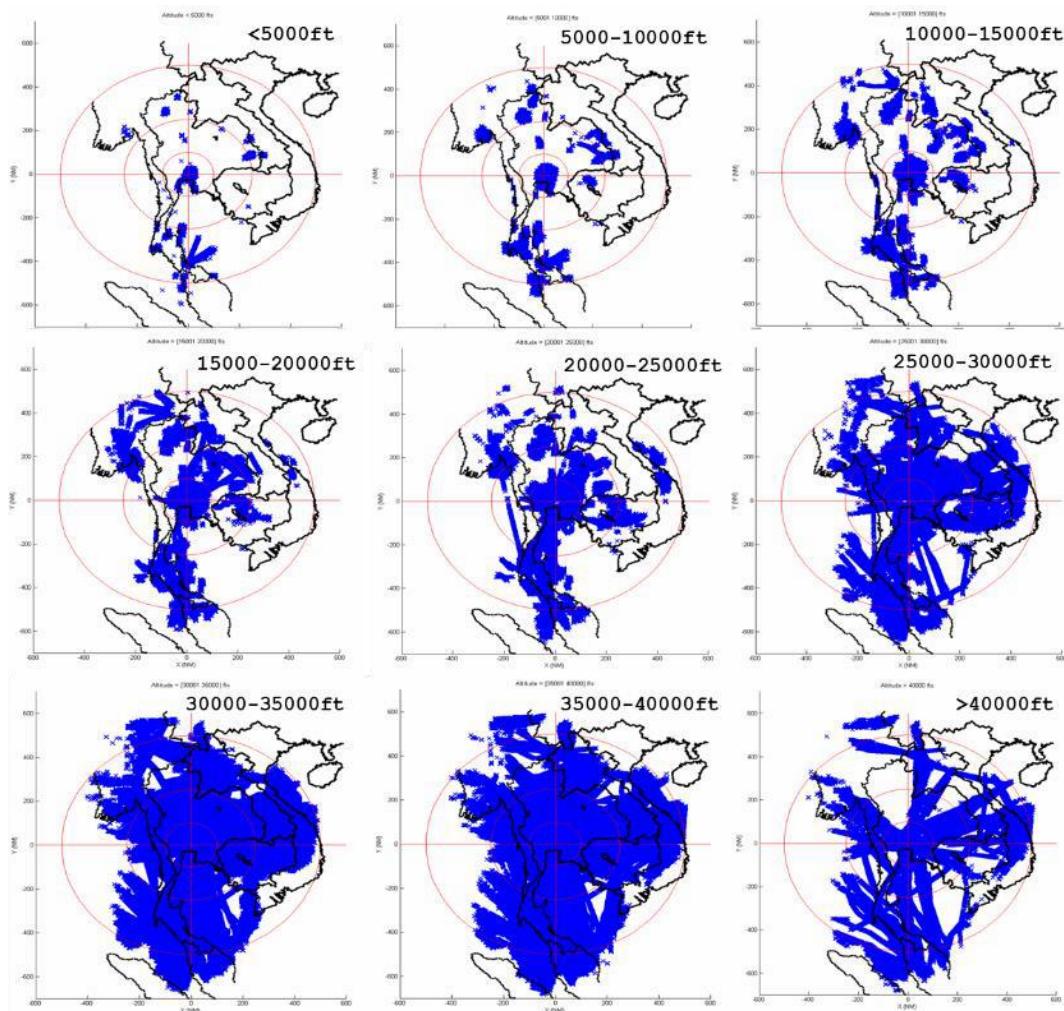


图 1.4-20 泰国 20000 英尺及以上空域 ADS-B 覆盖²⁴

包括 10 部雷达（5 部航路雷达和 5 终端区雷达），1 个 ADS-B 地面站和 3 台现有雷达系统的升级，这将覆盖菲律宾 80% 的空域。海洋部分将被 ADS-C 覆盖。

菲律宾完成了位于马尼拉 ATM 中心的 1 个 ADS-B 地面站的安装。地面站符合 DO260B 标准。考虑到新的 CNS/ATM 系统仍处于过渡阶段，最初提出的 2017 年地面站（Kalayaan、Zambales 和 Pangasinan）将在 2018-2019 年底实施。另外 3 个场址（Jomalig 岛、General Santos 机场和 Ilocos Norte）计划在今后几年安装。有关 ADS-B 要求的相关规定已经在讨论中。

虽然在 CNS/ATM 项目下，ADS-C 覆盖范围将对菲律宾 100% 的空域进行监视覆盖，但菲律宾也在考虑天基 ADS-B 技术，目前已经与供应商进行了初步讨论。

图1.4-21显示了马尼拉 ATM 中心 ADS-B 的监控范围。

2015 年 10 月，菲律宾与新加坡签署 ADS-B 合作协议，在菲律宾巴塔拉扎为新加坡提供 ADS-B 数据和甚高频无线电设施。这部分覆盖了 ATS 航路 N884 和 M767 上的监视和 DCPC 漏洞。

²⁴ 图片来源：参考文献 [24]

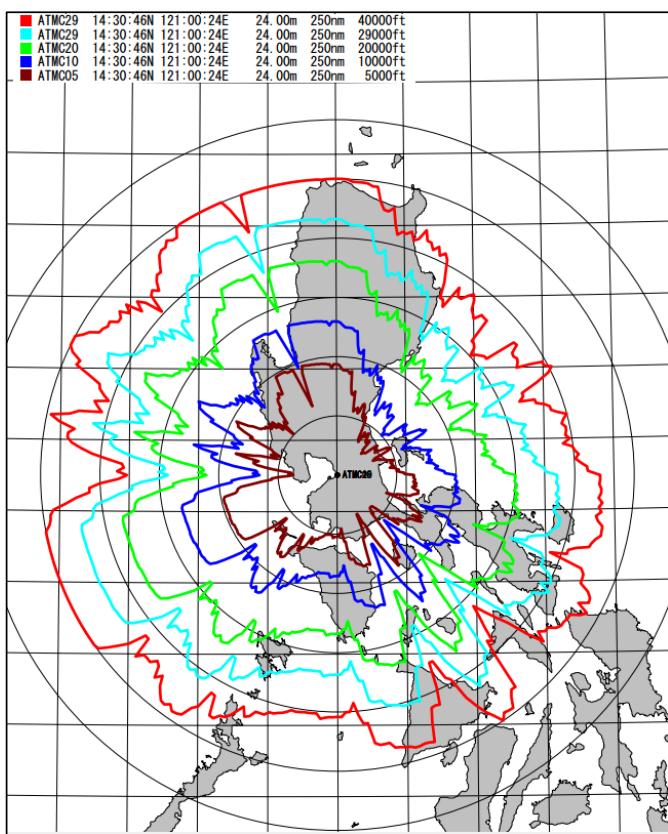


图 1.4-21 菲律宾马尼拉 ATM 中心 ADS-B 监控范围²⁵

第 2 章

星基 ADS-B 原理概述

S 2.1 传统陆基 ADS-B 系统的不足

世界上大多数地区都是不受控制的空域。在没有雷达覆盖的地区，称为 NRA，如海洋空域、极地地区或结构上落后的大陆地区，地面站的安装要么不可能，要么太昂贵。现在，这些地区的监视手段是程序管制，即飞行员在到达某个固定的航路点时报告位置，或者应用 ADS-C，通过一个点对点的数据链连接（FANS1/A/Satcom），由于带宽有限，它仅每 15 分钟发送一次位置和其他航班信息。在这两种情况下都不可能实现无缝和连续的飞行监视，并且需要一个相对较大的飞行间隔来保证安全。

陆基 ADS-B 地面站越来越多地部署，但是覆盖区域通常限制在几百公里。以澳大利亚航空服务为例，建造了大量的 ADS-B 地面站最终覆盖了飞行高度 FL300 以上的区域。

由于技术、运行和政治条件的限制，对基于陆基 ADS-B 的空中交通活动的全球监视似乎有些力有未逮，主要体现在^[36]：

- 海洋全部覆盖要求在大量的浮标上部署 ADS-B 地面站
- 地面全部覆盖要求在不可接近区域部署和运营 ADS-B 地面站
- 全球空域分散，各个空域由大量当地 ATC 提供商运作
- 在不稳定地区的政治障碍阻碍了任何跨国监管和运作

传统陆基 ADS-B 系统主要由空中机载发射机和地面接收基站组成，受制于系统布置限制，一般沿民航航路航线、机场终端区等陆地区域进行布置，很难实现对洋区、沙漠、高山峡谷等特殊地区的覆盖。据统计，全球 90% 的区域没有实现飞行监视覆盖。基于星基的 ADS-B 系统可有效克服陆基 ADS-B 系统的不足，可用于陆基 ADS-B / 雷达难以覆盖或无法覆盖的空域，从而形成一个全球无缝的 ADS-B 覆盖网络^[1]。

§2.2 星基 ADS-B 的实验背景

2008 年, DLR 开始调查接收 LEO 卫星上的飞机广播 1090ES ADS-B 信号。这促成了 DLR 的星基 ADS-B 项目 AOS, 目标是开发一个用于 IOD 的 ADS-B 载荷, 从而证明基于卫星的 ADS-B 监视在全球范围内的可行性。

该 IOD 能够接收、解码和转发所有 S 模式下行链路格式报文, 这包括 DF17 扩展震荡 ADS-B 报文和 DF11 全呼应答。AOS 的在轨演示器是在 ESA 的 PROBA-Vegetation 卫星任务框架内进行的, 并于 2013 年 5 月 7 日在法属圭亚那 Kourou 由欧洲最新的 VEGA 运载火箭成功发射。

DLR 的这个在轨演示器是演示和验证天基空中交通监视的第一步。一颗卫星搭载了具有太空生存能力的 ADS-B 接收机, 由于预算、时间、特殊资源和 PROBA-Vegetation 卫星在功率和几何形状方面的限制, 该 ADS-B 载荷采用了相对简单的天线和接收机设计。在未来提供无缝全球覆盖的运营系统将包括这样一组卫星, 每个卫星都配备有精密的多通道 ADS-B 接收机和天线^[36]。

AOS 项目是星基 ADS-B 的第一次实验并且已经证明了星基 ADS-B 的可行性。该 IOD 的实验结果将为未来星基空中交通监视的目标铺平道路。

§2.3 星基 ADS-B 的工作原理

基于星基的 ADS-B 系统借助低轨道通信卫星的强大覆盖能力, 将 ADS-B 收发信机安装到通信卫星上。通信卫星通过其 ADS-B 设备接收飞机发送的 ADS-B 报告, 再通过卫星通信信道下传给卫星地面站, 卫星地面站通过地面网络将 ADS-B 报告传递给地面相关实体(如 ATC 中心、航空公司等), 实现 ADS-B 全球覆盖, 完成对飞机的全球飞行追踪和实时监控^[13]。星基 ADS-B 系统的结构布局原理如图2.3-1所示。

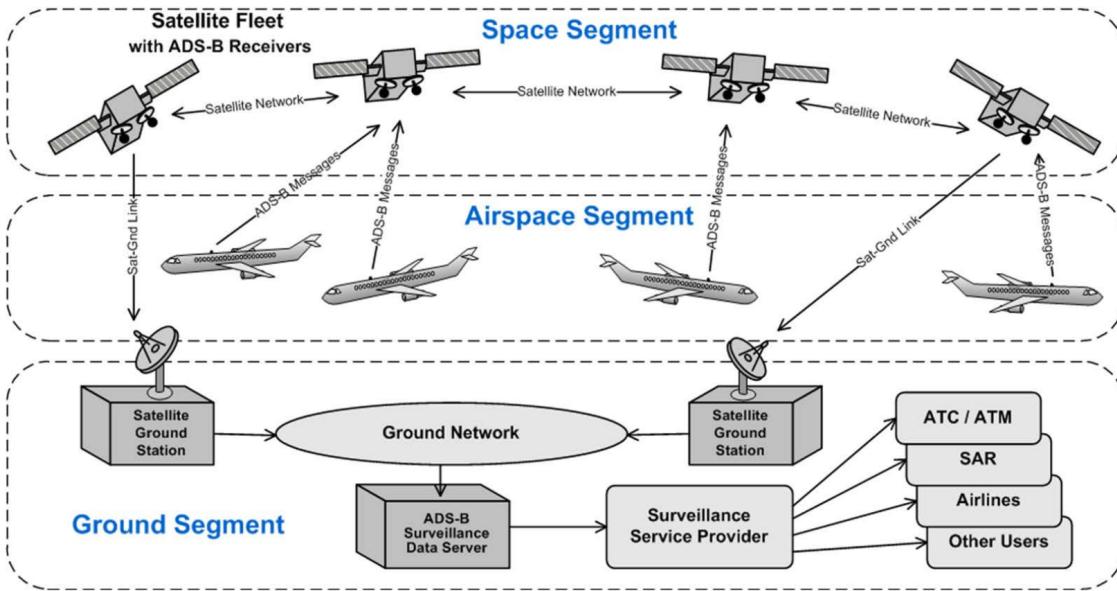
星基(Satellite-Based) ADS-B 系统, 同样称为“天基(Space-Based)”、“卫星增强(Satellite-Augmented)”或者“卫星重传(Satellite-Retransmitted)”ADS-B 系统^[35]。

§2.4 星基 ADS-B 的应用意义

§2.4.1 安全性

- ADS-B 提供接近实时的飞行监视
- 提高态势感知、冲突检测和反应/解决能力
- 飞机在紧急情况下将有更大的灵活性
- 提供独立于通信(CPDLC) 网络源的监视源
- 更完整、准确地报告航空事故, 更好地管理安全风险, 更好地支持安全管理体系

¹ 图片来源: 参考文献 [15]

图 2.3-1 星基 ADS-B 系统工作原理¹

§ 2.4.2 环境/效率

- 更有效的“驯化”在海洋空域飞行轨迹
- 更可预测的航空公司成本规划
- 爬升/下降和改变速度，以便顺风飞行和避免逆风
- 改善反方向和交叉的交通状况
- 世界范围内温室气体排放的显著减少

§ 2.4.3 可预测性和可靠性

- 获得 ADS-B 数据可以支持交通流管理排序、合并和平衡
- 支持信息共享和协作过程
- SWIM 要求飞行计划系统、调度和航空公司门到门的管理变得更加复杂和高效。通过基于 LEO 卫星的 ADS-B 进行的监视将适应这种情况^[26]

第 3 章

现阶段发展及应用情况

§ 3.1 DLR 的 AOS 实验项目

§ 3.1.1 项目概述

根据2.2节的内容，我们得知 DLR 的 AOS 项目是世界上第一个天基 ADS-B 可行性验证实验项目。AOS 开发了一个 ADS-B 载荷，作为一个在轨演示器，搭载在 ESA 的 PROBA-Vegetation 卫星上，于 2013 年 5 月 7 日被发射到近地轨道上。AOS 是 DLR 空间系统研究所和 DLR 飞行指导研究所的合作项目，与卢森堡合作伙伴 SES TechCom Services 合作。

表 3.1-1 DLR 的 AOS 项目基本描述

目标	证明星基 ADS-B 监视的可行性 搭载于 ESA 的 Proba-V 卫星上的在轨演示器将验证一些关键参数，例如目标截获率、检测率和验证概率
项目持续时间	2011 年第一季度至 2014 年第二季度末
合作方	Institute of Space Systems (RY) in Bremen, Germany Institute for Flight Guidance (FL) in Braunschweig, Germany
贡献	Institute RY: 开发和组装符合空间要求的 ADS-B 接收机和天线 Flight Calibration Services: 开发 ADS-B 接收机 Institute FL: ADS-B 数据的验证与评估
更多的合作	RY with SES-ASTRA / ESA: 提供数据服务器

ESA Proba-V 卫星自 2013 年 5 月 7 日起进入地球轨道，其有效载荷包括一个专用接收器，用于接收飞机 ADS-B 信号。5 月 23 日，该实验首次开启，在两小时内 820 公里的高度记录了 12000 条 ADS-B 信息。飞越苏格兰的 A320 飞机是 DLR 新型接收机从太空“看到”的第一架飞机，证明可以从太空跟踪飞机。

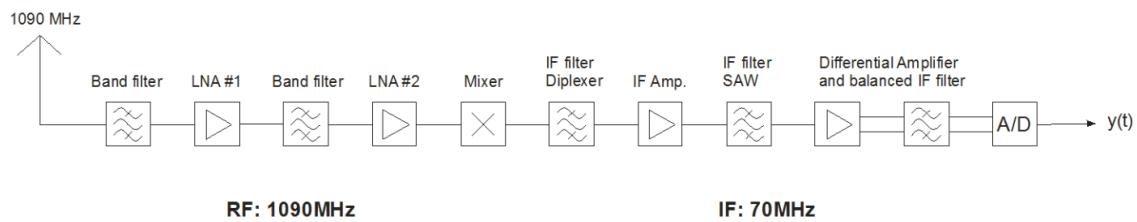
表 3.1-2 ESA 的 Proba-V 小卫星任务描述

主承包商	QinetiQ Space nv
卫星质量	约 140 kg
运载火箭	Vega 火箭
发射日期	2013 年 5 月 7 日
发射场	法属圭亚那航天中心（库鲁）
发射提供商	Arianespace
轨道	太阳同步轨道，海拔 820 公里，倾角 98.73°，飘移限制在 10:30 AM 到 11:30 AM
通信	卫星的控制与通信通过比利时 Redu 地面站
主要任务	植被扫描仪
载荷	ADS-B、高能粒子传感器、氮化镓 X 波段功率放大器

§ 3.1.2 体系结构

Proba-V 上的 ADS-B 接收器由卢森堡的 DLR 和 SES TechCom 提供，主要目的是在飞行代表性配置中测试（空间限定）ADS-B 电路板以评估 TID。

ADS-B 接收器（1090ES RX）的基本设计概念是单转换超外差接收机，由 1090MHz 下变频调至中频 70MHz，70MHz 下的 IF 采样由一个 105Msps（每秒兆采样次数）的 16 位 ADC 完成。该 ADS-B 单转换超外差接收机概念如图 3.1-1 所示^[14]。

图 3.1-1 单转换超外差接收机¹

§ 3.1.3 实验结果

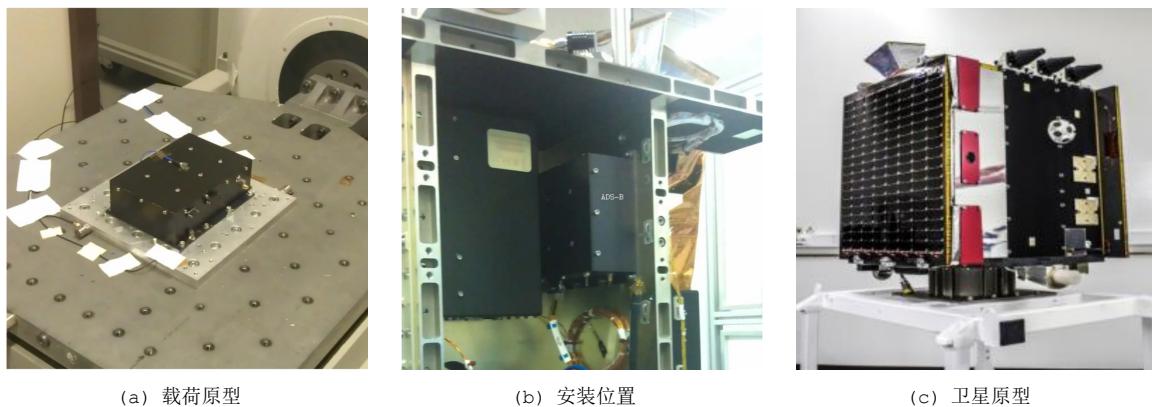
图 3.1-5 展示了 2014 年 2 月 11 日在世界范围内记录的飞机航迹，每个红点代表卫星在其轨道上通过飞机时所看到的飞机航迹段。Proba-V 卫星的天线覆盖范围为纵向约 1200 公里，横向延伸至卫星飞行方向 500 公里，可逐条扫描全球空域。

在空间接收 ADS-B 报文的最重要方面是卫星上 1090 MHz 扩展电文信号的接收条件。与基于地面的 ADS-B 监视相比，陆基 ADS-B 最大接收范围可达 300 公里，而在 820 公里高度轨道运行的 LEO 卫星与飞机之间的信号路径要长得多，这导致 ADS-B 的信号电平较低。接收器必

¹ 图片来源：参考文献 [14]

² 图片来源：参考文献 [15]

⁴ 图片来源：参考文献 [15]

图 3.1-2 Proba-V 卫星上搭载的 ADS-B 载荷²图 3.1-3 技术验证阶段的单颗卫星³

图片来源：参考文献 [15]

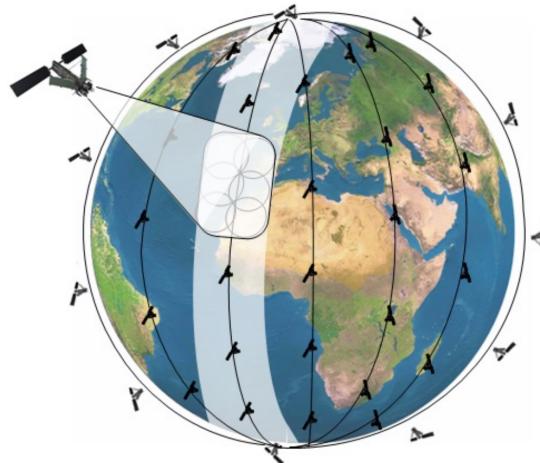


图 3.1-4 未来全球卫星组网方案

图片来源：参考文献 [15]

须通过相关处理几乎在噪声水平上检测 S 模式信号。

实验得到了卫星天线覆盖区中不同区域接收到的 ADS-B 报文数量分布的足迹，如图3.1-6所示，该图显示了 2014 年 5 月收到的所有位置消息的足迹。值得注意的是两个峰值，一个在卫星运动方向前方，峰值较低，另一个在卫星运动方向后方，峰值较高。这个谱的分布是不对称的，这由许多原因引起，比如卫星上的贴片天线的安装位置不对称、安装在卫星下侧的其他设备和在下表面的前边缘上突出的太阳能电池板。

直方图的峰值可以通过卫星的接收天线和飞机的发射天线的天线辐射图来解释。图3.1-7显示了安装在 Proba-V 卫星最低点面板上的 ADS-B 贴片天线的实测辐射图。合成的天线辐射图在卫星移动方向整体呈椭圆形状，最大灵敏度略低于卫星下方的最低点方向。

飞机装有两个 ATC 天线，一个在机身顶部，一个在机身底部，它们交替发射。由于几何因素限制，卫星将接收来自顶部天线的信号。顶部天线典型的垂直天线辐射模式如图3.1-8所示。

² 图片来源：参考文献 [15]

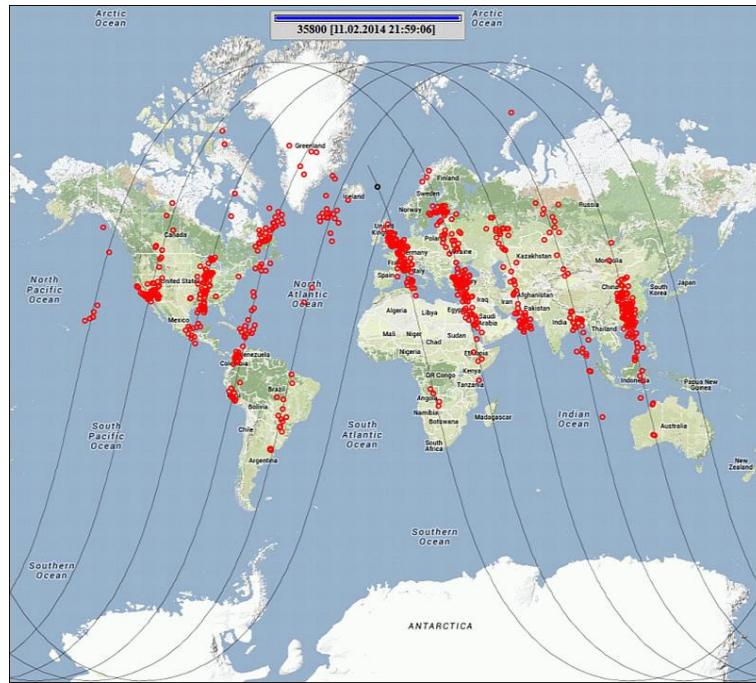


图 3.1-5 AOS 在世界范围内记录的飞机航迹（2014 年 2 月 11 日）⁴

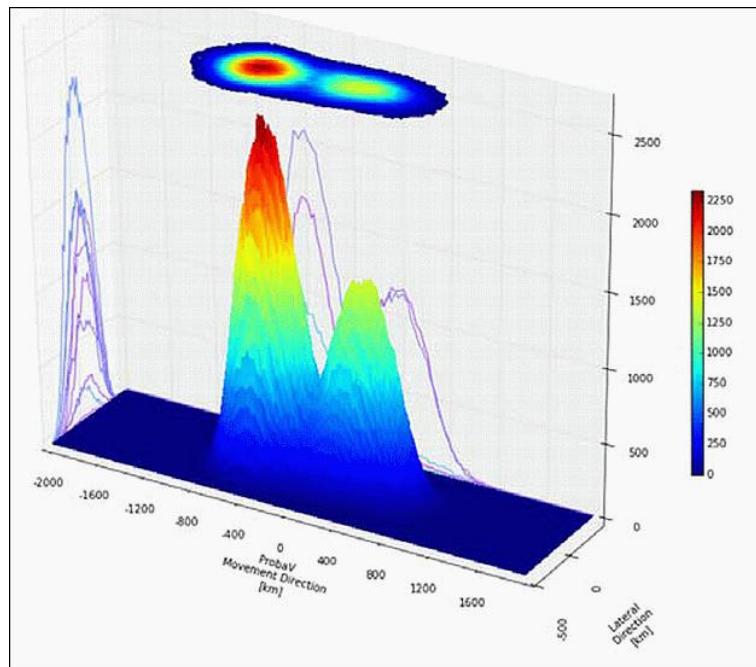
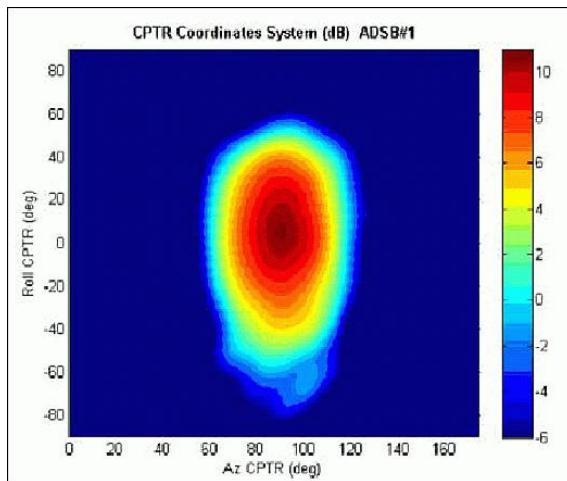


图 3.1-6 所有接收到的位置信息在天线覆盖区中的分布足迹⁵

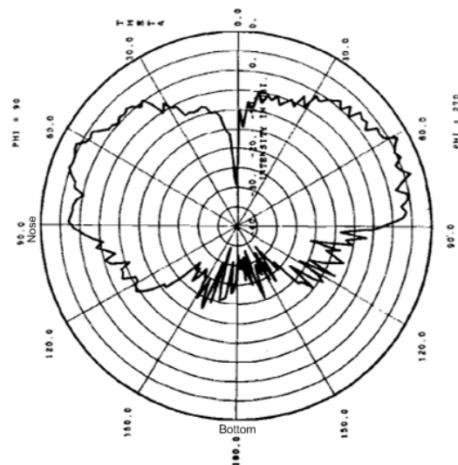
§ 3.1.4 项目意义

这次星载 ADS-B 接收验证实验的创举，将带来更多的在轨验证任务。ESA 与 Thales 德国签订合同，开发下一代 ADS-B 系统，该系统正在按计划进行，同时带来了卢森堡航天界（如 LuxSpace）的大力参与，将 TRITON 微小卫星平台作为以后的实验平台^[36]。

Proba-V 卫星实验项目取得了多个成果，主要包括：

图 3.1-7 Proba-V 卫星天线辐射图⁶

图片来源：参考文献 [15]

图 3.1-8 顶部安装的 L 波段天线的垂直天线辐射图⁸

图片来源：参考文献 [15]

- 接收器的 FPGA 固件中包含一项特殊功能：允许上传新配置文件并通过远程访问激活这些配置。到目前为止，在任务运行期间，已成功测试了几次；
- 开发了改进的 S 模式相关机制，这得益于脉冲序列从第一个到第五个前导脉冲的相位相干性。在实验室测试中，可以显示报文检测率显著增加；
- 通过为 DF17 中的 112 个 S 模式数据位生成并保存“低置信度位”，增加了一次可以提高后处理报文解调成功率的机会；
- 卫星上的 ADS-B 接收器是同类中的第一个实验，接收从飞机发射的 1090ES ADS-B 电文信号。因此无法根据以往经验或任何结果进行系统设计。

Proba-V 卫星在实验中也遇到了一些困难，主要包括：

- 由于卫星在大约 820 公里的高度，而飞机在 0 到 12 公里的高度，距离会导致接收的信号幅度过低从而导致信号丢失；
- 由于卫星天线垂直辐射图和飞机天线垂直辐射图的形状不同，会导致信号损失；
- 当到达卫星 ADS-B 天线的消息在时间上重叠（交织）时，ADS-B 接收机无法对其进行解码；
- 卫星的速度约为 27000 公里/小时，这导致每个检测到的飞机的观察时间有限，最多约 3 分钟。

这些困难提供了巨大的借鉴意义，为星基 ADS-B 技术发展中探明了一些需要克服的难点问题。

S 3.2 丹麦 GOMX 实验项目

S 3.2.1 项目概述

GOMX 平台是商业上可获得的立方体卫星套件，由丹麦奥尔堡的 GomSpace ApS 提供。GomSpace 是一家创业型公司，于 2007 年成立为私人有限公司。该平台非常适合以技术研究，低成本科学和商业概念验证任务为重点的具有成本效益的任务。GOMX (GomSpace Express) 平台是开发空间技术能力的客户工具^[48]。

GOMX-1 -> GATOSS

GATOSS 是 GomSpace 的纳米卫星平台，基于两个单元 GomSpace Express (GOMX) 平台的立方体卫星，在对应于平台上部 14 厘米的体积内提供 1.2 千克的有效载荷^[48]。GATOSS 卫星项目的相关参数如图3.2-9所示。

GOMSpace 的 GOMX-1 在发布后改名为 GATOSS (Global Air Traffic Awareness and Optimizing through Spaceborne Surveillance, 全球空中交通态势和通过星载监视进行优化)，是一款学生建造的业余无线电 2U 立方体卫星。该任务是在政府研究基金的赞助下进行的，涉及与空间有关的无线电研究。该卫星的目标是确定若干子系统的性能并提供广泛的飞行数据。

GOMX-1 具有效载荷，能够通过接收飞机发出的 ADS-B 信号，从太空进行跟踪跨洋飞行。ADS-B 信号目前在地面接收机覆盖的区域内用于空中交通管制，但由于其范围有限，目前尚未在海洋上使用。具有敏感软件无线电 (SDR) 有效载荷的 GOMX-1 卫星将首次证明 ADS-B 信号可以从太空接收，并用于为空中交通管制中的关键利益相关者提供更高的全球态势感知能力。

该任务还将测试使用开源立方体卫星空间协议进行包括空间链接在内的完整任务。

作为学期项目的一部分，奥尔堡大学的 15 名学生积极参与了这种有效载荷的开发。^[47]

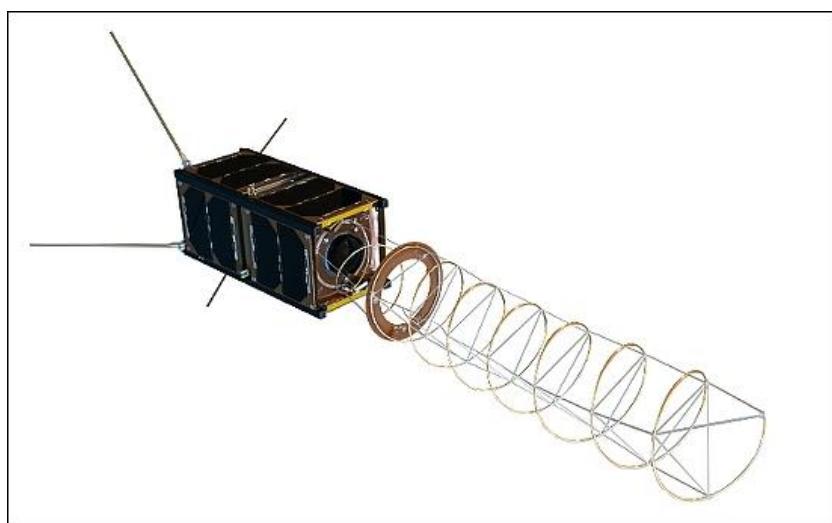


图 3.2-9 GOMX-1 (GATOSS) 卫星⁹

⁹ 图片来源：参考文献 [47]

表 3.2-3 GATOSS 卫星项目相关参数¹⁰

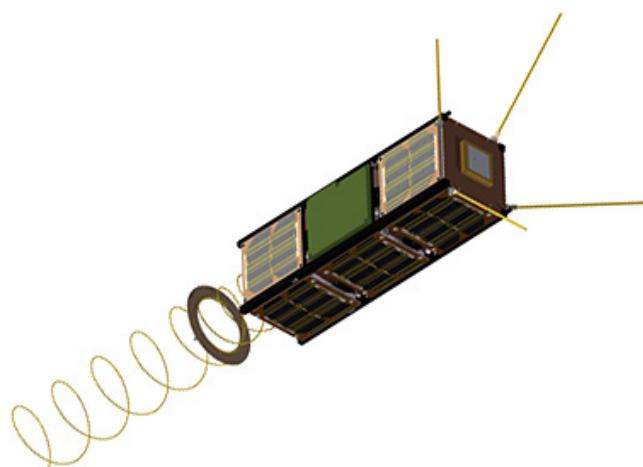
国家	丹麦
类型/应用	技术, 交通监控
运营商	GOMSpace
承办单位	GOMSpace
设备	ADS-B 接收器
组态	2 单元立方体卫星
推进	无
能源	太阳能帆板, 电池
寿命	
质量	2 kg
轨道	593 km × 818 km, 97.78°
发射日期	2013 年 11 月 21 日
运载火箭	Dnepr

GOMX-3

GOMSpace 的 GOMX-3 是 3 单元立方体卫星, 用于评估太空中的几个组件。GOMX-3 卫星项目相关参数如图3.2-10所示。

GOMX-3 将使用 L 波段可重新配置的软件定义无线电有效载荷来演示飞机 ADS-B 信号接收和对地静止通信卫星点波束信号质量。由 Syrlinks 开发并由法国航天局 CNES 资助的小型高数据速率 X 波段发射机也将作为第三方有效载荷飞行。

卫星由 HTV 5 货船运送到国际空间站。它于 2015 年 10 月 5 日从国际空间站部署。它于 2016 年 10 月 18 日重新进入大气层销毁。^[50]

图 3.2-10 GOMX-3 卫星¹¹

¹⁰ 数据来源: 参考文献h13

¹¹ 图片来源: 参考文献 [50]

表 3.2-4 GOMX-3 卫星项目相关参数¹²

国家	丹麦
类型/应用	技术, 交通监控
运营商	GOMSpace
承办单位	GOMSpace
设备	
组态	3 单元立方体卫星
推进	没有
能源	太阳能帆板, 电池
寿命	1 年
质量	4 kg
轨道	395 km × 408 km, 51.64°
发射日期	2015 年 8 月 19 日
运载火箭	H-2B-304

§ 3.2.2 体系结构

GOMX-1 -> GATOSS

星载 ADS-B 的目的是将敏感接收机放置在 LEO 的卫星上, 该轨道可接收 ADS-B 信号并将其传递给相关的利益攸关方。GomSpace 的星载 ADS-B 概念如图3.2-11所示, GomSpace 正在研究利用纳米卫星提供星载 ADS-B 服务的两个概念。

离线数据: 一小队卫星 (3-6 颗) 对空域进行采样, 主要为离线统计处理提供信息。经过一个或多个地面站时, 有延迟的数据被传递至下行链路。

在线数据: 一个较大的卫星网络 (40-70 颗) 通过地球同步数据中继卫星近乎实时地连接到空中交通管制基础设施。这可以使用例如用于 Inmarsat BGAN 网络的 SB-SAT 来实现, 该网络正在开发中。^[48]

虽然确实是一个有趣的想法, 但是星载 ADS-B 需要带来经济效益才能生存并值得投资。对于仅是适度投资的离线数据概念, 可以通过分析提供由卫星采样的飞行验证信息的过去数据来生成值。此信息可用于以下示例:

- 航路收费计算的改进使收益率比已公布的飞行计划计算的收费增加 1-2%
- 飞机航线和先前地点的第二个来源, 作为国家安全情报收集的输入
- 根据星载 ADS-B 记录的使用模式改进海洋空域作业程序, 以提高空域效率

显然, 随着星座中卫星数量的增加, 可以提供更好的服务。对于在线数据概念, 需要大量投资, 提供全球空中交通状况的全时态势感知。GomSpace 估计, 全球覆盖的全面部署的星载 ADS-B 基

¹² 数据来源: 参考文献h16

¹³ 图片来源: 参考文献 [48]

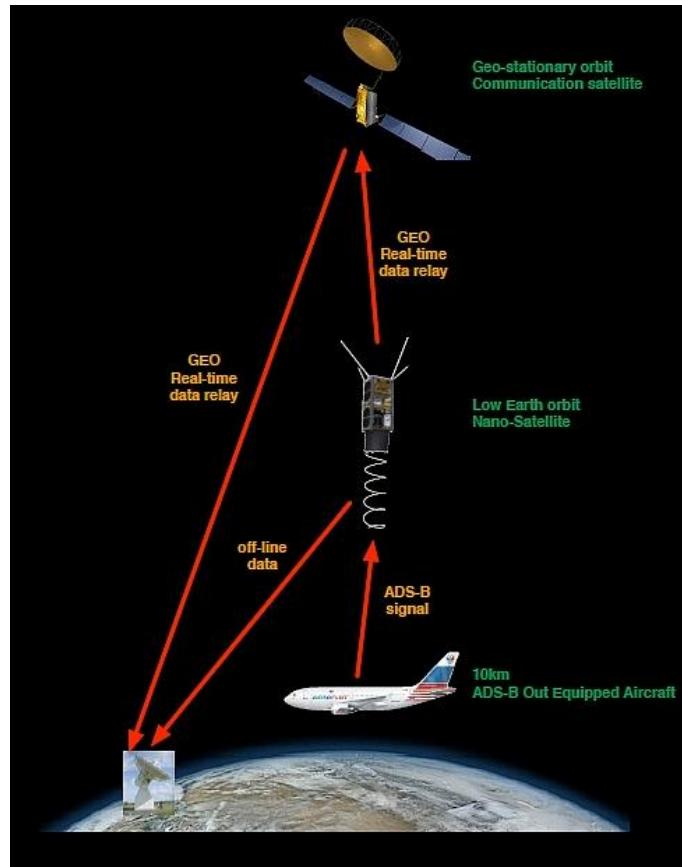


图 3.2-11 GomSpace 的星载 ADS-B 概念图¹³

基础设施对空中交通部门的潜在价值大约为十亿美元，其中很大一部分可能在北大西洋地区产生。^[48]

图3.2-12中提供了 ADS-B 接收器有效负载的框图。该天线是图3.2-9所示的可展开螺旋天线，在 1090 MHz 时提供 10dB 的增益。

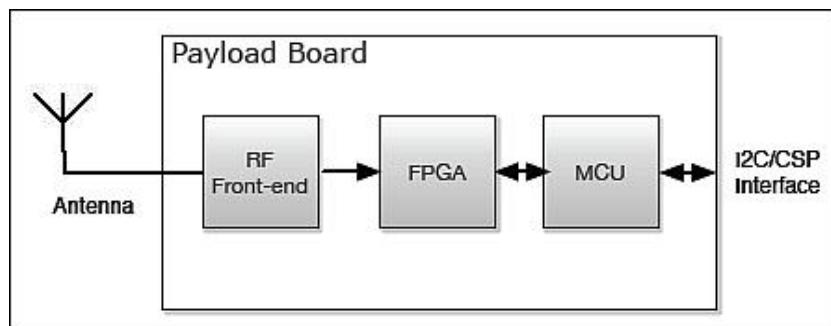


图 3.2-12 GATOSS 上的 ADS-B 接收器框图¹⁴

RF 前端提供信号的放大和初始下变频。为了补偿由于接收器在空间中的位置而导致的路径损耗增加，与系统的 80 NM 标称范围形成对比，RF 前端经过精心设计，可提供所需的灵敏度，以便能够对信号进行解码。

FPGA 对下变频信号进行采样并运行解码算法。在任务期间可以使用新的位代码重新配置 FPGA，并且该功能将用于在任务期间基于在空间中操作所获得的反馈来改善有效载荷的操作性能。

¹⁴ 图片来源：参考文献 [48]

FPGA 将解码后的包传输到微控制器单元，该单元将数据存储在（内存中）数据库中，该数据库可通过 CSP（立方体卫星空间协议）网络查询，从而提供广泛的机会来提取 ADS-B 数据和系统性能的元数据。^[48]

§ 3.2.3 实验成果

GOMX-1 -> GATOSS

2013 年 11 月 25 日：GATOSS 现已全面投入使用。姿态控制系统使航天器从相当高的倾斜速率中脱离，并且部署了包括螺旋天线的所有可展开部件。两个有效载荷都处于完全运行状态。主要有效载荷-软件无线电 ADS-B 接收器，已经接收到大量的航空器信号，表明螺旋天线上的链路预算好于预期。

2014 年 2 月 19 日：GATOSS 航天器名义上运行。该项目目前正在使用卫星捕获原始和解码 ADS-B 数据的各种样本，以便进行分析，并将其输入下一代接收机。

截至 2013 年 12 月 GATOSS 收到的几架飞机位置的图像如图 3.2-13 所示。

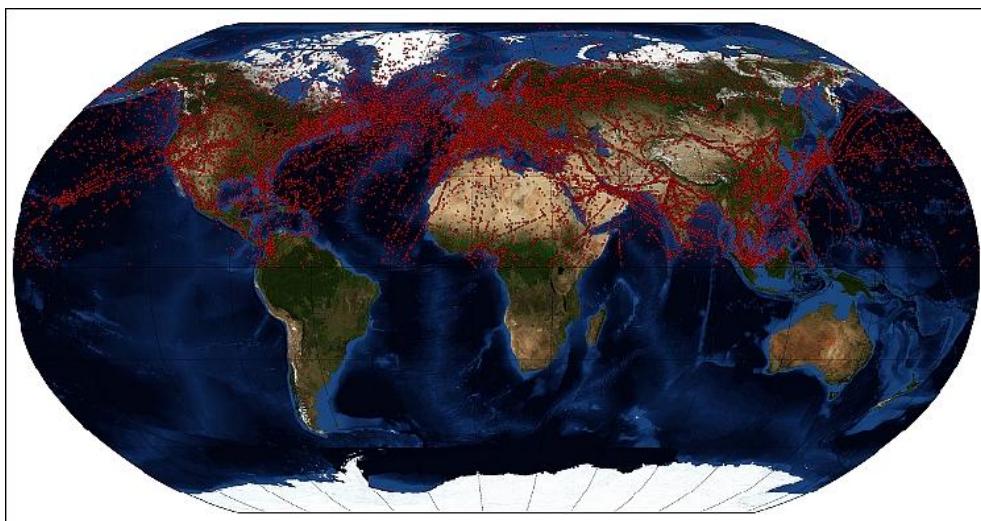


图 3.2-13 截至 2013 年 12 月 GATOSS 收到的几架飞机位置的初步图¹⁵

马来西亚航空 370 航班（MH370 是定期从吉隆坡飞往北京的国际客运航班，于 2014 年 3 月 8 日失去与空中交通管制的联系。马来西亚航空 MH370 失踪时期，GOMX-1 卫星正在空间中运行，虽然 GOMX-1 多次从 MH370 飞机的特定波音 777 机身上接收到 ADS-B 数据，然而，遗憾的是，当 MH370 消失时，GOMX-1 卫星并未在该区域上空。如果 GOMX-1 进入该地区，至少可能有空间 ADS-B 数据有助于准确了解飞机应答器何时关闭以及该时飞机的位置^[51]。

GOMX-3

GomX-3 在 2016 年 4 月的前六个月内从国际空间站发布以来接收到的飞行中的飞机信号已经有数百万个，如图 3.2-14 所示，这些信号可以提供飞行信息，如速度，位置和高度。

¹⁵ 图片来源：参考文献 [48]

与 FlightRadar24 和 Airbus Defense and Space 一起，对北大西洋上空的飞机进行了实时跟踪，直接融入 FlightRadar24 基础设施。目前该卫星已经进入大气层被销毁。

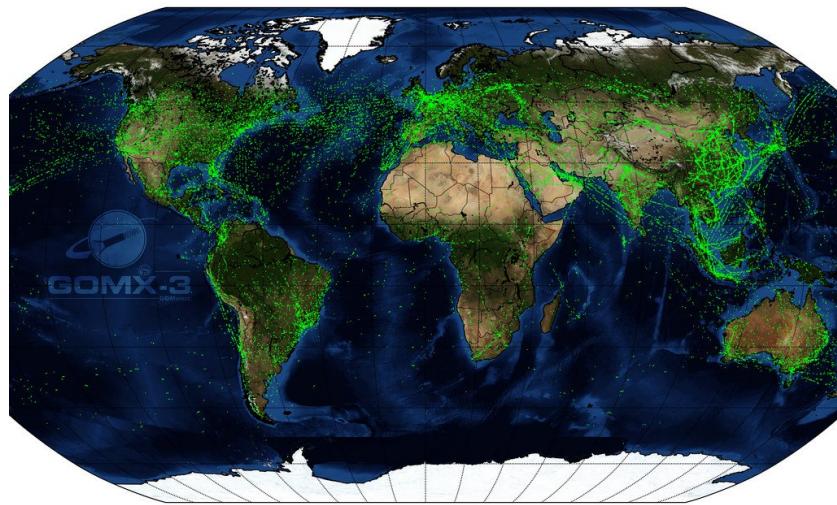


图 3.2-14 GomX-3 在 2016 年 4 月的前六个月内从国际空间站发布以来接收到的飞行中的飞机信号¹⁷

§ 3.3 Aireon 星基 ADS-B 系统

§ 3.3.1 系统概述

Aireon 星基 ADS-B 系统是搭载于第二代铱星（Iridium Next）卫星上的，作为第二代铱星星座系统提供服务的一部分。

利益攸关方

Aireon 的星基 ADS-B 系统的利益攸关方如表 3.3-5 所示。

背景

2012 年 11 月，铱星通信公司与 NAV CANADA 合资建立了 Aireon LLC 公司，这家合资企业将允许全球各地的空中交通管理机构持续跟踪世界各地的飞机。有史以来第一次，全球各地的 ANSP 将能够从极地到极地的追踪飞机，包括海洋空域和偏远地区。这将为航空业带来显著效益，包括大幅节省燃料，减少温室气体排放，提高安全性和效率等。该合资企业将在 FAA、行业和世界主要 ANSP 之间的 PPP 下运营。

NAV CANADA 是一家加拿大的 ANSP，是 Aireon 的第一个客户，因为它管理着第二大空中导航服务并且是跨洋服务最大的提供商。

¹⁷ 图片来源：参考文献 [50]

表 3.3-5 Aireon 星基 ADS-B 系统的利益攸关方

Iridium	卫星星座的拥有者和运营方
Aireon	Iridium 和 NAV CANADA 的合资企业，旨在建立 ADS-B 服务
TAS (Thales Alenia Space)	卫星建造商，与 Iridium 签订合同
Harris Corporation	ADS-B 有效载荷的建造商，与 Aireon 签订合同
ITT-Exeils	系统工程支持提供商，与 Aireon 签订合同，是处理和分销子系统的建造商
NAV CANADA	Aireon 的投资方，为 ADS-B 服务启动客户

2014 年，Aireon LLC 成为 NAV CANADA、IAA (Irish Aviation Authority)、ENAV (Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo, Italy)、NAVIAR (Navigation Via Air, Denmark) 和 Iridium 共同的合资企业，用于融资、开发、部署并使用星基 ADS-B 接收器运行全球解决方案，以便在世界任何地方跟踪和监控飞机。^[36]

铱星历史

- 初代铱星

铱星卫星星座 (Iridium satellite constellation) 是在 20 世纪 90 年代初构想出来的，主要目的是提供全球卫星通讯服务。早期的计算表明需要 77 颗卫星，因此取名为铱星，这是由于这个卫星星座系统的结构类似于化学元素铱（原子序数为 77，原子核周围有 77 个电子）。后来的事实证明，只需要 66 颗卫星即可完成对地球的全面覆盖。

第一代铱星星座由 Iridium SSC (铱星通讯公司的前身) 开发，由摩托罗拉赞助。这些卫星于 1997-2002 年部署。第一代铱星卫星由美国、俄罗斯和中国的运载火箭发射，其中美国的 Delta II 火箭发射其中的 60 颗卫星；俄罗斯的 Proton-K/DM2 火箭发射其中的 21 颗卫星，1 枚 Rokot/Briz-KM 火箭发射其中的 2 颗；中国的“长征 2 号丙改进型”火箭发射其中的 12 颗卫星。

第一代铱星全球覆盖于 2002 年完成，虽然系统满足其技术要求，但在市场上并不成功。传统地面移动通信几乎完全占领市场，铱星电话无法形成稳定的客户群，摩托罗拉公司未能获得足够的收入来偿还与建造星座相关的债务，而铱星公司则于 2000 年 3 月 17 日宣布破产，这是当时美国历史上最大的破产案。

在最初的铱星公司宣布破产后，铱星星座系统仍然存在。铱星在 2001 年接受不足建设投资的 1% (4800 万美元) 新注资后起死回生，美国军方是它主要客户，还被用于伊拉克战争，负责美军以及美军与盟军之间的协调行动。2010 年，铱星通信与波音公司就卫星网络的维护，运行和支持达成了长期协议，波音运营星座，并为铱星的卫星控制系统提供支持^[38]。

尽管基于 LM-700A 型号的原始卫星预计设计寿命仅为 8 年，但 2002 - 2017 年没有发射新卫星来补充星座。

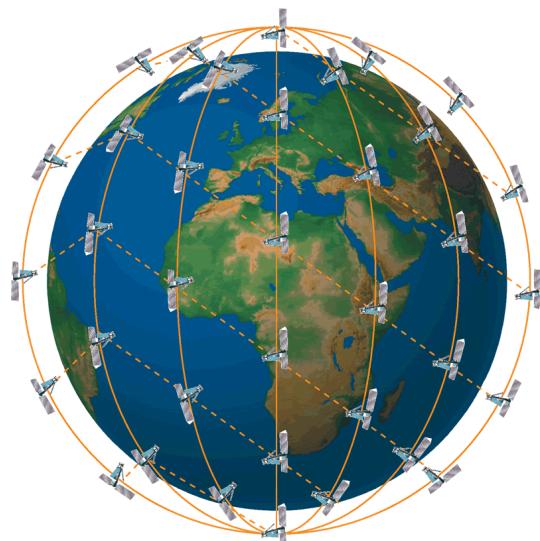


图 3.3-15 第一代铱星星座系统¹⁸

- **第二代铱星**

2008 年 8 月，铱星选择了 Lockheed Martin 和 Thales Alenia Space 两家公司参与下一代卫星星座的采购竞标。2010 年 6 月，该合同的获胜者为 Thales Alenia Space。SpaceX 已经签约将会发射所有的 Iridium NEXT 卫星。Iridium NEXT 卫星如图3.3-16所示。



图 3.3-16 第二代铱星卫星

2017 年 1 月，第二代铱星 (Iridium NEXT) 卫星开始部署到现有的星座中，Iridium SSC 的继承公司铱星通信公司 (Iridium Communications) 已经订购了由 Thales Alenia Space 和 Orbital ATK 共建造的共 81 颗新卫星，包括 66 颗在轨卫星，9 颗在轨备用卫星和 6 颗地面备用卫星。

¹⁸ 图片来源: <https://www.rvmobileinternet.com/satellite-internet-update-iridium-oneweb-spacex-and-hughesnet/>

表 3.3-6 第二代铱星卫星基本参数

帆板展开后翼展	9.4m
卫星质量	约 860kg
帆板收起时尺寸	3.1m × 2.4m × 1.5m
轨道	圆极轨道（低地球轨道，LEO），海拔 780 km，倾角 86.4°，周期 101 分钟，运行速度 24000 km/h（所有卫星总共分布于 6 个轨道上，每条轨道上包含 11 颗卫星）

2017 年 1 月 14 日，第一批共 10 颗 Iridium NEXT 卫星发射成功，标志着该星座部署正式开始。最近的一次发射在 2019 年 1 月 11 日完成，SpaceX 的猎鹰 9 火箭将最后 10 颗卫星送入轨道，将 Iridium NEXT 星座数量增加到 75 颗（66 颗在轨卫星 + 9 颗在轨备用卫星），标志着 Iridium NEXT 星座部署正式完成。

Iridium NEXT 卫星提供了 L 波段高达 128 kbit/s 的移动终端数据传输速度，高达 1.5 Mbit/s 的航海终端数据传输速度，用于固定/可移动终端的 Ka-Band 数据传输速度高达 8 Mbit/s，可以提供机上 WiFi 服务。

Iridium NEXT 为 Aireon 提供了二级载荷，是一个 ADS-B 接收器，并通过 FlightAware 软件由航空公司和空管使用，ADS-B 接收器原型如图3.3-17所示，接收器在卫星上的搭载位置如图3.3-18所示。58 颗卫星上的三级载荷是加拿大 exactEarth 公司的海洋 AIS 船舶跟踪接收器。Iridium NEXT 还提供与太空中其他卫星的数据链接。^[37]



图 3.3-17 Iridium NEXT 上的 ADS-B 接收器²⁰

图片来 源: <https://www.harris.com/solution/reconfigurable-multimission-payloads>

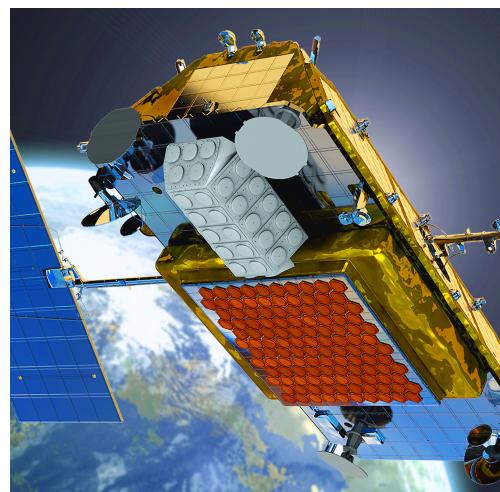


图 3.3-18 ADS-B 接收器搭载方式²¹

图 片 来 源: <https://www.harris.com/solution/reconfigurable-multimission-payloads>

§ 3.3.2 体系结构

Aireon 的星基 ADS-B 系统布局原理如图3.3-19所示。

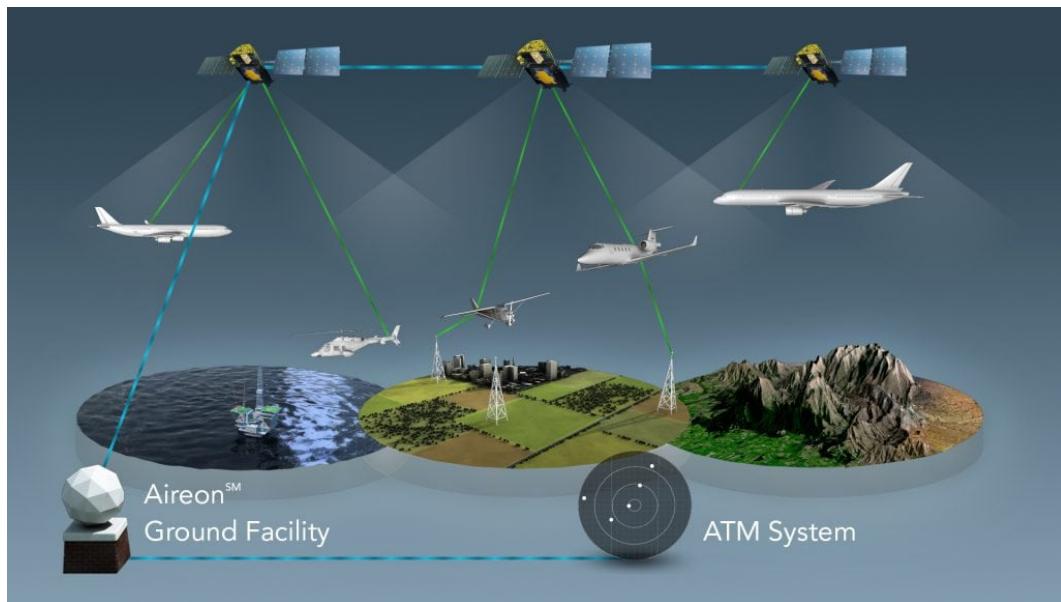


图 3.3-19 Aireon 天基 ADS-B 系统布局原理²²

如图3.3-20所示，从飞机上广播的 ADS-B 信息将由 Harris 建造的有效载荷（AHP）接收，AHP 将接收到的数据在卫星之间互传，然后下行传至 Aireon 的地面传送网络（TPN）和 Aireon 的处理和分配系统（APD）。在合作伙伴 Harris 的帮助下，APD 对数据进行解码和验证，并将数据传递给购买了 Aireon 服务的客户。

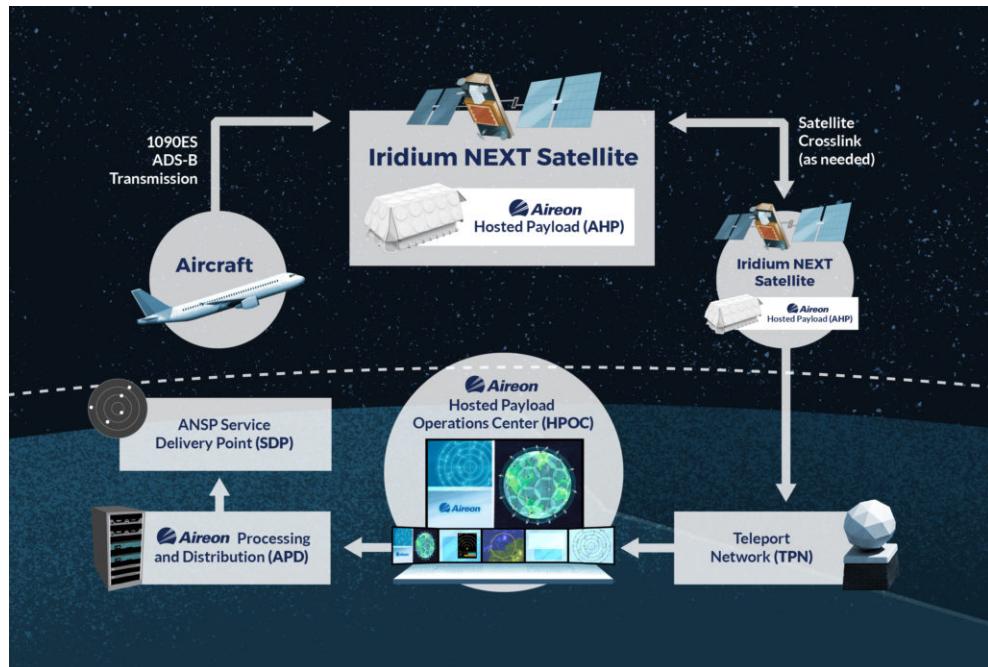


图 3.3-20 Aireon 天基 ADS-B 系统架构²³

²² 图片来源：<https://www.aviationtoday.com/2018/01/19/space-based-ads-b-undergoes-successful-testing/>

²³ 图片来源：参考文献 [29]

§ 3.3.3 系统性能

Aireon 的星基 ADS-B 系统，目前只考虑了在卫星上安装 1090ES ADS-B 接收机，没有考虑安装 1090ES ADS-B 发射机。因此，该系统主要用于飞行监视和追踪，没有 **TIS!/FIS!** 上传能力^[1]。它的主要性能如表3.3-7所示。

表 3.3-7 Aireon 星基 ADS-B 系统的性能

适用性	兼容所有符合 DO-260 标准的 1090ES ADS-B 设备
覆盖范围	可实现全球范围内不间断的覆盖
可用性	大于 99.9%
容量	每个点波束 1000 架飞机
时延	ATC 检测追踪小于 1.5s
更新速率	95% 的响应速度小于 8s
部署	已经部署完毕，2018 年 9 月提供全球的星基 ADS-B 服务
平均寿命	14 年

根据 Aireon 的资料显示，Aireon 的星基 ADS-B 系统卫星组网后的覆盖范围虽然可以覆盖全球，但是其覆盖范围也会受许多因素影响，其中航空电子设备标准确定了功率输出为 125 瓦、250 瓦和 500 瓦的机载发射机的等级，图3.3-21和图3.3-22分别展示了 125 瓦发射机和 250 瓦发射机下的全球卫星组网覆盖范围。

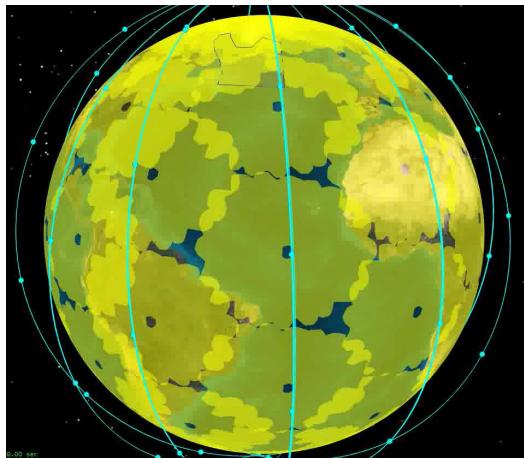


图 3.3-21 125W 功率下的全球覆盖范围²⁵

图片来源：参考文献 [26]

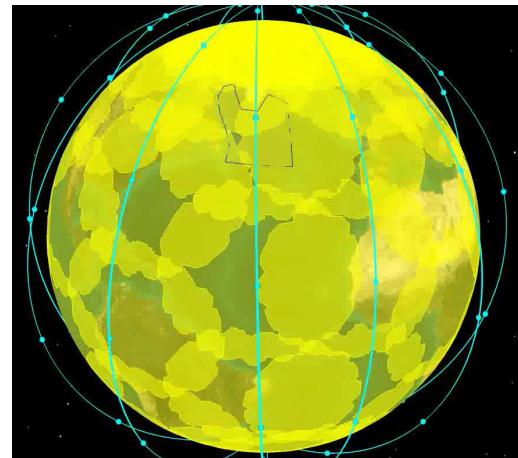


图 3.3-22 250W 功率下的全球覆盖范围²⁷

图片来源：参考文献 [26]

Aireon 的星基 ADS-B 的卫星组网后每个卫星的覆盖范围互相重叠，组成了三角冗余区域，如图3.3-23所示。

²⁵ 图片来源：参考文献 [25]

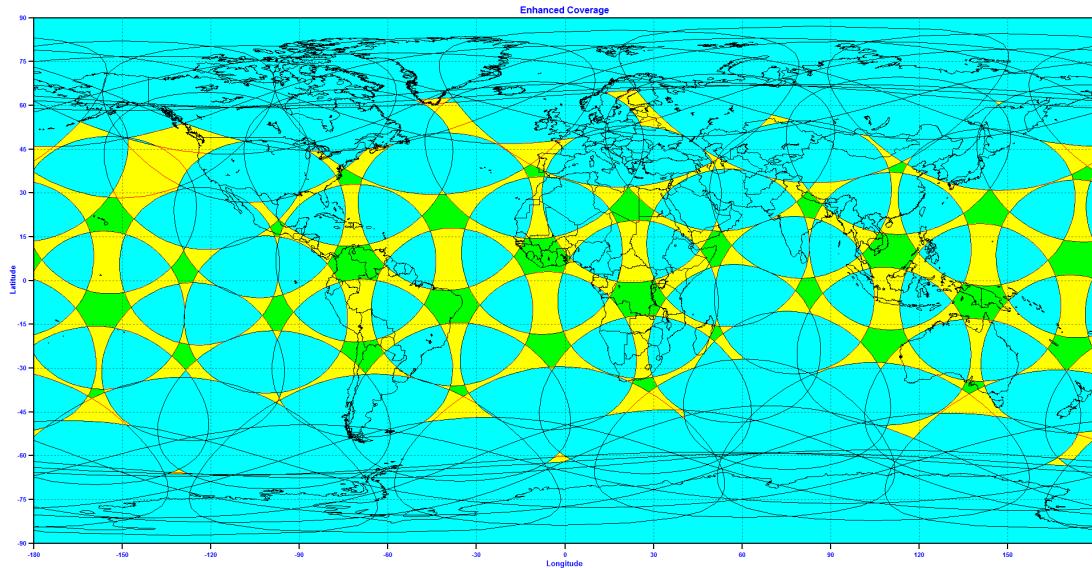


图 3.3-23 Aireon 的星基 ADS-B 覆盖三角冗余区域²⁸

§ 3.3.4 系统评价

目前 Aireon 的星基 ADS-B 系统已经基本部署完成, Iridium NEXT 星座部署已经全部完成, NAV CANADA、NAVAIR、IAA 和 CAAS 等一些地区 ANSP 已经开始体验 Aireon 的星基 ADS-B 服务, 并且该系统的免费 ALERT 服务也已经上线, 供全球航空相关的利益攸关方免费使用。

§ 3.4 ALAS 系统

§ 3.4.1 系统概述

ADS-B Technologies 公司推出了另一款基于卫星的 ADS-B 产品, 该公司与 Globalstar 公司合作, 借助 Globalstar 的卫星星座系统, 将 ADS-B 模块融合到 Globalstar 的卫星上, 提供全球 ADS-B 服务。该公司将天基 ADS-B 系统称为 ADS-B 链路增强系统 (ADS-B Link Augmentation System), 简称为“ALAS”。通过该系统, 地球上任何地方的任意一架飞机可以被实时地安全追踪。

2010 年 5 月 16 日, ADS-B Technologies 公司在官网上发布推出 ALAS 系统的声明, 并声明 ALAS 系统的一个重要特征是它可以作为外围设备使用, 因此几乎可与任何 ADS-B 航空电子设备或地面收发器系统兼容。同时声称该系统已进行了三年多的开发和空中测试, Globalstar, Inc. 将为该技术提供卫星骨干网, 评估单元应在 2011 年第 4 季度之前提供。

2011 年 7 月 22 日, ADS-B Technologies 公司在官网上发布声明声称为了帮助实现 NextGen 空中交通管理议程, ADS-B Technologies LLC 与 Globalstar, Inc. 合作开发了一个全球领先的卫星空中交通管制系统。并同时宣布 2011 年 7 月 13 日, 使用联盟号运载火箭从哈萨克斯坦的拜科努尔航天发射场成功发射了 6 颗新的第二代全球星卫星。ADS-B Technologies 与 Globalstar, Inc. 签署了为期 10 年的正式协议, 该协议于 2011 年

5 月 10 日宣布将在 Globalstar 的第二代卫星上使用其专有的 ADS-B 链路增强系统 ALAS 技术。

2011 年 12 月 28 日, ADS Technologies 宣布最近回应了美国联邦航空局的一项调查要求, 该要求将确定能够在 2018 年开始为美国和海洋地区的偏远山区提供基于空间的自动相关监视 ADS-B 服务。这些系统将增强 FAA 国内地面 ADS-B 基础设施, 最早将于 2013 年投入运营, 并于 2020 年全面实施。2011 年 12 月 28 日, 使用联盟号运载火箭从哈萨克斯坦的拜科努尔航天发射场成功发射了 6 颗第二代全球星卫星。ADS-B Technologies 公司总裁 Skip Nelson 说: “这意味着 Globalstar 现在已经实现了四分之三的目标, 即推出 24 个新的高速, 高容量卫星, 能够支持我们基于 NextGen 空间的空中交通管理系统。”。“这也意味着, 如果美国联邦航空局或任何其他民航组织要求, 我们将在 2014 年底之前进行全面的运营测试。”

2012 年 5 月 7 日, ADS-B Technologies 宣布使用 Globalstar 卫星网在阿拉斯加深山通道完成其革命性的基于空间的 ADS-B 空中交通管制监视系统的首次公开演示。在 4 月的第三周进行的测试最终证明, 现在可以在任何高度和地球上任何地方的任何地形上进行高度准确, 可靠和低延迟的监视。

2014 年 9 月 3 日, ADS-B Technologies 宣布完成 7000 nm 双链 ALAS 的公共飞行演示, 演示于 8 月 19 日开始, 从安克雷奇出发, 并通过横跨海湾的一次低空试飞达到了顶峰。在墨西哥完成测试的飞机于 9 月 2 日返回其安克雷奇主场。该航班飞行超过 7000 英里, 包括墨西哥湾的 1100 英里往返里程, 从凤凰城直飞西雅图, 并在阿拉斯加湾上空飞行。在飞行期间, ADS-B Technologies 的首席科学家兼 ALAS 的合作设计师 Mike Melum 不仅同时传输了 ADS-B 链路上的低延迟 1 秒报告, 还演示了实时 Globalstar SAT-FI 互联网和 Satcom 语音连接飞机还携带了两个低成本的 Globalstar SPOT 单工跟踪设备, 并有效地证明了它们能够为整个 7000 nm 行程提供无缝且非常精确的 2.5 分钟和 5 分钟位置报告。



图 3.4-24 ALAS 系统的飞行演示²⁹

图片来源: 参考文献 [46]



图 3.4-25 ALAS 系统墨西哥湾上空的飞行演示³⁰

图片来源: 参考文献 [46]

2015 年 8 月 3 日, ADS-B Technologies 宣布完成其 ALAS 系统的另一次长途飞行演示, 演示于 7 月 23 日在威斯康星州奥什科什举行的 2015 年 EAA AirVenture 飞行大会上。航班覆盖超过 5700 海里, 包括加拿大西部和美国北部、落基山脉、西雅图和阿拉斯加东南部的最后一站, 直到 7 月 30 日在安克雷奇的 ADS-B 技术基地降落。该航班再次证明 1090ES 和 UAT 基于空间的 ADS-B 在所有环境和长时间内都能很好地工作。ADS-B Technologies 的首

席科学家 Mike Melum 评论说：“我们现在有超过 100 个飞行小时的 ALAS 性能数据。”

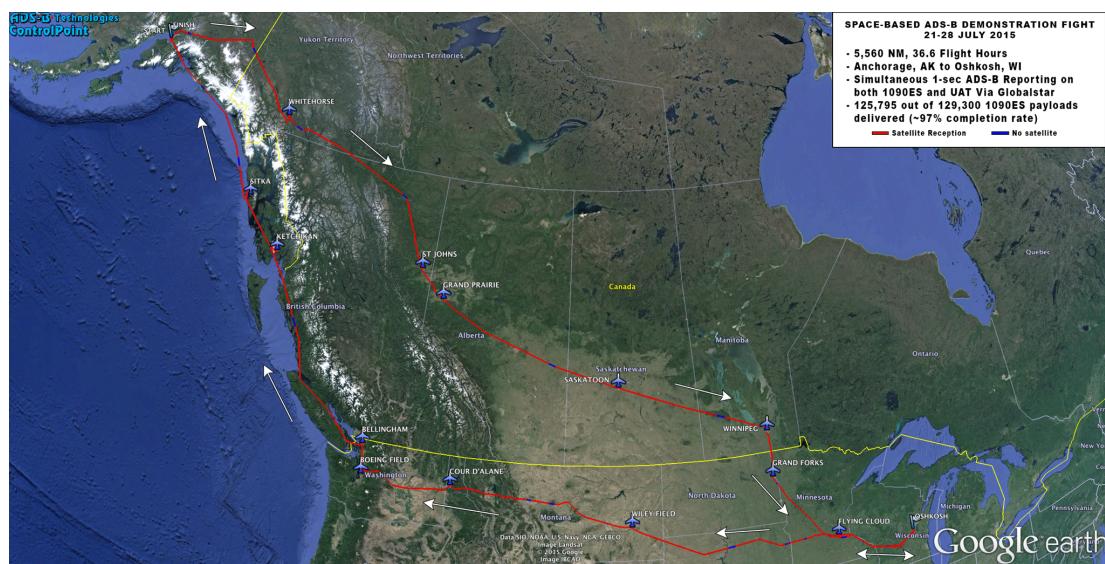


图 3.4-26 ALAS 于 2015 年 7 月 21 日的飞行演示³¹

2016 年 9 月 28 日, Globalstar 和 ADS-B Technologies 宣布完成 NASA 兰利研究中心研究飞行与 Cirrus SR22 无人机系统 (UAS) 代理设计测试 ALAS 的操作。初步结果表明飞机与 Globalstar 卫星系统之间的持续通信, 在极端机动期间只有短暂的中断, 并迅速重新连接。Cirrus SR22 测试飞行的重点是测试 ALAS 使用远程控制功能在飞机和 NASA 地面控制站之间连续传递双向数据的能力。两个 40 分钟飞行中的第一个包括极端机动, 两个 60 度倾斜角度转弯专门用于测试 ALAS 连接。第二次飞行在一系列涉及航向和高度变化的机动过程中产生了类似的结果。“美国宇航局不仅证明 ALAS 在机动方面表现良好, 而且还证实飞行控制命令, 飞机状态和状态等复杂数据可以通过同一个强大的 Globalstar 链路实时传递给控制器,” ADS-B Technologies 总裁 Skip Nelson 说。“这告诉我们, ALAS 可以在飞机和地面之间提供单一, 安全且可能加密的门户。”^[46]

Globalstar 简介

Globalstar, Inc. 是一家美国卫星通信公司，运营着用于卫星电话和低速数据通信的 LEO 卫星星座，有点类似于铱卫星星座和 Orbcomm 卫星系统。Globalstar 第二代星座由 24 颗 LEO 卫星组成。

Globalstar 项目于 1991 年成立，是 Loral Corporation 和 Qualcomm 的合资企业。1994 年 3 月 24 日，两家赞助商宣布成立 Globalstar LP，这是一家在美国成立的有限合资企业，其中包括阿尔卡特，AirTouch，德国航空，现代和沃达丰等八家公司的财务参与。当时，该公司预计该系统将于 1998 年推出，基于 18 亿美元的投资。

1995 年 1 月, Globalstar 从美国联邦通信委员会获得了美国的频谱划分, 并继续与其他国家进行谈判, 以获得在其国家使用相同无线电频率的权利。

³¹ 图片来源：参考文献 [46]。

第一批卫星于 1998 年 2 月发射，但由于 1998 年 9 月发射失败导致系统部署延迟，导致俄罗斯航天局在发射中丢失了 12 颗卫星。2000 年 2 月，它发射了 52 颗卫星中的最后一颗——第 48 颗卫星和 4 颗在轨备件。另外 8 颗未发射的卫星被保留为地面备件。

1999 年 10 月，该系统开始进行“友好用户”试验，共有 48 颗计划卫星中的 44 颗参与实验。1999 年 12 月，该系统开始为 200 名用户提供有限的商业服务，其中包括 48 颗卫星（轨道上没有备件参与）。2000 年 2 月，它在北美、欧洲和巴西开展了 48 颗卫星和 4 颗备件的全面商业服务，初始价格为每分钟 1.79 美元。

2002 年 2 月 15 日，Globalstar 前身公司（旧 Globalstar）及其三家子公司根据美国破产法第 11 章提交了自愿申请。

2004 年，旧 Globalstar 的重组工作已经完成。重组的第一阶段于 2003 年 12 月 5 日完成，当时 Thermo Capital Partners LLC 被视为获得业务的运营控制权，以及某些所有权和风险。Thermo Capital Partners 成为主要所有者。

Globalstar LLC 于 2003 年 11 月成立为特拉华州有限责任公司，并于 2006 年 3 月 17 日转为 Globalstar, Inc.。

2007 年，Globalstar 向太空发射了 8 颗第一代备用卫星，以帮助弥补其在轨卫星的过早失效。2010 年至 2013 年期间，Globalstar 发射了 24 颗第二代卫星，以恢复其全面服务系统。Globalstar 第二代卫星如图 3.4-27 所示。

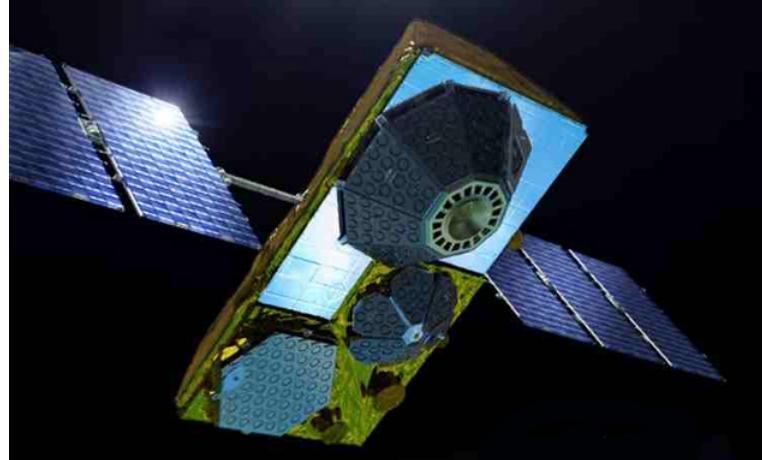


图 3.4-27 Globalstar 第二代卫星³²

2010 年至 2011 年间，Globalstar 将其总部从硅谷迁至路易斯安那州的卡温顿，部分原因是利用该州的税收优惠和低廉的生活成本。

2018 年 4 月，Globalstar 宣布将与 FiberLight 合并，交易价值 16.5 亿美元。^[45]

³² 图片来源：<https://chinese.engadget.com/2014/01/30/globalstar-sat-fi/>

§ 3.4.2 体系结构

ALAS 系统的体系结构如图3.4-28所示，其体系结构与 Aireon 的星基 ADS-B 系统相似，可以同时支持 1090ES 和 978UAT 数据链，但 ALAS 系统具备 TIS-B³³/FIS-B³⁴ 上传能力，即卫星上不仅仅携带了 ADS-B 接收器，而且还可将相关信息转发给飞行器。TIS-B/FIS-B 上传服务使用卫星上的 S 波段天线转发。

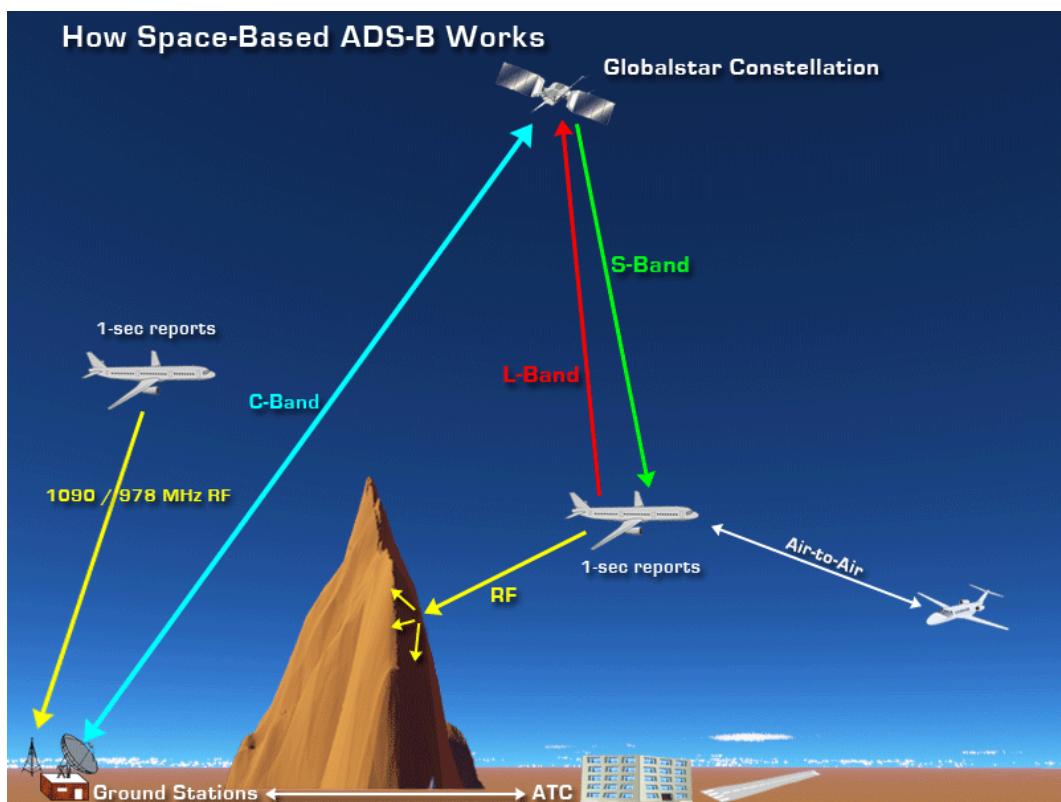


图 3.4-28 依托 Globalstar 的 ALAS 系统体系结构³⁵

铱星系统和 Globalstar 系统不同点之一在于其卫星数据下行至地面的方式，铱星系统的原理是通过卫星间信道网络首先将需要下行的信息在卫星间通信传播，最后传到位于美国上空的卫星，通过该卫星将信息下传至美国的地面网关，再将信息通过美国的地面网关传输到其他节点。而 Globalstar 的做法是在全球各地设置网关，然后卫星网络直接将信息下行至世界各地的网关，然后直接经由世界各地的关口站将数据传送至各个节点，Globalstar 的体系结构在时延上要远远小于铱星系统。图3.4-29反映了全球星的双工网络通过 32 个地面网关覆盖了世界上 80% 的重要航路。

³³TIS-B 是一种监视服务，称为交通信息服务广播，它从一个或多个基于雷达的监视源 ASDE-X 和 WAM 中获取交通信息，并将此交通信息上传到配备有 ADS-B 的飞机。TIS-B 使配备 ADS-B 的飞机能够接收到由雷达和上述系统监视到的非 ADS-B 飞机的位置报告。978UAT 和 1090ES 都支持 TIS-B 服务。

³⁴FIS-B 是一种上行链路服务，提供天气以及其他航空信息（即 METAR、TAF、SIGMET、PIREP、NOTAM、NEXRAD、特殊用途空域状态等）。使用驾驶舱显示器，只有 978UAT 数据链支持 FIS-B 服务。

³⁵图片来源：参考文献 [27]

³⁶图片来源：参考文献 [27]

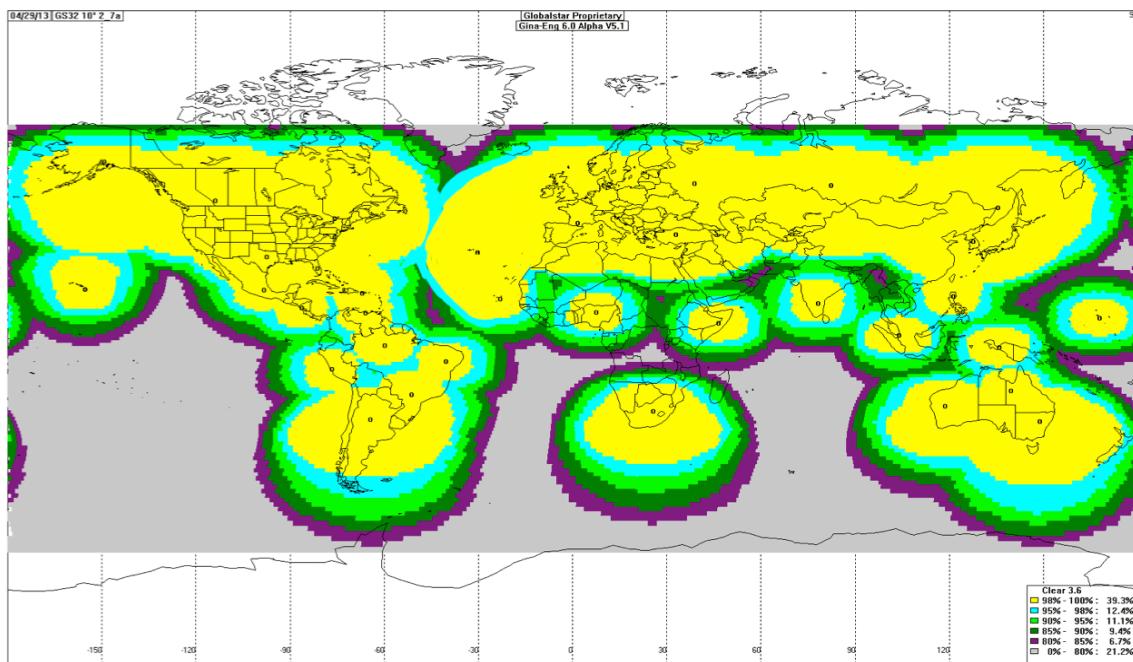


图 3.4-29 Globalstar 的双工网络全球覆盖范围³⁶

§ 3.4.3 系统性能

依托“全球星二代”系统的 ALAS 系统端到端 (end-to-end) 测试性能数据如表 3.4-8 所示。

§ 3.4.4 系统评价

目前没有找到 ALAS 系统已经部署完成的证据，也没有证据表明其已经正在向世界上某些 ANSP 提供服务，与本项目相关的网站建设与相关资料体系非常不完善，目前仅能够找到资料证明其已经开展了相关实验并给出了实验数据，其承诺的服务交付时间也在一拖再拖，并且没有证据表明该系统可以达到 Aireon 的星基 ADS-B 系统目前的影响力。

根据 2014 年 10 月 24 日 Globalstar 公司法律总顾问及监管事务副总裁 L. Barbee Ponder IV 写给联邦通信委员会秘书 Marlene H. Dortch 的一封公开信，Globalstar 与铱星公司因为通信频段分配问题产生矛盾，Globalstar 公司认为委员会的裁决会对 Globalstar 的运营产生损害，并且直接损害其客户的利益，其中明确表述了会对 ALAS 系统造成的损害，而这种损害对其竞争对手铱星公司部署星基 ADS-B 系统是有利的^[28]。

§ 3.5 “吕梁一号”微纳卫星

§ 3.5.1 项目概述³⁸

国防科技大学航天科学与工程学院自主设计和研制的“天拓三号”微纳卫星发射升空后，主星“吕梁一号”星载 ADS-B 接收系统，成功实现对全球范围航空目标的准实时目标监控、空中流量

³⁷ 数据来源：<http://www.ads-b.com/space-based.htm>

³⁸ 由于国内这方面技术资料保密性，所以可用资料很少

表 3.4-8 使用全球星卫星的 ALAS 系统端到端测试性能³⁷

适用性 (Applicability)	ALAS 是一种简单、质量轻、低成本的外围设备，可与现有的任何 1090ES 或 UAT 电子设备配合使用，保证正常的空-地和地-空 ADS-B 传输不会中断。ALAS 还旨在与任何国家现有的 ADS-B 地面基础设施兼容
覆盖范围 (Coverage Area)	到 2016 年，100% 覆盖美国本土 (CONUS)、GOMEX、加勒比海 (Caribbean)、北大西洋 (NAT) 和北太平洋 (NOPAC)；到 2019 年，100% 覆盖剩余地区
可用性 (Availability)	到 2016 年，可用性为 99.99%；到 2019 年，可用性为 99.999%
容量 (Capacity)	每架卫星可容纳大于 3000 架飞机 (approx 1,800sm diameter)
时延 (Latency)	从飞机到地面小于 200 毫秒；从端到端小于 300 毫秒
更新率 (Update Rate)	1 秒
完整性 (Integrity)	10E-6
精度 (Accuracy)	UTC 时制下，在 98% 的时间里，相同目标的射频视距 (RF line-of-sight) 导出位置和天基 ALAS 导出位置之间的显示位置差异小于 50 英尺
安全性 (Security)	独一无二的安全。ALAS 与每架飞机建立了独特的双向连接，可以抵抗入侵、干扰或欺骗，是唯一的可以轻松加密的 ADS-B 形式。简单的防篡改设计还可以包括一个自供电备用系统，该系统将在未经授权而关闭飞机的主 ADS-B 转发器的情况下继续广播飞机的位置
可扩展性 (Scalability)	高。系统架构的成本相对较低且简单，通过增加更多卫星和/或地面站，可以提高覆盖范围，可用性和容量
部署 (Deployment)	即刻就绪。该技术已经过超过 100 小时的飞行测试。Globalstar 在过去两年中发射了 24 颗新的第二代 ALAS 卫星。2016 年第 3 季度可以提供基本的服务，2019 年可以开始提供关键服务
成本 (Cost)	低。由于 ALAS 不需要新的卫星或太空中的其他技术，因此 ANSP 的买入和重复成本很小。它还可以与现有的 ADS-B 地面基础设施轻松连接。The price point for Part 121 avionics is less than \$40k and installation should be in the 20–25 MH range for most commercial aircraft.

测量，接收的报文数据可为航空安全、航线优化、航空管制和提升航空效率提供信息服务。此举表明，国内首次进行的星载航空目标自动识别信号接收试验取得圆满成功。

“吕梁一号”微纳卫星由国防科大吕梁军民融合协同创新研究院立项支持，该校微纳卫星技术创新团队在“天拓三号”主星及其星载 ADS-B 系统研制中，突破了通用化多层板式微纳卫星体系结构、全球海空动态目标测量与信号接收、多维信息获取与融合处理等一系列关键技术，使星载 ADS-B 系统具有灵敏度高、运行稳定性好、数据存贮量大、质量轻、功耗低、效费比高等特点，其技术性能达到国际领先水平，有力提升了我国实用型微纳卫星研制与应用能力。

9 月 20 日上午，“天拓三号”微纳卫星在山西省太原卫星发射基地搭载“长征六号”火箭顺利升空。“天拓三号”是由 6 颗卫星组成的集群卫星，包括 1 颗 20 公斤级的主星、1 颗 1 公斤级的手机卫星和 4 颗 0.1 公斤级的飞卫星。卫星入轨后，手机卫星和飞卫星与主星分离，以

“母鸡带小鸡”的方式通过太空组网，实现6颗卫星集群飞行。

从“天拓三号”分离释放的手机卫星“智能号”，是国内首颗以商用智能手机主板和安卓操作系统为核心设计完成的卫星；释放的4颗“星尘号”飞卫星是国内首批飞卫星，也是世界上最小的卫星之一。主星与手机卫星、飞卫星之间将开展子母式卫星在轨释放、空间自组织网络、多星协同测控等空间技术试验在轨技术验证。^[43]

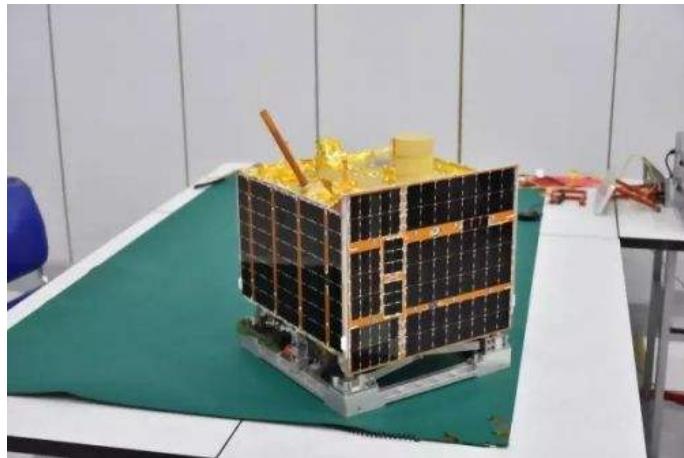


图 3.5-30 天拓三号卫星主星吕梁一号³⁹

“吕梁一号”是我国第一颗以地方城市命名的微纳卫星，主要开展新型星载船舶自动识别系统（AIS）信号接收、星载航空目标信号广播式自动相关监视系统（ADS-B）信号接收、火灾监测、20公斤级通用化卫星平台技术等系列科学试验和新技术验证。它是“吕梁号新型船舶自动识别信号接收系统”中的首颗微纳卫星。该系统能对全球范围船舶快速完成位置、航向、航速等信息的接收，实现了对我国现有岸基 AIS 系统的有效补充。航空目标信号接收的星载 ADS-B 则可对全球范围航空目标实行准实时目标监控、空中流量测量，为航线优化和提高航空飞行效率提供信息服务，这是我国首次开展此项卫星载荷在轨试验。

§ 3.5.2 实验结果

据介绍，主星“吕梁一号”平均每天可接收全球范围 40 多万条 ADS-B 报文数据，幅宽超过 2000 公里，从每条报文中可以识别该航空目标的机型、代码、位置、速度、高度和航线等信息，数据清晰，航线及密度一目了然。

目前“吕梁一号”在轨运行状态良好，ADS-B 报文数据接收稳定，系统已实现业务运行，正在根据有关用户需求开展航空信号报文服务。有关专家指出，有了星载 ADS-B 系统，就能有效避免“马航”、“亚航”失联这样的事件，还能从其海量数据中分析提取对航空管制、物流监控、经济形势有潜在价值的信息。

“吕梁一号”微纳卫星成功发射，标志着山西吕梁市与国防科大落实军民融合战略取得标志性成果。

2013 年，国防科大吕梁军民融合协同创新研究院联合国防科大航天科学与工程学院组建山西省微纳卫星工程技术研究中心，开展星载船舶自动识别信号接收微纳卫星系统研制。“吕梁一号”的

³⁹ 图片来源：http://www.cannews.com.cn/2015/1114/139804_2.shtml

成功发射，不仅是吕梁发展史上卫星发射零的突破，也标志着吕梁市与国防科技大学在军民融合协同创新上迈出了重要一步，对推动我国军民融合发展具有积极的示范和促进作用。下一步，微纳卫星工程技术研究中心将研制发射多颗微纳卫星并实现多星组网，获取全球船舶动态数据，建立全球船舶动态数据库，同时推广微纳卫星的技术应用，带动相关产业的发展。^[44]

第 4 章

系统面临的挑战

目前根据前一章所提到的几个系统或者实验项目的结果来看，都提出了各自星基 ADS-B 系统在实践中面临的种种问题与挑战，主要包括以下几个方面。

§ 4.1 卫星星座规模与数据价值

星基 ADS-B 主要是利用卫星上的接收机来接受 ADS-B 信号，进而实现对飞机位置的监视，卫星在接收到 ADS-B 信号之后，还需要将信号下行至地面网络，根据数据下行方式的不同，可以将星基 ADS-B 服务分为离线数据和在线数据两个方面。

通常而言，离线数据较容易实现，也通常被用于科学的研究或者实验验证，它可以利用单颗卫星或者一小队卫星（3-6 颗）在低地球轨道上接收 ADS-B 数据，然后将数据存储到自身携带的存储设备中，在卫星经过一个或者多个地面站时，数据将通过下行链路传递至地面站，这样的数据是有延迟的，通常会有大规模的延迟，不能实现实时监视，这种数据通常有两种意义，一是用于对技术进行验证或者研究数据质量等科学的研究性质的目的；二是如果让这种数据发挥实用价值的话，如果某架飞机在洋区失踪了，如果在该飞机失踪时刻恰巧该卫星位于失踪飞机上方信号可接收范围内，这种数据可以提供飞机失踪前最后的位置报告。

展开来说，低轨卫星的飞行速度非常快，90 分钟左右即可环绕地球一圈，单颗卫星在经过某架飞机上方时，只能接受到某架飞机极短的一段位置报告，如图4.1-1所示，是 AOS 实验项目中接收到的中国丽江机场某架飞机的航迹，在卫星飞过的过程中，仅接收到了短短一小段飞机的航迹，无法实现对某架飞机的连续跟踪，所以说单颗卫星的离线数据其应用价值不大。

若想真正将该系统运用到实际中来，必须通过在线数据，从而必须实现卫星星座组网（40-70 颗），采用卫星星座覆盖整个地球，才能够在同一时刻接收到全球飞机的 ADS-B 信号并实现对某一架飞机的连续跟踪，当一颗卫星超过某架飞机的信号接收范围时，另一颗卫星又处于该架飞机的信号接受范围内，可以继续接收该信号，但是这对数据处理提出了要求，要求数据处理算法能够无缝接洽两颗或多颗卫星上的同一飞机信号。通过卫星网络的数据下行也有多种方式，比如携带 ADS-B

¹ 图片来源：参考文献 [15]

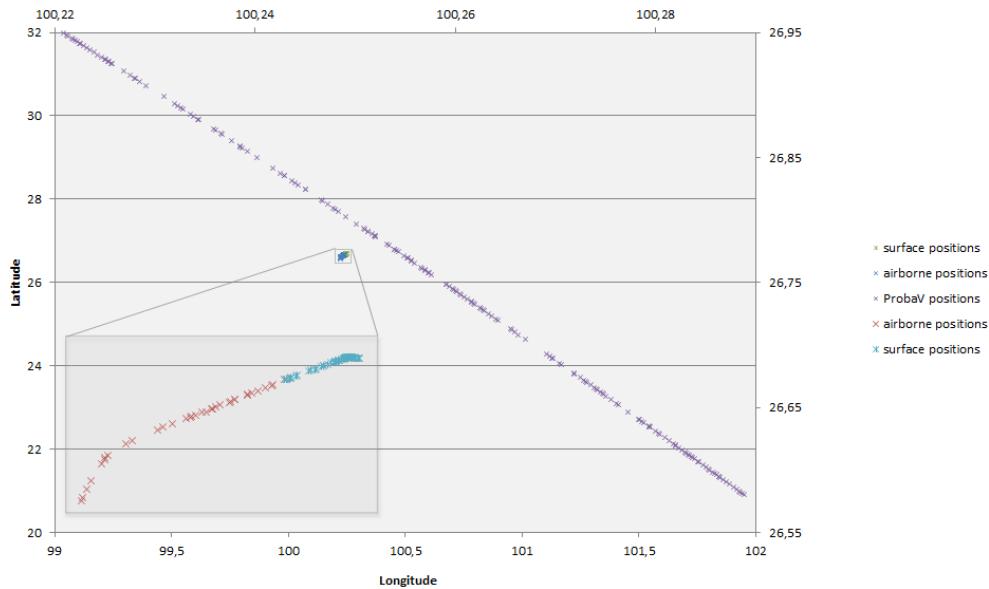


图 4.1-1 AOS 项目中接收到的中国丽江机场附近某架飞机的航迹¹

接收器的卫星可以通过卫星间的网络将数据传输至地球同步数据中继卫星，数据中继卫星再近乎实时地连接到地面 ATM 设施。或者直接通过星基 ADS-B 卫星之间的通信网络将数据下传至固定地面站，这即是在线数据传输。

地面站的数量也决定在线数据的延迟时间，这一点可以通过 Aireon 的铱星网络和 ALAS 的 Globalstar 看出区别，铱星网络地面站仅建在美国，但是依托其星座卫星数量多，并且可以实现星间通信，铱星网络可以通过星间通信将全球所有卫星采集的数据实时传输到位于美国上空的卫星，再通过位于美国上空的卫星将数据下传至地面站，最后通过地面网络发送至全球各地的用户。Globalstar 则采用了不同的思路，Globalstar 的星座数量不如铱星庞大，但是其在全球各地建立了多个地面关口站，大约有 33 个地面关口站，用于接收 24 颗 Globalstar 第二代卫星的数据，这样，所有卫星采集的数据都能不需通过星间链路而直接下传至地面，其数据延迟会大大减少。

建设卫星网络和多个地面站需要投入大量的资金。

§ 4.2 信号强度

根据 DLR 的 AOS 实验项目，在信号强度上，该实验项目的结果提出了如下几个需要克服的问题。

1. 由于信号相关性差，1090MHz S 模式格式不适用于接收弱信号（<-90dBm）

DLR 的 AOS 实验项目的卫星上的 FPGA 配备了一个 32 位嵌入式处理器来处理星载接口。通过 RS-422 UARTs 以 115kbps 的波特率与航天器通信并指挥接收机。接收机的输入灵敏度取决于传入消息的频率条件，最小触发电平约为 -96dBm。

必须注意 LEO 中的有效载荷正在寻找非常弱的 Mode-S 信号。一般来说，在 -90dBm 以下的典型的飞机应答器应用还没有开发出来，而且相关性能很差。在这种创新的方法中，一种

附加的信号处理算法也利用了发射信号的相位信息。该技术将在任务运行时进行测试和改进，因为接收器 FPGA 配置和处理器固件可以从地面更改。这个特性已经成功地测试过了。

由于卫星上的限制，在轨道上没有对解码后的 S 模式电报位进行进一步的预处理。相反，所有的原始电报数据都向下连接到地面进行解码和分析。这允许最大的灵活性，因为系统不限于 DF17。^[14]

2. 飞机与 LEO 卫星之间的距离约为 800 公里（444 海里）

1090ES ADS-B 的“正常”覆盖范围为：空中到空中为 50NM，空中到陆地为 150NM。

在空间接收 ADS-B 报文最重要的方面是卫星上 1090MHz ES 信号的接收条件。接收卫星在大约 820 公里的高度，而发射信号的飞机大约在 0 至 12 公里的高度。与最大射程 300 公里的地面 ADS-B 监视相比，在 820 公里高度运行的 LEO 卫星与飞行器之间的信号路径要长得多，导致 ADS-B 接收机的信号电平较低。因此，S 模式信号必须在噪声水平上通过相关处理进行检测。

3. 关于信号的其他因素

另外如下几条因素也可能导致 ADS-B 信号丢失。

- 由于卫星天线垂直辐射模式和飞机天线垂直辐射模式的形状造成的射频信号损失
- 当多个到达卫星机载 ADS-B 天线的消息同时重叠，从而无法被 ADS-B 接收机解码
- 如上一节所说，卫星的速度约为 27000 公里/小时，因此每架探测到的飞机的观测时间有限，最多约 3 分钟
- 此外，由于将卫星上的 ADS-B 接收器作为有效载荷加以集成，基于卫星的监测的轨道内试验演示受到进一步的限制：考虑到卫星上其他的有效载荷，卫星必须调整姿态作出有利于其他有效载荷进行观测的姿态，这会影响 ADS-B 信号的接收
- 天线安装位置不是直接为基于 1090ES 的空间接收优化，而是为了不干扰主卫星任务和其他承载有效载荷而做出的妥协

综上所述，要优化 ADS-B 信号的接收，卫星必须为该任务进行专门的设计。

§ 4.3 调制方案

DLR 的 AOS 实验项目的实验结果声称脉冲位置调制（PPM）不适合对噪声水平附近的信号进行解码，但并未给出原因。

§ 4.4 静锥区

上一章提及的多个项目都提到了静锥区对信号接收的影响。

飞机装有两个 ATC 天线，一个在机身顶部，一个在机身底部，它们交替发射。由于几何因素限制，卫星将接收来自顶部天线的信号。顶部天线典型的垂直天线辐射模式如图 4.4-2 所示。

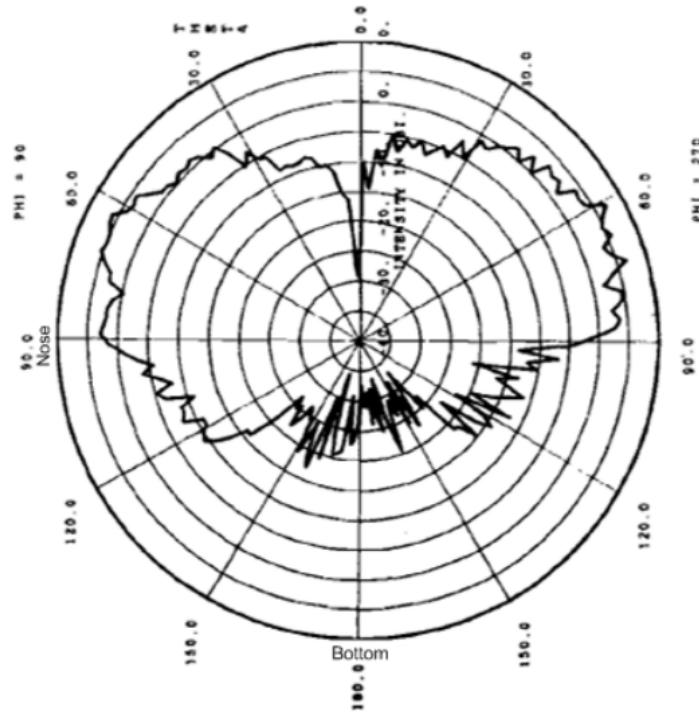


图 4.4-2 顶部安装的 L 波段天线的垂直天线辐射图²

该形状为环形，中心凹处为 0 度，即朝向天顶的方向，于是在飞行器垂直上方形成所谓的“静锥区”，这个静锥区是发射天线中的常见问题，一般对于雷达来说，由于其仰角的限制，同样存在所谓的颈椎区，即雷达正上方区域是辐射无法到达的区域。

因此，在卫星上，或多或少位于卫星正下方的飞行器可能不会被探测到。应该指出，根据天线的安装位置和机身的几何形状，不同飞机类型的辐射模式有很大的不同。所以对一些飞机来说，中心凹处更宽，凸起处更浅。

而接下来再看卫星上的 ADS-B 信号接收器的天线辐射图，如图4.4-3所示。

DLR 的 AOS 实验得到了卫星天线覆盖区中不同区域接收到的 ADS-B 报文数量分布的足迹，如图4.4-4所示，该图显示了 2014 年 5 月收到的所有位置消息的足迹。值得注意的是两个峰值，一个在卫星运动方向前方，峰值较低，另一个在卫星运动方向后方，峰值较高。这个谱的分布是不对称的，这由许多原因引起，比如卫星上的贴片天线的安装位置不对称、安装在卫星下侧的其他设备和在下表面的前边缘上突出的太阳能电池板。

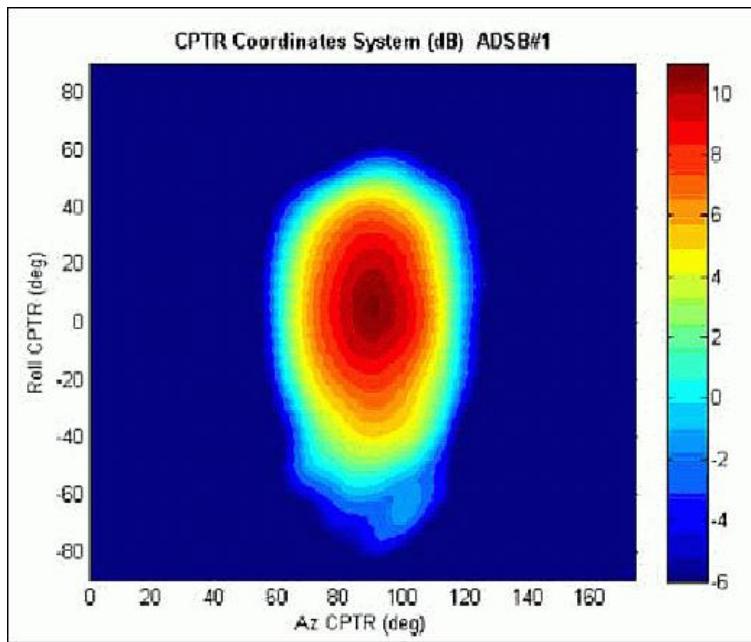
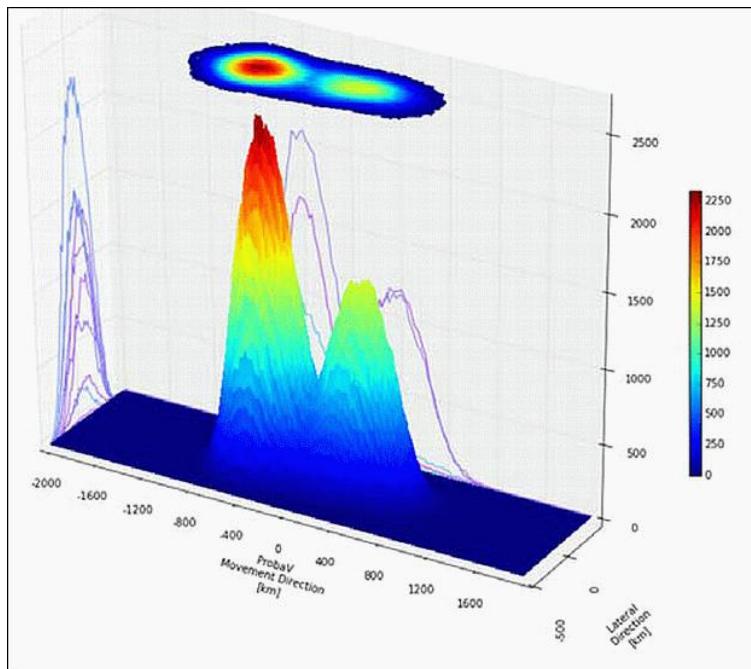
从足迹的形状，即图4.4-4可以看出，这两种“互补”的辐射模式并不相互补偿，导致 ADS-B 信号接收在足迹中间形成一个清晰的凹槽，这是由飞机天线的“静锥区”造成的。

在上一章中，同样提及了 Aireon 的星基 ADS-B 项目中对于静锥区的考虑。该项目中提及，航空电子设备标准确定了功率输出为 125 瓦、250 瓦和 500 瓦的机载发射机的等级，当全球的飞机上的发射器都以 250W 的功率工作时，其 L 波段天线上方的静锥区非常小，这影响可以忽略不计，这时 Aireon 的卫星网可以实现对全球飞机的全部覆盖，即收到所有飞机的信号，这时的

² 图片来源：参考文献 [15]

³ 图片来源：参考文献 [15]

⁴ 图片来源：参考文献 [15]

图 4.4-3 Proba-V 卫星天线辐射图³图 4.4-4 所有接收到的位置信息在天线覆盖区中的分布足迹⁴

模式图如图4.4-6所示。而当全球所有飞机都以 125W 的功率工作时，这时位于卫星正下方的飞机的静锥区的影响不可以不考虑，会产生监控盲区，也就是位于卫星正下方的飞机是看不到的，这时卫星监控范围如图4.4-5所示。

这个静锥区可以用图4.4-7解释，125W 应答器会造成这种监视空档，Aireon 对空档的说明如下：

- 空档相对较短，对于 125W 的飞机来说，最多 35 秒
- 目前这种由静锥区引起的间隙导致 1 或 2 次更新暂时丢失，更新速度为 15 秒，相当于雷

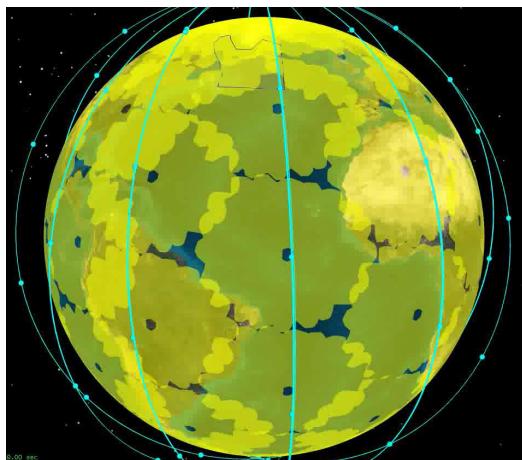


图 4.4-5 125W 功率下的全球覆盖范围⁵

图片来源：参考文献 [26]

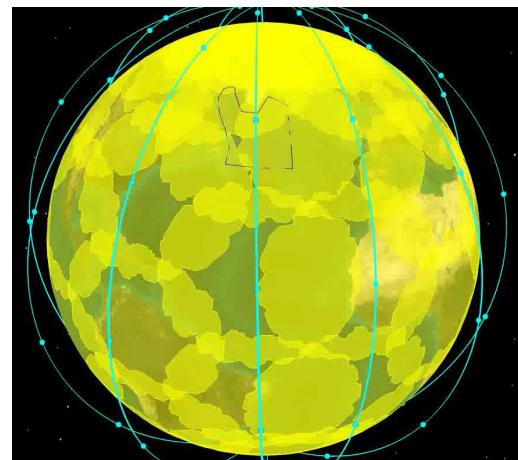


图 4.4-6 250W 功率下的全球覆盖范围⁶

图片来源：参考文献 [26]

达滑行

- 对于海洋航班，即使有锥形静音，Aireon 15 秒更新的时间百分比也远远超过 95%

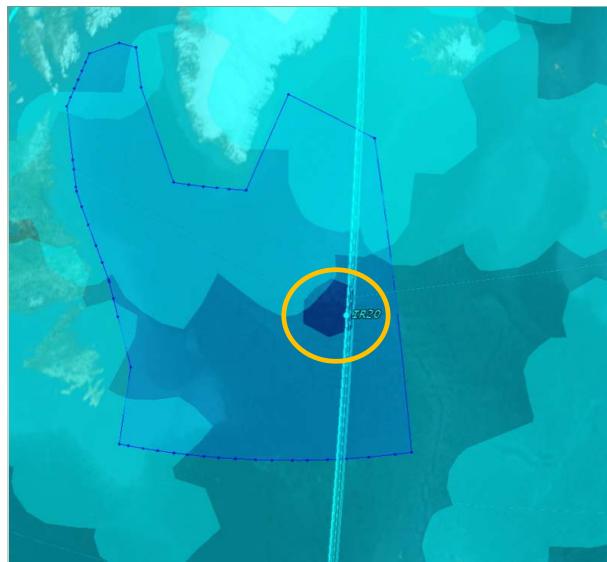


图 4.4-7 静锥区的影响⁷

§ 4.5 报文冲突

丹麦的 GATOSS 实验项目提供的实验结果中提示了报文冲突的问题，卫星将看到大面积的 ADS-B 信号干扰拥挤的空域。

- 在拥挤的空域（如中欧上空），预计操作不可行，但在覆盖海洋区域方面，预计有足够的性能
- GATOSS 任务将准确描述哪里有可能提供操作服务，哪里没有

⁵ 图片来源：参考文献 [26]

如图所示，在航班拥挤的空域，接收到的 S 模式报文在解码时存在困难，而在洋区接收到的 ADS-B 报文，由于报文数量没有如此拥挤，故报文的提取与检测相对简单。

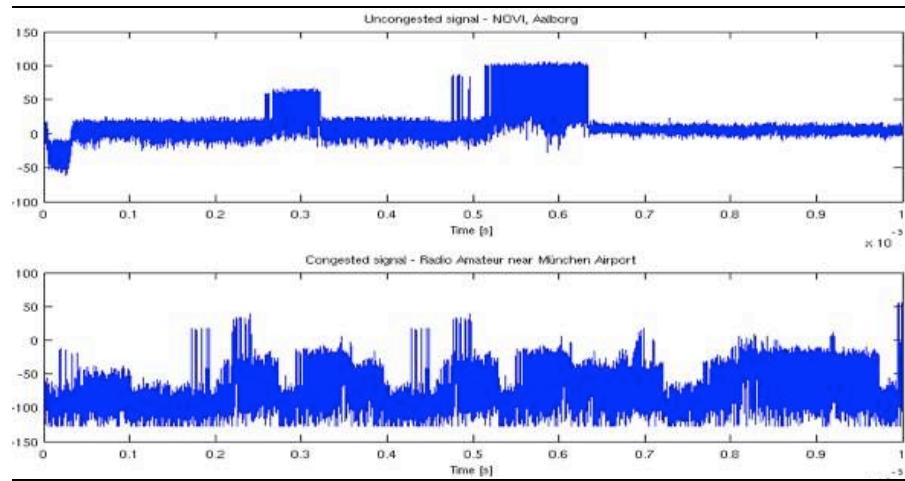


图 4.5-8 报文冲突⁸

§ 4.6 其他的考虑

目前星基 ADS-B 技术中仍然存在其他一些问题，但基本都是上述主要因素衍生的。其他的问题集中在数据质量、监视性能、数据通信等问题。

对于星基 ADS-B 信号数据质量的研究，可以参看文献 [2]，对于星基 ADS-B 监视性能的研究，可以参看文献 [4, 5, 6, 31]。

另外，ADS-B 可以利用甚高频（VHF）自组织数据链实现，但是其监视范围局限在视距以内，因此需要引入卫星数据链以实现超视距监视，从而形成综合这两种数据链的组合监视系统。同时，为了适应网络拓扑的快速变化，并高效利用网络资源传输信息，必须引入分群技术^[3]。文献 [3] 研究了空基与星基组合监视系统的实现问题，并研究了系统中的 ADS-B 分群算法。并提出一种综合最大连通度和非确定性准则的分群算法，用以解决分群技术组网收敛速度和网络稳定性之间的矛盾。

另外还存在对于星基 ADS-B 链路的预算的研究，参看文献 [9]。

⁸ 图片来源：参考文献 [30]

第 5 章

总结

通过以上调研，ADS-B 技术拥有成本低、精度误差小、监视能力强的特点，适用于高密度飞行区域的空中交通服务，有效解决和避免了传统监视方式的种种弊端，优越性不言而喻，必将成为未来空管监视的主要手段。

目前，根据中国在 ICAO 提交的相关报告，ADS-B 技术在中国还未全面展开，但是正在稳步推进。成长期的中国航空运输业面临空域范围的限制，机队规模扩大，要求空管设施进一步改造和完善，是加速 ADS-B 技术发展的重要时期。

目前国际上，丹麦、德国、美国、加拿大和中国等国家（某些合资企业是跨国的）相继展开了星基 ADS-B 项目的实验和系统部署，但是目前只有 Aireon 真正依托第二代铱星卫星部署完成了星基 ADS-B 系统并已经开始试运营和提供服务，Aireon 已经走在了世界的前列。不过。该项技术目前还存在诸多问题亟待解决，等未来全球电磁环境进一步恶化后，该项技术的发展前景可能又是另外一番景象。

我国应开展相应的卫星网络建设，加强基于卫星的 ADS-B 系统和基于陆基的 ADS-B 系统同步发展，同时兼顾其他监视手段，构建“空-天-地”一体的全球监视系统。此外，ADS-B 技术的推广应用，可能涉及航空公司的软件更新、改装机载设备、调整地面设施结构、标准制定和运行认证等，因而需要各方有力配合，整体推进，才能早日实现 ADS-B 的全面应用，为实现建设民航强国奠定基础^[1]。

参考文献

- [1] 王洪全, 刘天华, 欧阳承曦, 姚待艳. 基于星基的 ADS-B 系统现状及发展建议 [J]. 通信技术, 2017, 50(11):2483-2489.
- [2] 王运帷. 陆基与星基 ADS-B 系统数据质量研究 [D]. 中国民航大学, 2018.
- [3] 袁晓晶, 张军, 黄智刚. 空基与星基组合监视系统中的 ADS-B 分群算法 [J]. 电讯技术, 2007(01):82-85.
- [4] 赵嶷飞, 于克非. 星基广播式自动相关监视系统监视数据空中位置信息质量分析 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(14):279-284.
- [5] 于克非. 星基 ADS-B 系统监视性能可用性评估 [D]. 中国民航大学, 2018.
- [6] 刘海涛, 王松林, 秦定本, 李冬霞. 星基 ADS-B 接收机监视容量分析 [J]. 航空学报, 2018, 39(05):182-189.
- [7] 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]. 电子科技大学, 2016.
- [8] 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(03):34-40.
- [9] 刘鹏, 倪育德. 星基 ADS-B 的链路预算 [J]. 中国科技信息, 2018(14):94-97.
- [10] 杨晖, 钟卫晋. 浅谈全球星系统 [J]. 现代通信, 2003(05):3.
- [11] 邹锐. 全球星系统 (Globalstar) 技术介绍 [J]. 电子科技导报, 1999(07):7-12.
- [12] 吴建军. 第二代铱星系统 (Iridium Next) 及其搭载应用概况 [A]. 中国通信学会卫星通信委员会. 第六届卫星通信新业务新技术学术年会论文集 [C]. 中国通信学会卫星通信委员会: 中国通信学会, 2010:10.
- [13] Ali, Syd B . System specifications for developing an Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) monitoring system[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2016:S187454821530041X.

- [14] Delovski T , Werner K , Rawlik T , et al. ADS-B over Satellite The world's first ADS-B receiver in Space[C]// Small Satellites Systems & Services Symposium. DLR, 2014.
- [15] Werner K , Bredemeyer J , Delovski T . ADS-B over Satellite Global Air Traffic Surveillance from Space[C]// 2014 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV) . IEEE, 2014.
- [16] Kunzi F , Hansman R J . ADS-B Benefits to General Aviation and Barriers to Implementation[J]. Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [17] Wang, Hao, "ADS-B used in Improvement of Air Traffic Control" (2015). Open Access Theses. 624. https://docs.lib.psu.edu/open_access_theses/624
- [18] EASA . ADS-B and other means of surveillance implementation status[R] . 2018.
- [19] ICAO . ADS-B SITF/15 -IP/31, UPDATE ON ADS-B ACTIVITIES IN CHINA[C] . Bangkok : ICAO , 2016.
- [20] ICAO . SEA/BOB ADS-B WG/14 -IP/3, ADS-B IMPLEMENTATION ACTIVITIES IN CHINA[C] . Bangkok : ICAO , 2018.
- [21] ICAO . ADS-B SITF/14 -IP/23 (Rev.), ADS-B IMPLEMENTATION STATUS IN INDONESIA AND DATA SHARING BETWEEN INDONESIA, AUSTRALIA AND SINGAPORE[C] . Christchurch : ICAO , 2015.
- [22] ICAO . SEA/BOB ADS-B WG/13 - IP/09, UPDATE ON ADS-B PROJECT IN MALAYSIA[C] . Colombo : ICAO , 2017.
- [23] ICAO . SEA/BOB ADS-B WG/12 -IP/09, UPDATE ON ADS-B IMPLEMENTATION IN THAILAND[C] . Guangzhou : ICAO , 2016.
- [24] ICAO . SEA/BOB ADS-B WG/13 -IP/17, UPDATE ON ADS-B IMPLEMENTATION IN THE PHILIPPINES[C] . Colombo : ICAO , 2017.
- [25] “Global Surveillance through Space-Based ADS-B”, <https://www.icao.int/SAM/Documents/2017-ADSB/15%20Aireon-NAM%20CAR%20SAM%20ADS-B%20WS%20v4.pdf>
- [26] “Satellite Based ADS-B NAV CANADA”, https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/systemops/ato_intl/documents/cross_polar/CPWG16/CPWG16_PPT09_Satellite_Based_ADSB_December2013.pdf

- [27] “Launching the Future - ITU” , <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/ccsg/expdial/Documents/31-Globalstar.pdf>
- [28] “from Barbee on Globalstar letterhead” , <https://ecfsapi.fcc.gov/file/60000975762.pdf>
- [29] “IAA Space-Based ADS-B Projects” , <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/events/presentation/16-space-based-adsb-oloughlin.pdf>
- [30] “GOMX-1: A Nano-satellite Mission to Demonstrate Improved Situational Awareness for Air Traffic Control”, http://mstl.atl.calpoly.edu/~bklofas/Presentations/SummerWorkshop2012/Alminde_GOMX-1.pdf
- [31] Garcia M A , Stafford J , Minnix J , et al. Aireon space based ADS-B performance model[C]// 2015 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). IEEE, 2015.
- [32] Garcia M A , Dolan J , Hoag A . Aireon's initial on-orbit performance analysis of space-based ADS-B[C]// Integrated Communications, Navigation & Surveillance Conference. IEEE, 2017.
- [33] Noschese, Porfili, Girolamo D . ADS-B via Iridium NEXT satellites[C]// Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications-enhanced Surveillance of Aircraft & Vehicles. IEEE, 2011.
- [34] Blomenhofer H , Pawlitzki A , Rosenthal P , et al. Space-based Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) payload for In-Orbit Demonstration[C]// Advanced Satellite Multimedia Systems Conference. IEEE, 2012.
- [35] “What is Space-Based ADS-B?”, <http://www.ads-b.com/space-based.htm>
- [36] “ADS-B over Satellite” , <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/ads-b#overview>
- [37] “Iridium satellite constellation”, https://en.wikipedia.org/wiki/Iridium_satellite_constellation#Next-generation_constellation
- [38] “铱星系统的前世今生，通导融合的技术奇迹” , <http://mini.eastday.com/mobile/170228225143989.html#>
- [39] “看‘铱星二代’和‘全球星二代’两个‘星二代’是如何当航空监视‘保镖’的?”, http://www.sohu.com/a/211117337_100044418

- [40] “Aireon, SPACE-BASED ADS-B MAKING GLOBAL AIR TRAFFIC SURVEILLANCE A POWERFUL REALITY”, <https://aireon.com/>
- [41] “WHERE IS ADS-B OUT REQUIRED?”, <https://www.aopa.org/go-fly/aircraft-and-ownership/ads-b/where-is-ads-b-out-required>
- [42] “What is VDL Mode 4?”, http://www.cns.se/support/faq-vdl_mode_4
- [43] “‘天拓三号’六颗卫星集群飞行”能收全球航空信号, <http://scitech.people.com.cn/n/2015/0921/c1007-27610443.html>
- [44] “我国试验星载航空目标自动信号在轨接收可有效避免飞机失联”, https://www.guancha.cn/Project/2015_10_12_337272.shtml
- [45] “Globalstar”, <https://en.wikipedia.org/wiki/Globalstar>
- [46] <http://www.ads-b.com/news.htm>
- [47] “GOMX 1→GATOSS”, https://space.skyrocket.de/doc_sdat/gomx-1.htm
- [48] “GATOSS”, <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/g/gatoss#8nNiI11d4Herb>
- [49] “GOMSpace GOMX-1”, <https://gomspace.com/gomx-1.aspx>
- [50] “GOMX 3”, https://space.skyrocket.de/doc_sdat/gomx-3.htm
- [51] “The backpack-sized satellite that can track worldwide air traffic: Esa reveals stunning image showing cubesat mission’s first data”, <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3528972/The-backpack-sized-satellite-track-worldwide-air-traffic-Esa-reveals-stunning-image-show.html>