

# 星基 ADS-B 系统发展现状调研报告

---

*Debug*

当前版本： 0.0.1

作者： 刘通

完成日期： 2019 年 1 月 27 日

地点： 中国民航大学，天津



---

## 目 录

---

<b>第 1 章 ADS-B 系统简介 .....</b>	<b>9</b>
§ 1.1 ADS-B 系统的技术原理 .....	9
§ 1.1.1 概述 .....	9
§ 1.1.2 数据链类型 .....	10
§ 1.2 ADS-B 系统的应用意义 .....	10
§ 1.3 ADS-B 系统的发展现状 .....	11
§ 1.3.1 国外应用现状 .....	11
§ 1.3.2 国内应用现状 .....	13
§ 1.3.3 技术发展现状 .....	13
§ 1.4 陆基 ADS-B 覆盖情况 .....	13
§ 1.4.1 全球 .....	13
§ 1.4.2 澳大利亚 .....	13
§ 1.4.3 北美地区 .....	14
§ 1.4.4 欧洲 .....	16
§ 1.4.5 中国 .....	16
§ 1.4.6 东南亚 .....	16
<b>第 2 章 星基 ADS-B 原理概述 .....</b>	<b>23</b>
§ 2.1 传统陆基 ADS-B 系统的不足 .....	23

§ 2.2 星基 ADS-B 的实验背景 .....	24
§ 2.3 星基 ADS-B 的工作原理 .....	24
<b>第 3 章 现阶段发展及应用情况.....</b>	<b>27</b>
§ 3.1 DLR 的 AOS 实验项目 .....	27
§ 3.1.1 项目概述 .....	27
§ 3.1.2 体系结构 .....	28
§ 3.1.3 实验结果 .....	28
§ 3.1.4 项目意义 .....	31
§ 3.2 Aireon 星基 ADS-B 系统 .....	31
§ 3.2.1 系统概述 .....	31
§ 3.2.2 体系结构 .....	34
§ 3.2.3 系统性能 .....	34
§ 3.3 ALAS 系统.....	36
§ 3.3.1 系统概述 .....	36
§ 3.3.2 体系结构 .....	36
§ 3.3.3 系统性能 .....	36
<b>第 4 章 系统面临的挑战.....</b>	<b>39</b>
§ 4.1 覆盖范围 .....	39
§ 4.2 调制方案 .....	39
§ 4.3 报文冲突 .....	39
§ 4.4 静锥区 .....	39
<b>第 5 章 系统发展展望 .....</b>	<b>41</b>

---

## 插图目录

---

图 1.1-1 ADS-B 系统工作原理 . . . . .	9
图 1.4-2 全球陆基 ADS-B 覆盖情况 . . . . .	14
图 1.4-3 澳洲 5000ft 空域覆盖范围 . . . . .	14
图 1.4-4 澳洲 10000ft 空域覆盖范围 . . . . .	14
图 1.4-5 澳洲 20000ft 空域覆盖范围 . . . . .	15
图 1.4-6 澳洲 30000ft 空域覆盖范围 . . . . .	15
图 1.4-7 美国陆基 ADS-B 覆盖情况 . . . . .	15
图 1.4-8 美国不同高度层 ADS-B 覆盖情况 . . . . .	16
图 1.4-9 欧洲 1 . . . . .	17
图 1.4-10 欧洲 2 . . . . .	17
图 1.4-11 欧洲 3 . . . . .	18
图 1.4-12 欧洲 4 . . . . .	18
图 1.4-13 欧洲 5 . . . . .	19
图 1.4-14 欧洲 6 . . . . .	19
图 1.4-15 中国 3300m . . . . .	20
图 1.4-16 中国 6600m . . . . .	20
图 1.4-17 中国 8400m . . . . .	20
图 1.4-18 马来西亚 . . . . .	21
图 1.4-19 马来西亚航迹 . . . . .	21
图 1.4-20 泰国 . . . . .	21
图 1.4-21 菲律宾 . . . . .	22
图 2.3-1 星基 ADS-B 系统工作原理 . . . . .	25
图 3.1-1 单转换超外差接收机 . . . . .	28
图 3.1-2 Proba-V 卫星上搭载的 ADS-B 载荷 . . . . .	29
图 3.1-3 技术验证阶段的单颗卫星 . . . . .	29
图 3.1-4 未来全球卫星组网方案 . . . . .	29
图 3.1-5 AOS 在世界范围内记录的飞机航迹（2014 年 2 月 11 日） . . . . .	29

图 3.1-6 所有接收到的位置信息在天线覆盖区中的分布直方图 . . . . .	30
图 3.1-7 Proba-V 卫星天线辐射图 . . . . .	30
图 3.1-8 顶部安装的 L 波段天线的垂直天线辐射图 . . . . .	30
图 3.2-9 第二代铱星卫星 . . . . .	33
图 3.2-10 Iridium NEXT 上的 ADS-B 接收器 . . . . .	34
图 3.2-11 ADS-B 接收器搭载方式 . . . . .	34
图 3.2-12 Aireon 天基 ADS-B 系统布局原理 . . . . .	35
图 3.2-13 Aireon 天基 ADS-B 系统架构 . . . . .	35

---

## 表格目录

---

表 1.3-1 Countries with ADS-B Out mandates and proposals . . . . .	12
表 3.1-1 DLR 的 AOS 项目基本描述 . . . . .	27
表 3.1-2 ESA 的 Proba-V 小卫星任务描述 . . . . .	28
表 3.2-3 Aireon 星基 ADS-B 系统的利益攸关方 . . . . .	32
表 3.2-4 第二代铱星卫星基本参数 . . . . .	33
表 3.2-5 Aireon 星基 ADS-B 系统的性能 . . . . .	35
表 3.3-6 使用全球星卫星的 ALAS 系统端到端测试性能 . . . . .	37



# 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 (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, 广播式自动相关监视) 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。

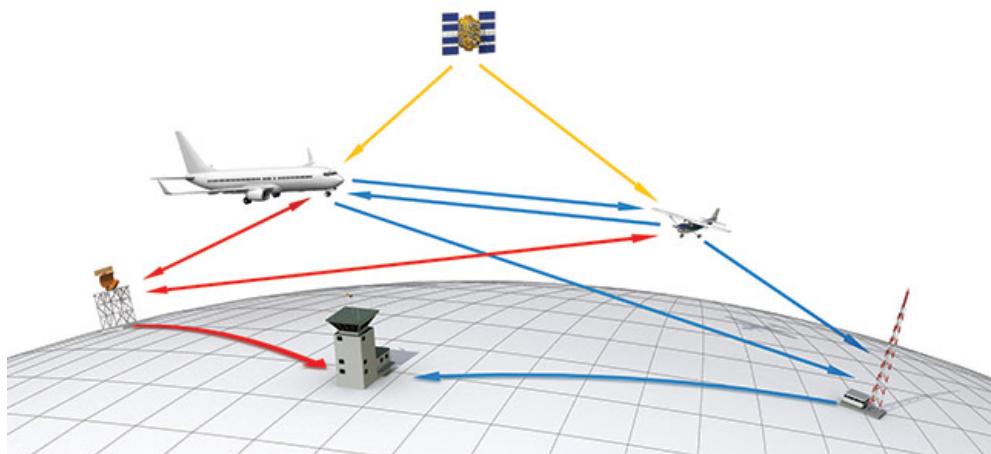


图 1.1-1 ADS-B 系统工作原理

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。

### § 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、978UAT（Universal Access Transceiver，通用访问收发机）数据链和 VDL Mode4（VHFDigital Link，模式 4 甚高频数据链）。这三种数据链技术各有优缺点，当前美国同时使用 1090ES 和 UAT 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（Extended Squitter）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（UAT）。

#### VDL Mode4 数据链

### § 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。

### S 1.3 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。

#### S 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。

##### 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、更高效的国家空域系统（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，美国联邦航空局（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应用。FAA 也在和运营商和其他的 ANSPs 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。

**表 1.3-1 Countries with ADS-B Out mandates and proposals**

<b>美国</b>	The FAA has mandated ADS-B Out capabilities for flight after January 1, 2020, for flight in most airspace where a Mode C transponder is required today. There is one significant exception: ADS-B also will be required in certain airspace above the Gulf of Mexico. At this time, only the United States is allowing the 978UAT datalink for ADS-B Out. If you plan to fly in ADS-B airspace outside of the United States, a 1090ES datalink—using a Mode S Extended Squitter transponder—will be required. 美国联邦航空局已要求在 2020 年 1 月 1 日之后飞行的 ADS-B Out 飞行能力, 用于今天需要模式 C 转发器的大部分空域。有一个重要的例外: 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 输出。如果您计划在美国以外的 ADS-B 空域飞行, 则需要使用模式 S 扩展 Squitter 转发器的 1090ES 数据链路。
<b>澳大利亚</b>	1090ES required for all IFR operations. Foreign-registered aircraft equipped with transponders are exempted below FL290 until June 6, 2020. 所有 IFR 操作都需要 1090ES。配备转发器的外国注册飞机在 2020 年 6 月 6 日之前免于低于 FL290
<b>加拿大</b>	Currently no mandate, but operators who voluntarily equip with 1090ES (particularly in the Hudson Bay and nearby oceanic airspace) can receive a higher level of service. Nav Canada is part of a joint air traffic surveillance venture, Aireon, installing ADS-B equipment on low-earth-orbit satellites. Nav Canada will be the launch customer when the service becomes available in 2018, and initially intends to incorporate 1090ES ADS-B into North Atlantic airspace. 目前没有授权, 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 年提供服务时成为发射客户, 并且最初打算将 1090ES ADS-B 纳入北大西洋空域。
<b>欧洲</b>	1090ES required for IFR aircraft with a MTOW exceeding 12,566 pounds or maximum cruise airspeed faster than 250 KTAS. Mandatory for new-production aircraft, and must be retrofitted into all aircraft by June 7, 2020. (Dates have slipped from original timetable.) IFR 飞机所需的 1090ES, MTOW 超过 12,566 磅, 或最大巡航速度超过 250 KTAS。对于新生产的飞机必须使用, 并且必须在 2020 年 6 月 7 日之前对所有飞机进行改装。(日期已经从原来的时间表中滑落。)
<b>香港</b>	所有空域 FL290 及以上需要 1090ES
<b>印度尼西亚</b>	FL290 及以上需要 1090ES
<b>墨西哥</b>	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
<b>新加坡</b>	指定的航空公司需要 1090ES
<b>斯里兰卡</b>	Colombo 终端控制区 (TMA, Colombo Terminal Control Area), FL290 及以上需要需要 1090ES
<b>台湾</b>	所有空域 FL290 及以上需要 1090ES
<b>越南</b>	指定的航空公司需要 1090ES

## 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 也是欧洲单一天空计划（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仪表飞行规则（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<sup>[10]</sup>。

### § 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 (1090Mhz Extended Squitter, 1090 兆赫扩展断续脉冲) 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 陆基 ADS-B 覆盖情况

### § 1.4.1 全球

全球 ADS-B 覆盖情况如图1.4-2所示。<sup>1</sup>

### § 1.4.2 澳大利亚

ADS-B 地面站是视距（line-of-sight）设施<sup>2</sup>，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。

<sup>1</sup> 数据来源：<https://jdasolutions.aero/blog/ads-b-update-bits-information-around-world/>

<sup>2</sup> 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

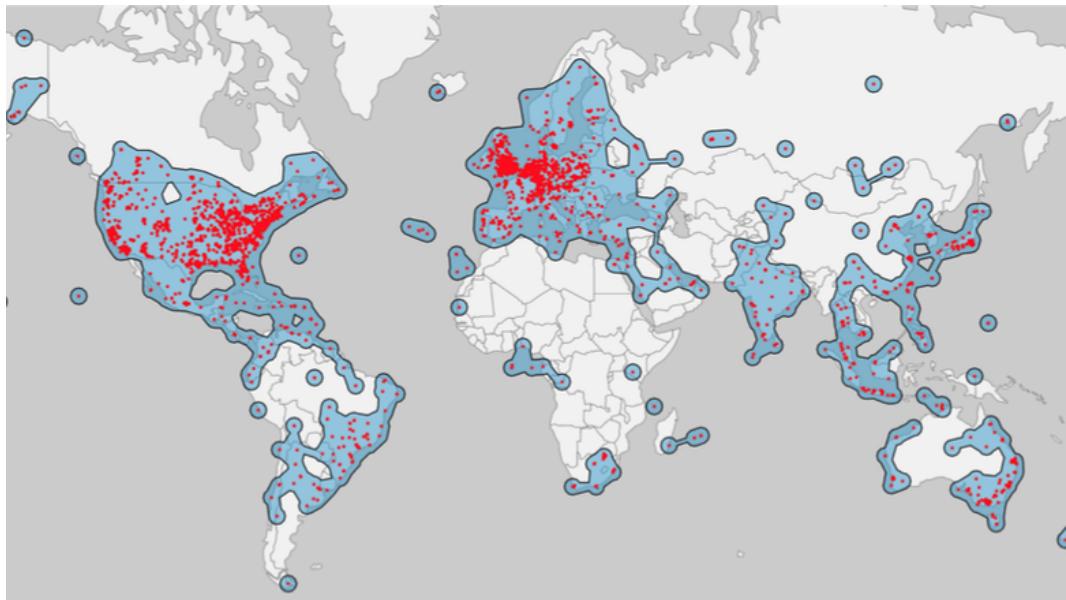


图 1.4-2 全球陆基 ADS-B 覆盖情况

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。

<sup>3</sup>

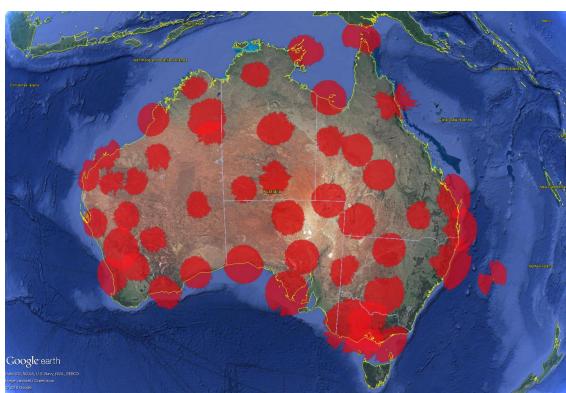


图 1.4-3 澳洲 5000ft 空域覆盖范围

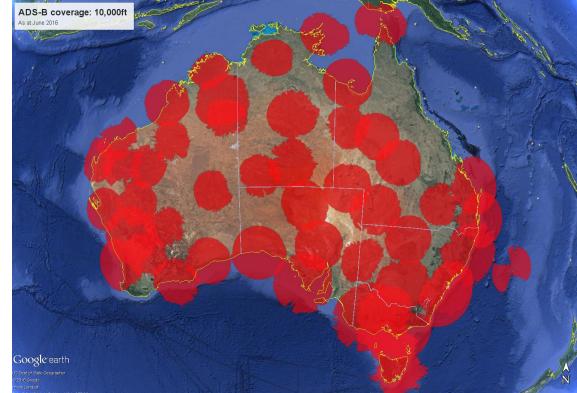


图 1.4-4 澳洲 10000ft 空域覆盖范围

### § 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。<sup>4</sup>

更为详细的 ADS-B 覆盖情况可以在 FAA 网站<sup>5</sup>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。

<sup>3</sup> 数据来源：<http://wwwairservicesaustralia.com/projects/ads-b/ads-b-coverage/>

<sup>4</sup> 数据来源：Corporate Fleet Service (CFS), <http://cfsjets.com/2017/12/14/ads-b-where-we-are-now/>

<sup>5</sup> <https://www.faa.gov/nextgen/programs/adsb/>

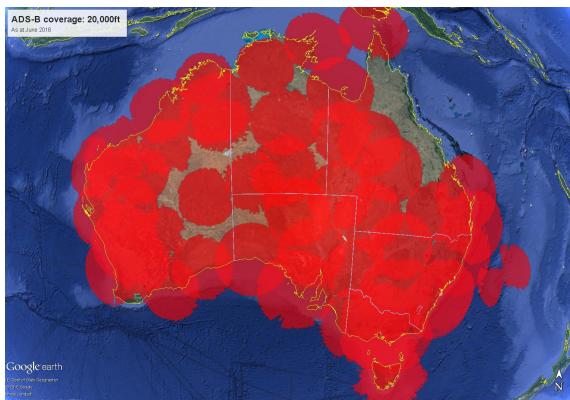


图 1.4-5 澳洲 20000ft 空域覆盖范围

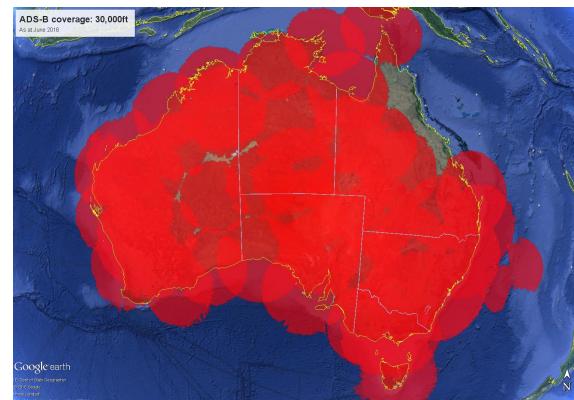


图 1.4-6 澳洲 30000ft 空域覆盖范围

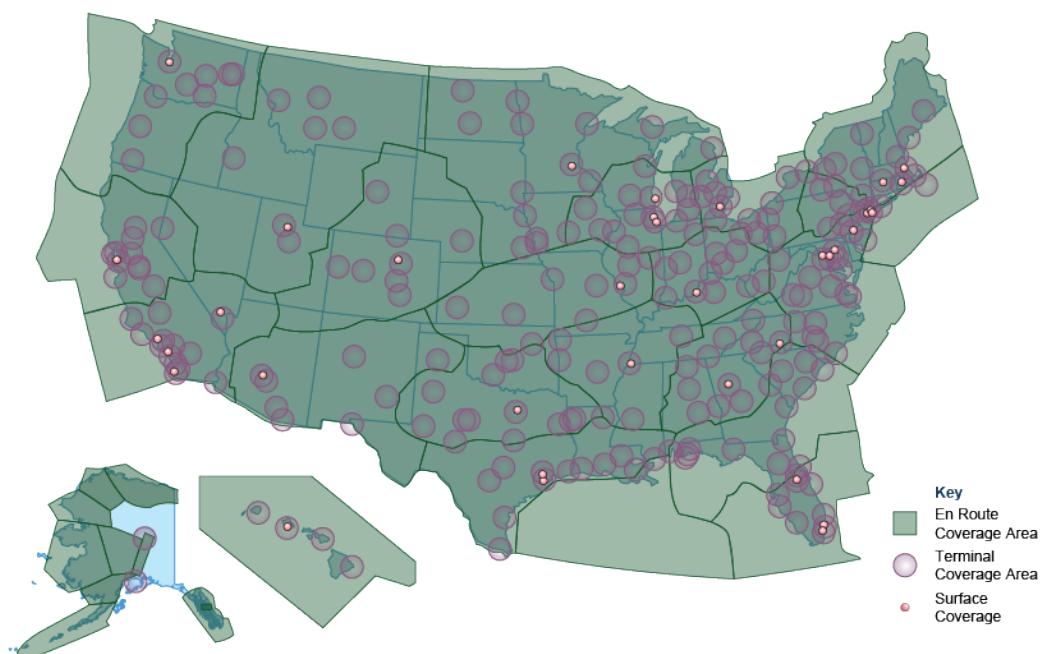


图 1.4-7 美国陆基 ADS-B 覆盖情况

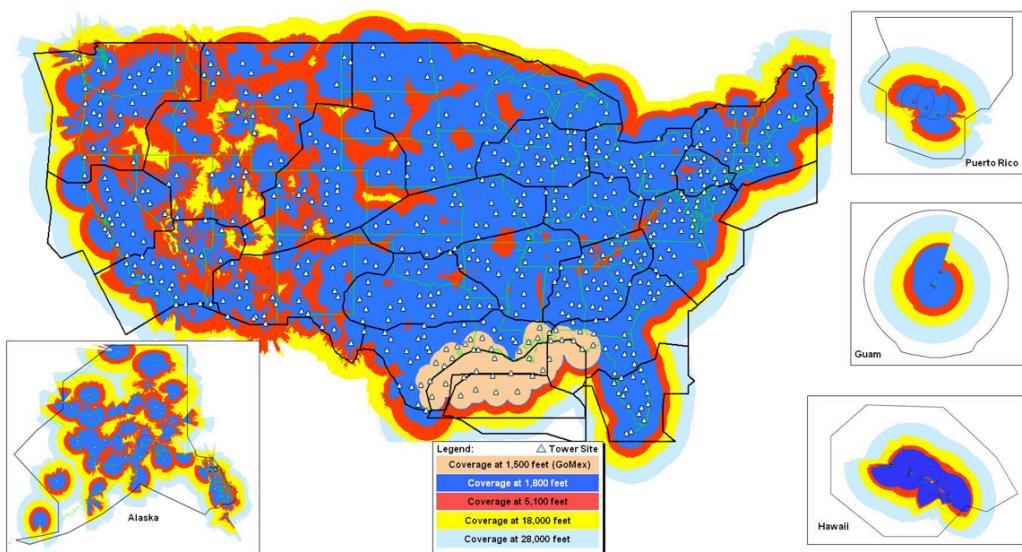


图 1.4-8 美国不同高度层 ADS-B 覆盖情况

§ 1.4.4 欧洲

§ 1.4.5 中国

§ 1.4.6 东南亚

马来西亚

泰国

菲律宾

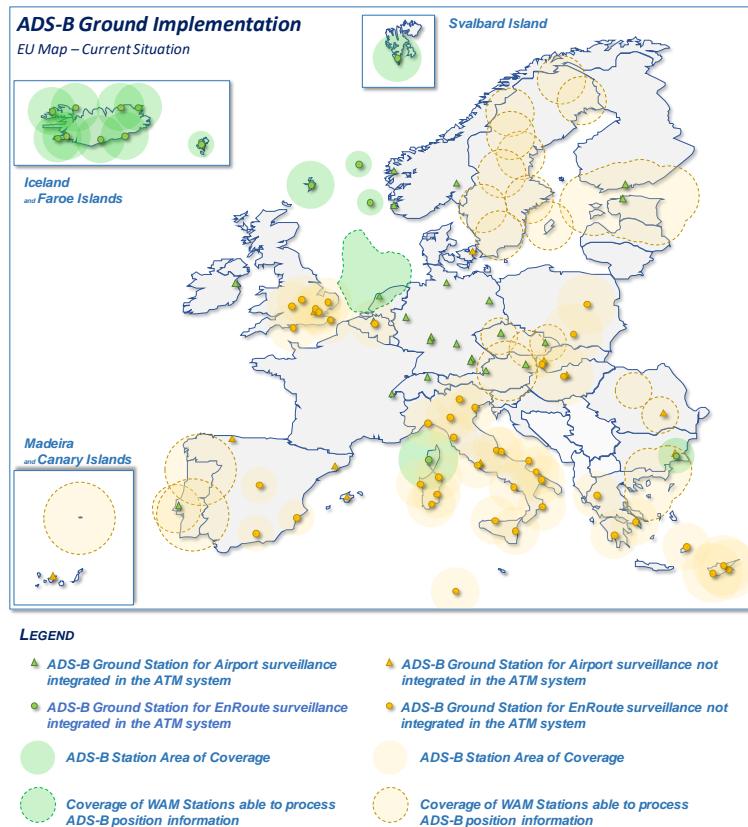


图 1.4-9 欧洲 1

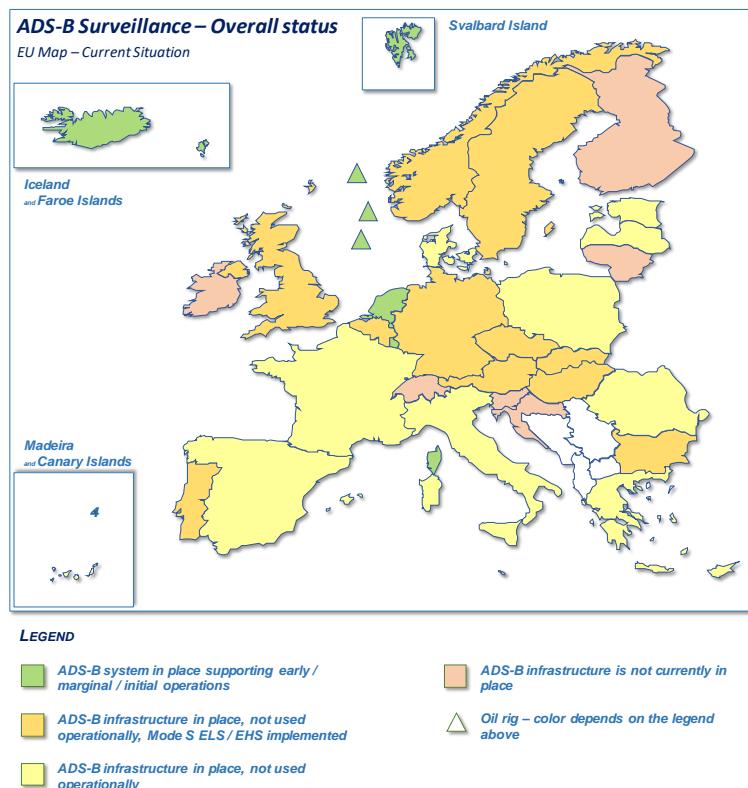


图 1.4-10 欧洲 2

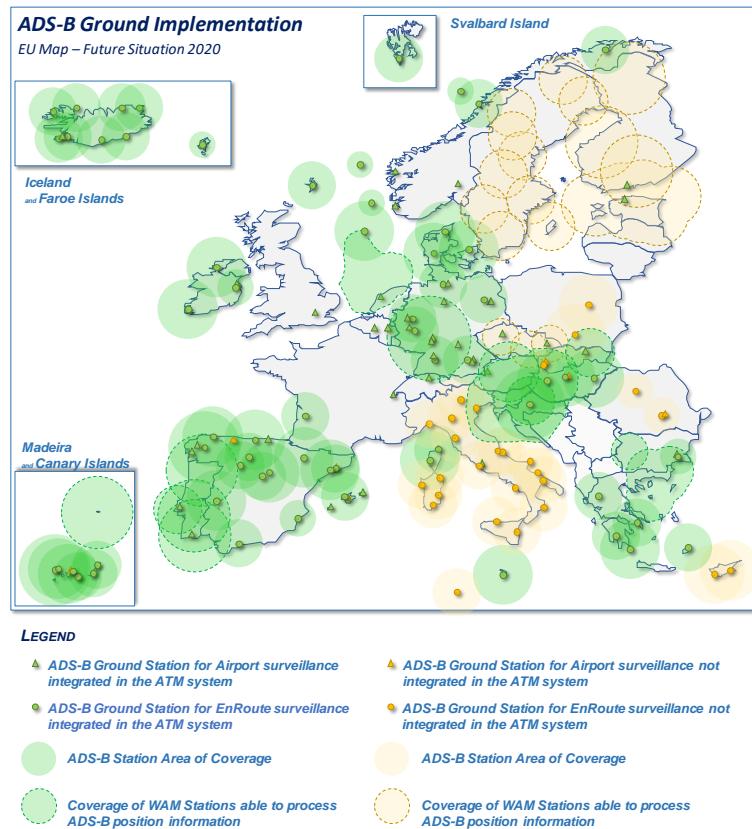


图 1.4-11 欧洲 3

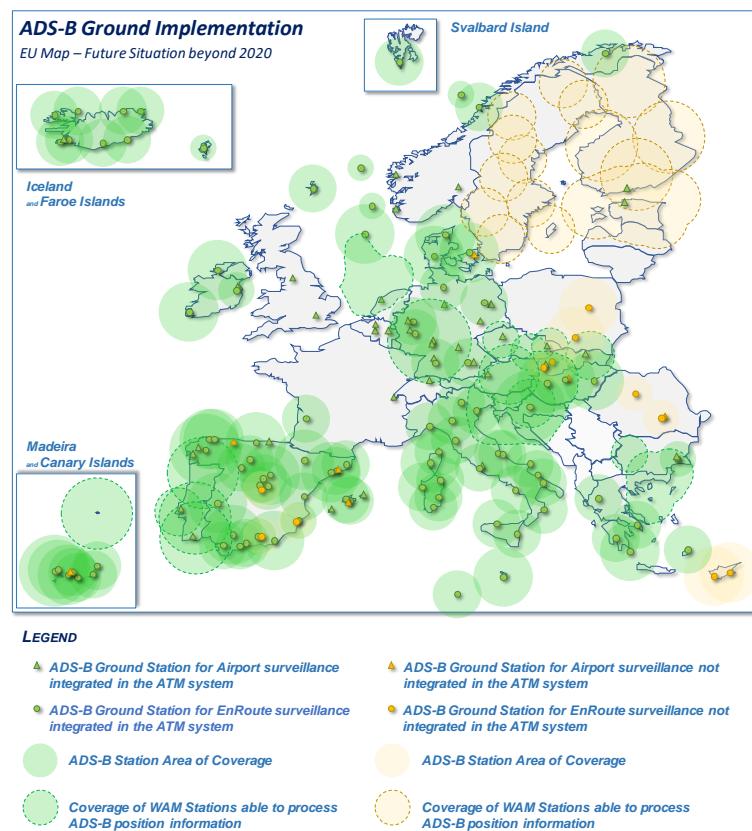


图 1.4-12 欧洲 4

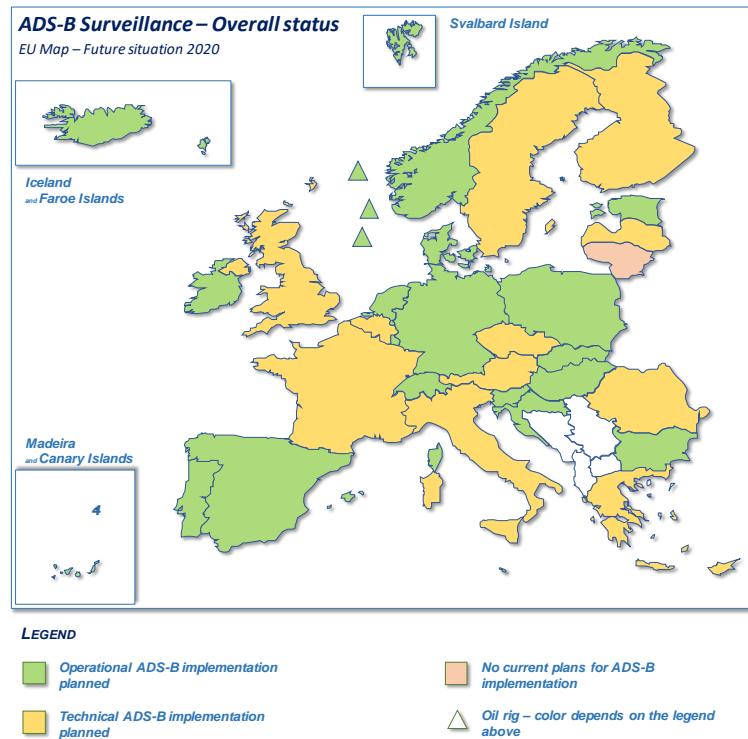


图 1.4-13 欧洲 5

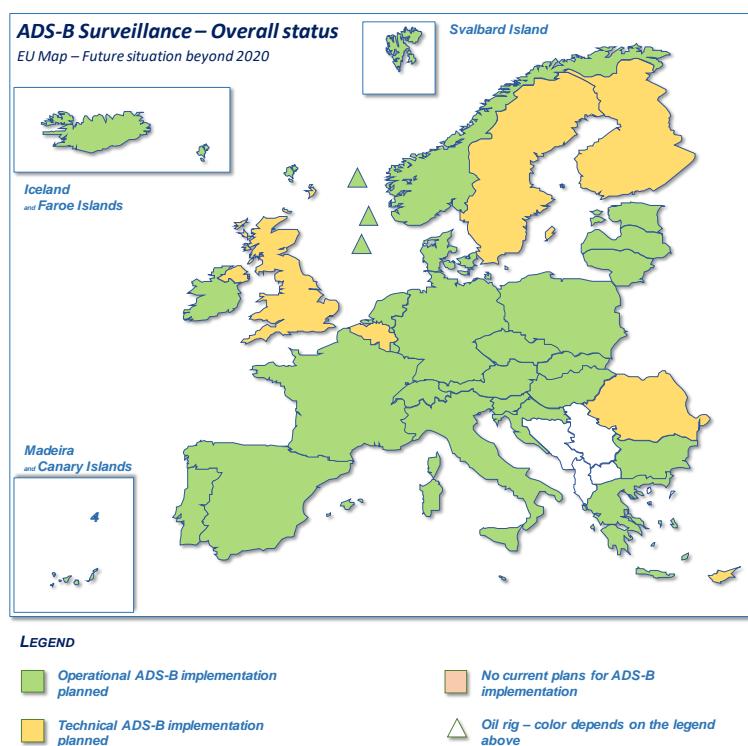


图 1.4-14 欧洲 6

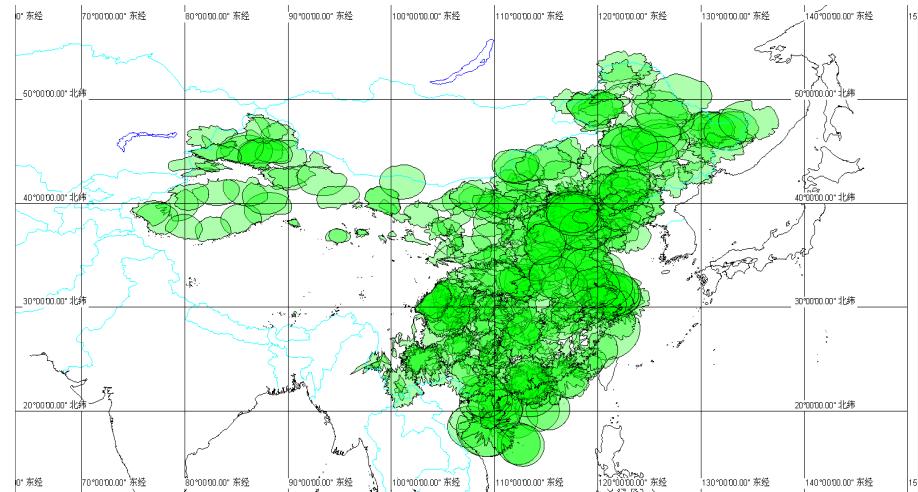


图 1.4-15 中国 3300m

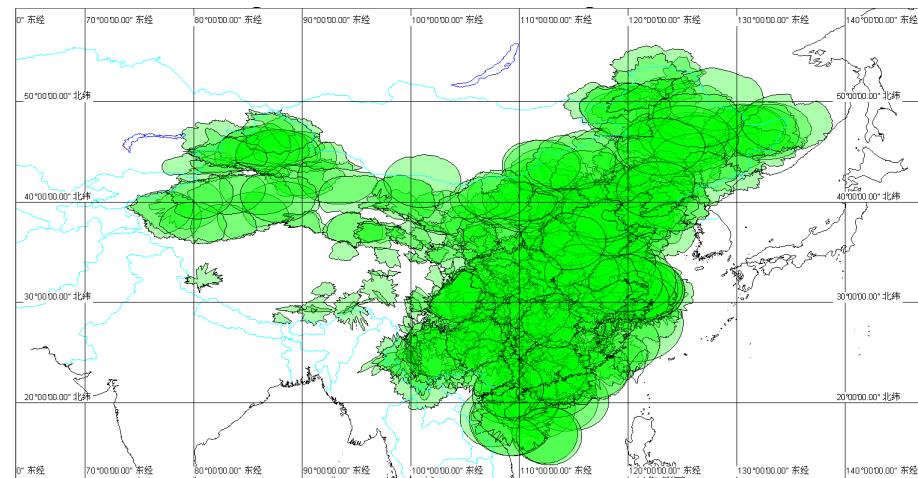


图 1.4-16 中国 6600m

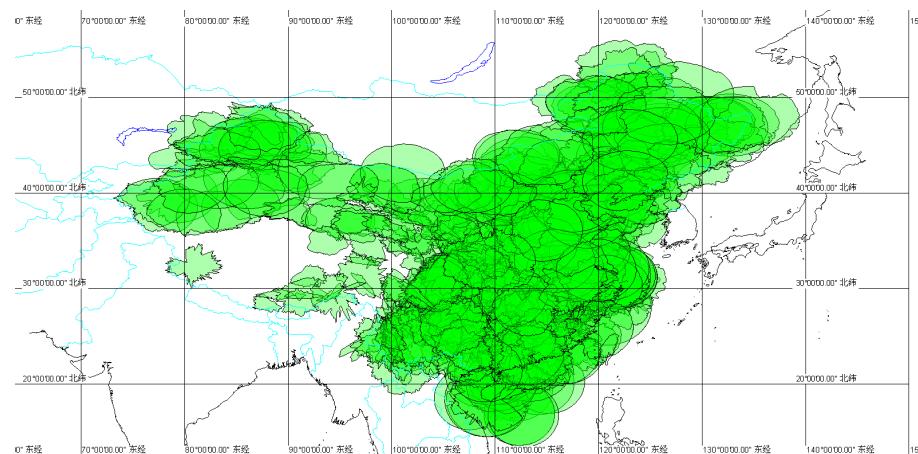


图 1.4-17 中国 8400m

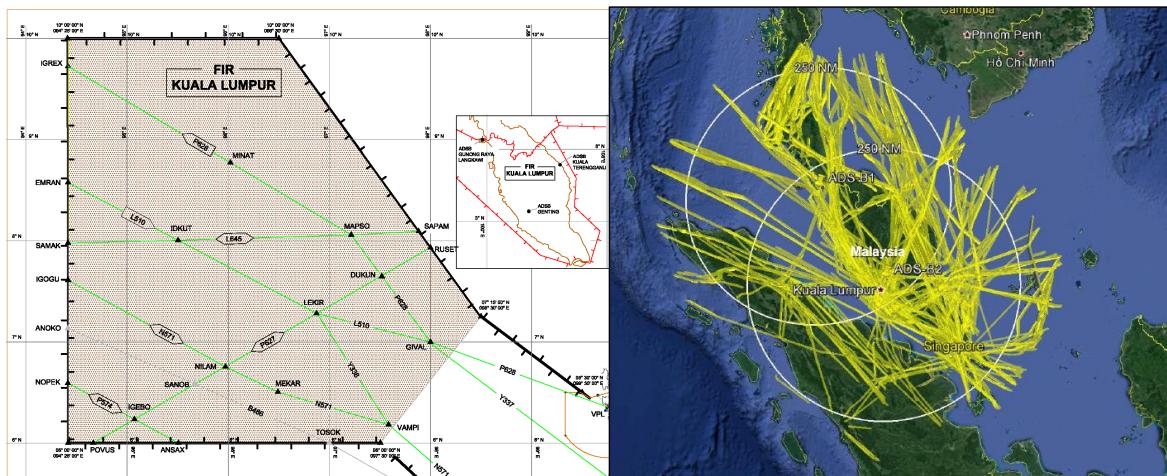


图 1.4-18 马来西亚

图 1.4-19 马来西亚航迹

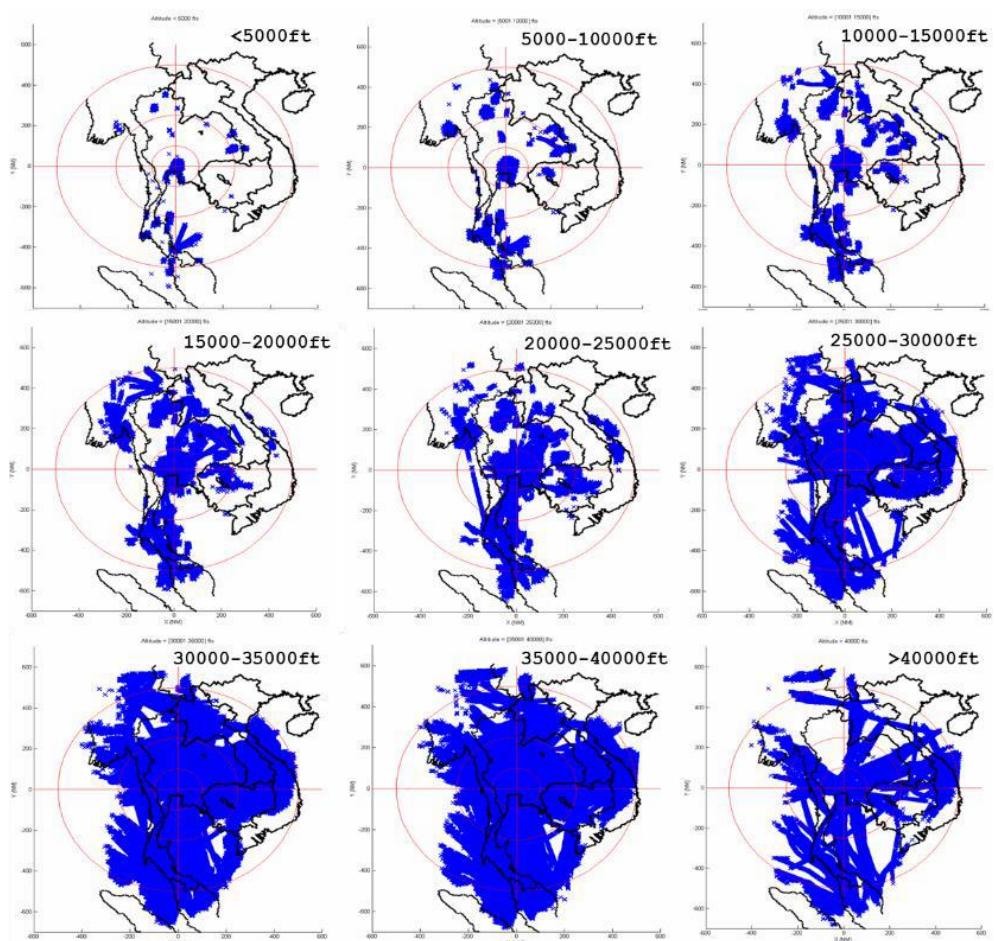


图 1.4-20 泰国

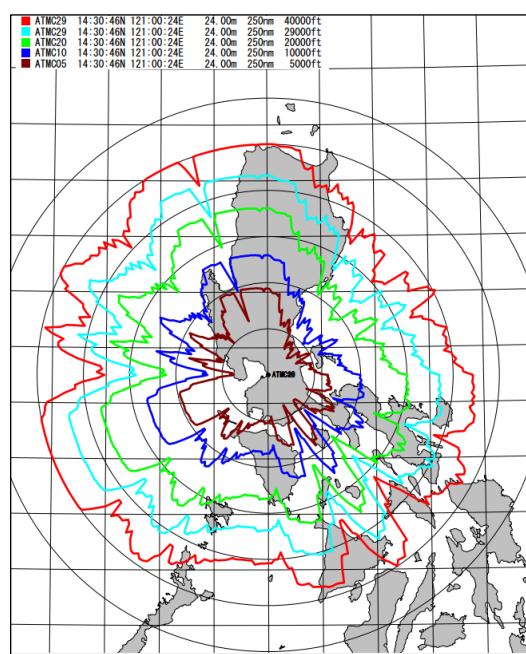


图 1.4-21 菲律宾

# 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（非雷达空域），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 (Automatic Dependent Surveillance -Contract, 合同式自动相关监视)，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<sup>[10]</sup>：

- 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<sup>[11]</sup>。

## §2.2 星基 ADS-B 的实验背景

2008 年, 德国航空航天中心 (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) 开始调查接收低地球轨道 (LEO, Low Earth Orbit) 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, ADS-B over Satellite), 目标是开发一个用于 IOD (在轨演示) 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 AOS 在轨演示器能够接收、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<sup>[10]</sup>。

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<sup>[5]</sup>。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<sup>[9]</sup>。

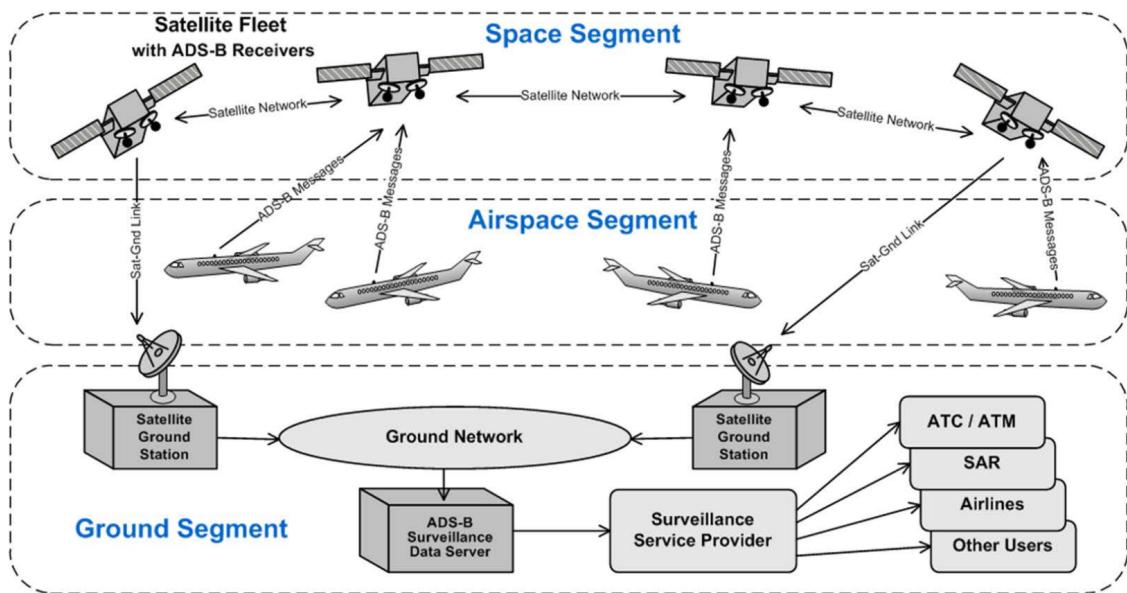


图 2.3-1 星基 ADS-B 系统工作原理



# 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 (ADS-B over Satellite) 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 (欧洲航天局) 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 140kg
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 10:30AM 到 11:30AM
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（总电离剂量）。

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<sup>[6]</sup>。

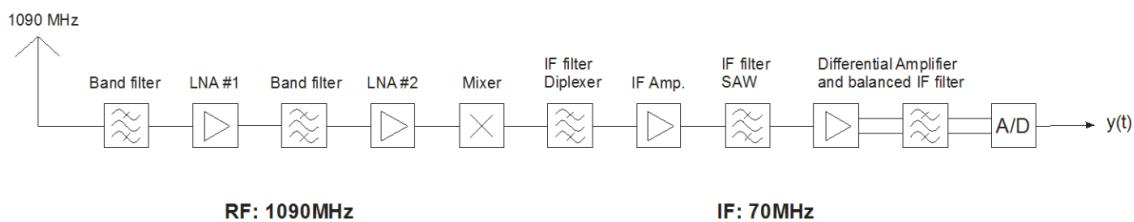


图 3.1-1 单转换超外差接收机

### § 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 报文数量分布的直方图，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直方图。值得注意的是两个峰值，一个

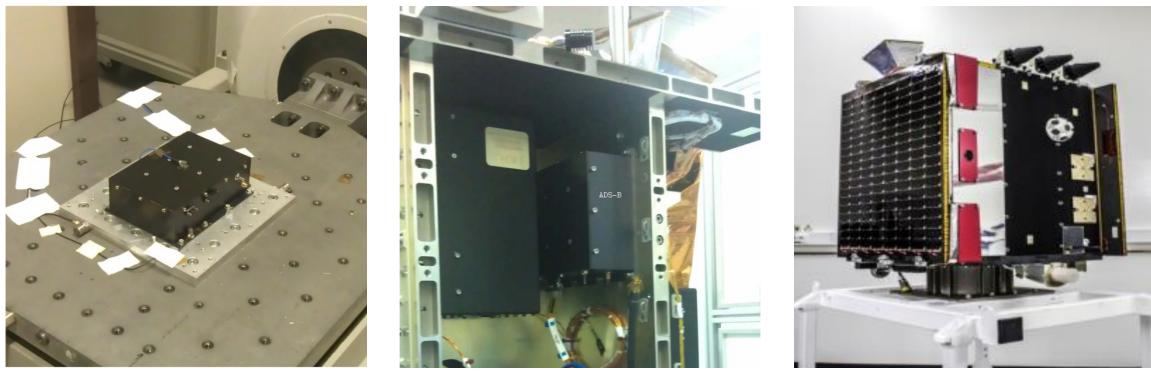


图 3.1-2 Proba-V 卫星上搭载的 ADS-B 载荷



图 3.1-3 技术验证阶段的单颗卫星

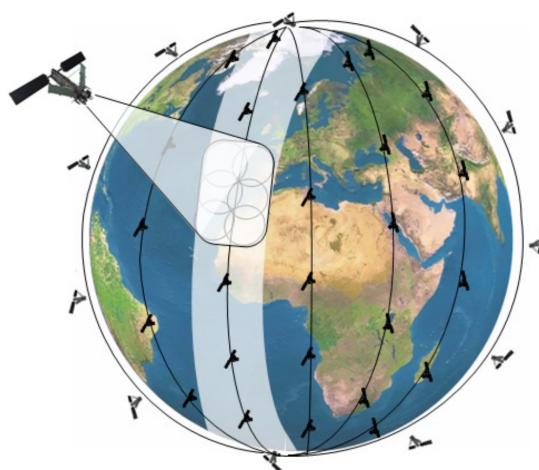


图 3.1-4 未来全球卫星组网方案

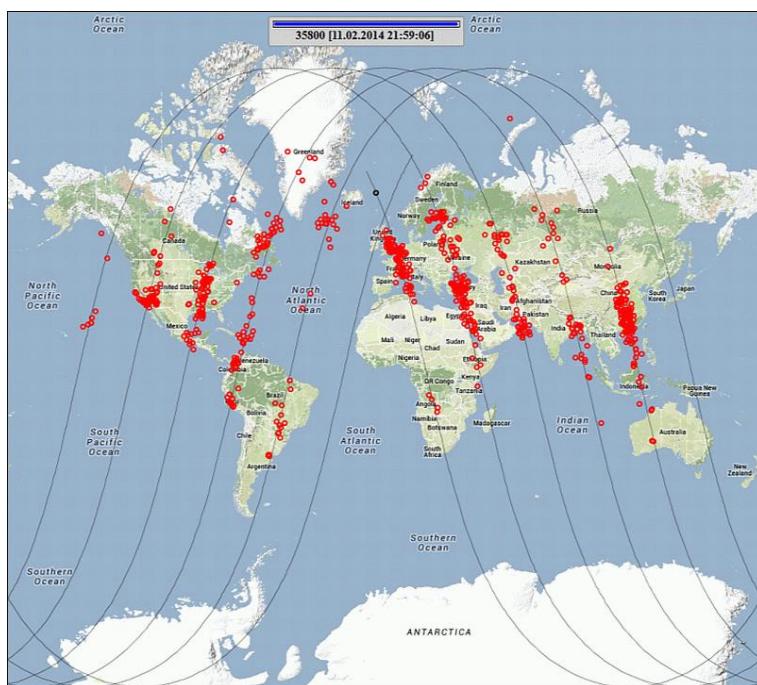


图 3.1-5 AOS 在世界范围内记录的飞机航迹（2014 年 2 月 11 日）

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。

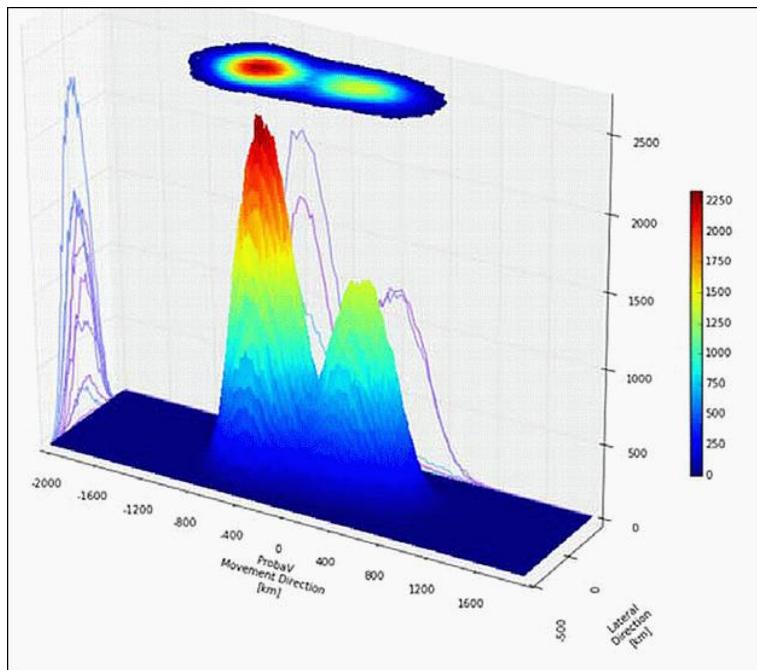


图 3.1-6 所有接收到的位置信息在天线覆盖区中的分布直方图

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。

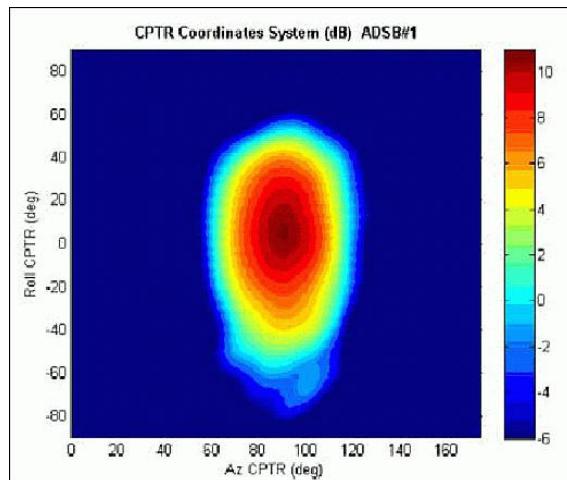


图 3.1-7 Proba-V 卫星天线辐射图

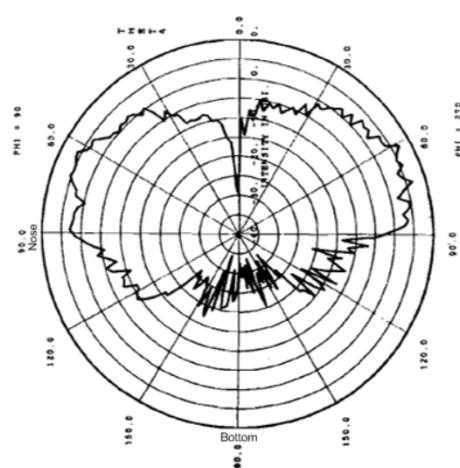


图 3.1-8 顶部安装的 L 波段天线的垂直天线辐射图

### § 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<sup>[10]</sup>。

Proba-V 卫星实验项目取得了多个成果，主要包括：

- 接收器的 FPGA 固件中包含一项特殊功能：允许上载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。

## § 3.2 Aireon 星基 ADS-B 系统

### § 3.2.1 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 3.2-3 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

**表 3.2-3** Aireon 星基 ADS-B 系统的利益攸关方

<b>Iridium</b>	卫星星座的拥有者和运营方
<b>Aireon</b>	Iridium 和 NAV CANADA 的合资企业，旨在建立 ADS-B 服务
<b>TAS (Thales Alenia Space)</b>	卫星建造商，与 Iridium 签订合同
<b>Harris Corporation</b>	ADS-B 有效载荷的建造商，与 Aireon 签订合同
<b>ITT-Exeils</b>	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
<b>NAV CANADA</b>	Aireon 的投资方，为 ADS-B 服务启动客户

的 ANSP（空中导航服务提供商）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（公私合作伙伴关系）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。

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。<sup>[10]</sup>

## 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（SCS）提供支持<sup>[12]</sup>。

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。

**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 3.2-9 所示。



图 3.2-9 第二代铱星卫星

表 3.2-4 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 780km，倾角 86.4°，周期 101min（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，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。

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/可移动终端的数据传输速度高达8 Mbit/s。

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3.2-10所示，接收器在卫星上的搭载位置如图3.2-11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。<sup>[11]</sup>

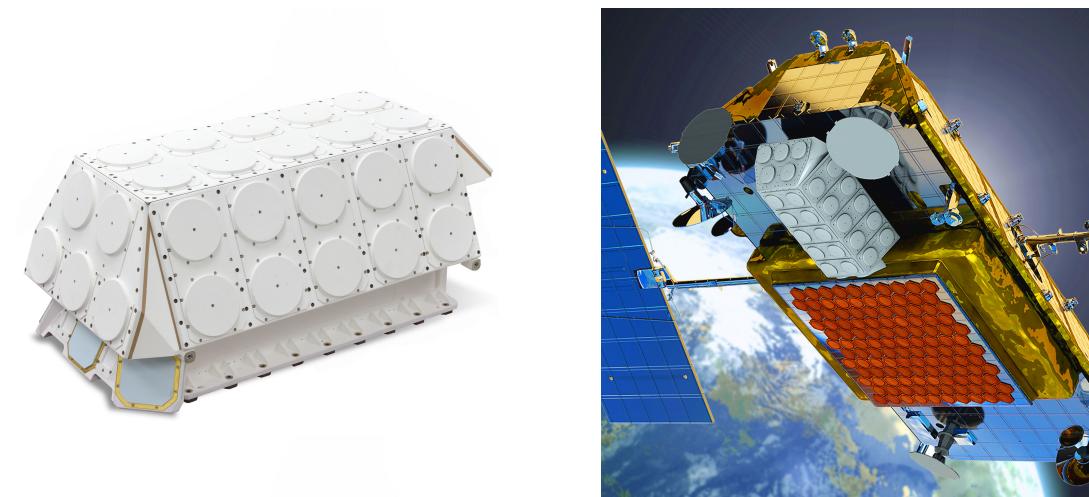


图3.2-10 Iridium NEXT上的ADS-B接收器

图3.2-11 ADS-B接收器搭载方式

### §3.2.2 体系结构

Aireon的星基ADS-B系统布局原理如图3.2-12所示。

如图3.2-13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。

### §3.2.3 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<sup>[11]</sup>。它的主要性能如表3.2-5所示。

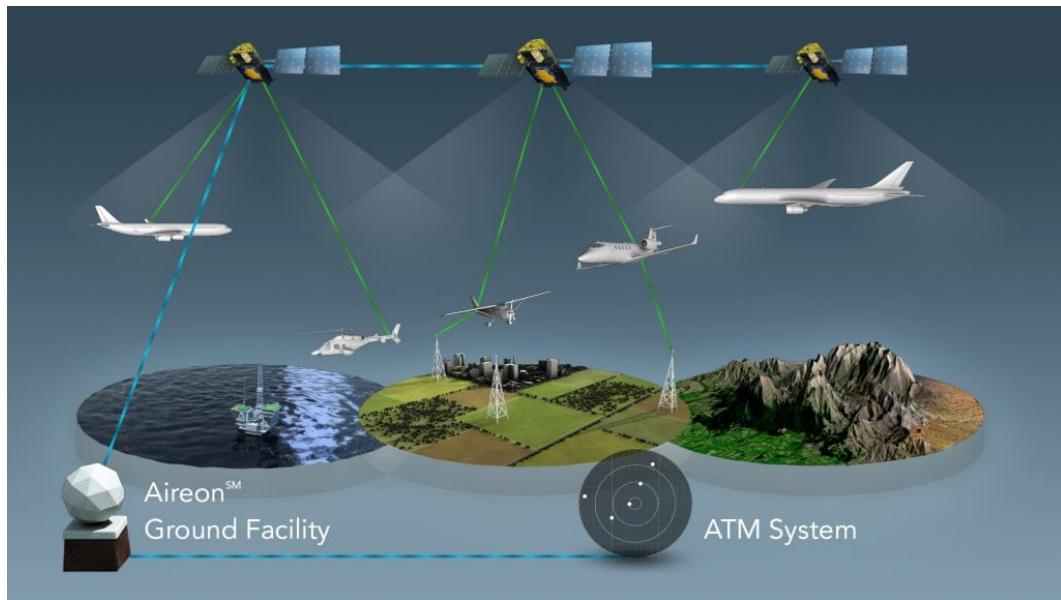


图 3.2-12 Aireon 天基 ADS-B 系统布局原理

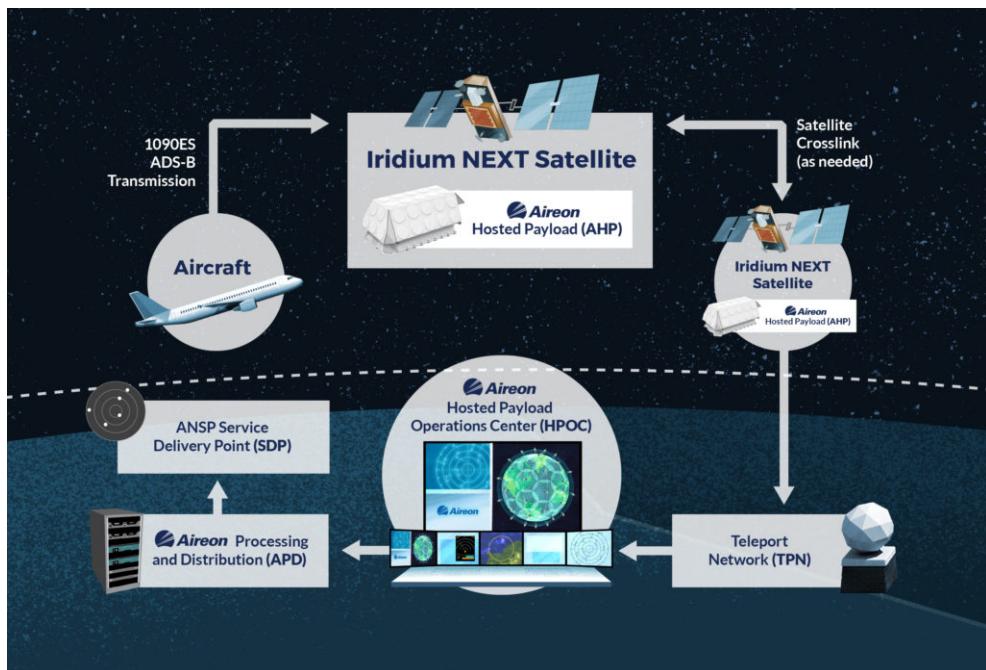


图 3.2-13 Aireon 天基 ADS-B 系统架构

表 3.2-5 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

### § 3.3 ALAS 系统

#### § 3.3.1 系统概述

根据[www.ads-b.com](http://www.ads-b.com)网站给出的说法，他们将天基 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。

#### § 3.3.2 体系结构

#### § 3.3.3 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 3.3-6 所示。<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> 数据来源：<http://www.ads-b.com/space-based.htm>

**表 3.3-6 使用全球星卫星的 ALAS 系统端到端测试性能**

<b>适用性 (Applicability)</b>	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
<b>覆盖范围 (Coverage Area)</b>	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
<b>可用性 (Availability)</b>	到 2016 年，可用性为 99.99%；到 2019 年，可用性为 99.999%
<b>容量 (Capacity)</b>	每架卫星可容纳大于 3000 架飞机 (approx 1,800sm diameter)
<b>时延 (Latency)</b>	从飞机到地面小于 200 毫秒；从端到端小于 300 毫秒
<b>更新率 (Update Rate)</b>	1 秒
<b>完整性 (Integrity)</b>	10E-6
<b>精度 (Accuracy)</b>	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
<b>安全性 (Security)</b>	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
<b>可扩展性 (Scalability)</b>	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
<b>部署 (Deployment)</b>	马上准备好。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。Essential Services could be deployed as early as 3Q2016 and Critical Services NLT 2019
<b>成本 (Cost)</b>	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.



# 第 4 章

---

## 系统面临的挑战

---

### § 4.1 覆盖范围

1. 由于信号相关性差, 1090MHz S 模式格式不适用于接收弱信号 ( $<-90\text{dBm}$ )
2. 飞机与 LEO 卫星之间的距离约为 800 公里 (444 海里)
3. 1090ES ADS-B 的“正常”覆盖范围为: 50NM A/A, 150NM A/G

### § 4.2 调制方案

脉冲位置调制 (PPM) 不适合对噪声水平附近的信号进行解码

### § 4.3 报文冲突

1. 由于接收位置高, 覆盖范围广
2. 加上随机通道访问  $\geq$  ADS-B 报告的重叠
3. 使用波束天线的补偿措施: 空间选择性 + 天线增益

### § 4.4 静锥区

飞机应答器天线垂直天线的凹陷



# 第 5 章

---

系统发展展望

---



---

## 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]
- [3]
- [4]
- [5] 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.
- [6] K. Werner . ADS-B over Satellite The world's first ADS-B receiver in Space.
- [7]
- [8]
- [9] “What is Space-Based ADS-B?”, <http://www.ads-b.com/space-based.htm>
- [10] “ADS-B over Satellite” , <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/ads-b#overview>
- [11] “Iridium satellite constellation”, [https://en.wikipedia.org/wiki/Iridium\\_satellite\\_constellation#Next-generation\\_constellation](https://en.wikipedia.org/wiki/Iridium_satellite_constellation#Next-generation_constellation)
- [12] “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#>
- [13] “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](http://www.sohu.com/a/211117337_100044418)
- [14] “Aireon, SPACE-BASED ADS-B MAKING GLOBAL AIR TRAFFIC SURVEILLANCE A POWERFUL REALITY”, <https://aireon.com/>

[15] “WHERE IS ADS-B OUT REQUIRED?”, <https://www.aopa.org/go-fly/aircraft-and-ownership/ads-b/where-is-ads-b-out-required>