ADS-B 技术在高高原空域的应用研究

任军
民航西藏自治区空中交通管理中心管制运行部，西藏 拉萨 850050

摘要：高高原空域雄踞我国西南边疆，地形险峻复杂、气象变幻无常、自然环境极端严苛，长期以来，传统空管监视手段难以适配高原特殊运行场景，监视盲区广、空域容量小、运行风险高、保障难度大，始终是制约高原民航安全高质量发展的瓶颈难题。广播式自动相关监视（ADS-B）技术依托卫星导航赋能与空地协同广播机制，凭借部署便捷、监视精准、覆盖全域、经济高效的突出优势，完美适配高高原艰苦复杂、特殊极端的运行环境，为高原空管突破发展桎梏提供了革命性技术路径。本文立足西藏等高高原空域独特的地理禀赋与运行实际，深刻剖析传统空管监视体系的结构性短板，系统阐释 ADS-B 技术的运行机理与高原适配价值，全面探究该技术在高原干线航路监视、终端区精细运行、复杂气象特情处置、空域流量优化调控等核心场景的实践应用，客观梳理当前高原应用过程中存在的技术短板与运维难题，并结合高原一线运行经验提出系统性优化对策，旨在持续夯实高高原空管安全根基、激活空域资源潜能、提升边疆民航保障能力，为新时代高原智慧空管建设提供实践参考与理论支撑。

关键词：ADS-B 技术；高高原空域；空管监视；航空安全；空域运行优化

Study on the Application of ADS-B Technology in High Plateau Airspace

Ren Jun

Xizang Air Traffic Management Center of CAAC ATC&Operation Department, Lhasa, Xizang, 850050, China

Abstract: High plateau airspace is located in the southwest frontier of China, with steep and complex terrain, changeable weather and extremely harsh natural environment. For a long time, traditional air traffic control monitoring methods have been difficult to adapt to the special operation scene on the plateau, with wide monitoring blind area, small airspace capacity, high operation risk and great guarantee difficulty, which has always been a bottleneck problem restricting the safe and high-quality development of plateau civil aviation. ADS-B technology relies on satellite navigation enabling and air-ground cooperative broadcasting mechanism. With its outstanding advantages of convenient deployment, accurate monitoring, global coverage and high efficiency, ADS-B technology perfectly adapts to the arduous, complex and special extreme operating environment of plateau, providing a revolutionary technical path for the development of plateau air traffic control. Based on the unique geographical endowment and operation practice of high altitude airspace such as Xizang, this paper deeply analyzes the structural shortcomings of the traditional air traffic control monitoring system, systematically explains the operation mechanism and plateau adaptation value of ADS-B technology, comprehensively explores the practical application of this technology in core scenarios such as plateau trunk route monitoring, terminal area fine operation, complex meteorological special situation handling, airspace flow optimization and control, and objectively sorts out the technical shortcomings and operation and maintenance problems existing in the current plateau application process. Combined with the first-line operation experience in plateau, the systematic optimization countermeasures are put forward, aiming at continuously consolidating the safety foundation of air traffic control in plateau, activating the potential of airspace resources, improving the civil aviation support capability in frontier areas, and providing practical reference and theoretical support for the construction of intelligent air traffic control in plateau in the new era.

Keywords: ADS-B technology; High plateau airspace; Air traffic control monitoring; Aviation safety; Airspace operation optimization

DOI: 10.62639/sspstct04.20260201

引言

巍峨雪域高原，辽阔苍茫、群山横亘、峡谷纵深，平均海拔超高、地形落差极大，作为我国国土面积占比超四分之一的特殊空域板块，高高原空域既是连接边疆与内陆的空中经济走廊，更是守护雪域交通畅通、支撑应急救援保障、稳固边疆发展大局的战略空中通道。然而，极端独特的自然环境赋予了高原空域无与伦比的战略地位，也造就了国内最为严苛、最为复杂、风险最高的航空运行条件。常年肆虐的强颠簸、突发性雷雨大风、局地积冰积雪、能见度剧烈骤变等复杂气象叠加群山遮挡的复杂地形，让高原民航运行始终面临“环境恶劣、风险集中、保障艰难”的现实挑战。

长期以来，高高原空管运行长期依赖传统二次雷达结合程序管制的老旧模式。受高原山川阻隔、基建薄弱、环境极端等客观条件限制，传统雷达建站难、覆盖弱、损耗快、成本高，无法实现空域连续无缝监视，大片偏远航路、低空终端区长期存在监视盲区。在无雷达监视空域，管制指挥只能依靠机组人工报点、被动问询的传统方式，飞行态势感知滞后、空域信息碎片化、运行研判被动化，不得不以放大管

（稿件编号：STCT-26-1-59002）

作者简介：任军（1986-）男，汉族，山西太原人，民航厦门空中交通管理站，工程师，本科，目前在民航西藏空管中心进行援藏工作。主要研究高原地区民航空管运行及管理工作。

制间隔、牺牲运行效率为代价换取运行安全，造成高原空域容量长期偏低、航班通行能力受限、高峰延误频发。多年来，“盲区多、风险大、效率低、保障难”始终是困扰高高原空管高质量发展的痛点难点。

ADS-B 技术作为国际民航组织力推的新一代空管核心监视技术，彻底打破了传统雷达视距监视的物理局限，凭借卫星导航高精度赋能、空地数据自主广播、全域动态感知的技术特质，完美破解了高原地形遮挡、监视不足、管控滞后的行业难题，成为重塑高高原空管运行体系、推动高原空管从“保守保障”向“精细运行”、从“人工经验”向“智能感知”跨越的核心支撑技术。立足雪域空管一线工作实际，本文深度结合高高原运行痛点、难点、堵点，系统开展 ADS-B 技术应用研究，旨在总结实践经验、剖析现存短板、探索优化路径，全力助推高原空管安全提质、效率提效、智慧升级，为边疆民航事业高质量发展筑牢空中屏障。

一、高高原空域传统空管运行短板

（一）监视设备覆盖薄弱，全域盲区长期存在

高高原高山连绵、沟壑纵横，适宜雷达建站的开阔高地稀缺，偏远空域交通闭塞、基础设施匮乏，传统二次雷达选址难、施工难、运维难、投入大，难以规模化组网覆盖。同时，山体遮挡造成的信号衰减、阻断问题极为突出，传统雷达仅能覆盖极少数核心机场近距空域，广阔干线航路、支线空域、终端低空区域长期处于监视空白状态。大面积监视盲区的存在，导致高原多数航路只能依赖落后的程序管制模式运行，航空器全程无可视化监视，空管运行安全底数薄弱、管控被动。

（二）管制模式较为滞后，空域运行容量受限

在传统程序管制运行模式下，管制员无法实时掌握空中航空器动态，飞行态势完全依靠机组阶段性人工报告，信息更新滞后、态势感知片面。为最大限度规避飞行冲突风险，高原空域不得不采用 80 至 100 公里的超大水平管制间隔，是平原雷达管制间隔的数倍之多。保守的管制标准极大压缩了空域承载能力，导致高原空域资源利用率极低、航班编排容量有限，每逢暑运、春运、旅游旺季，航班积压、空中盘旋、地面延误现象突出，难以满足日益增长的高原航空运输需求，严重制约边疆民航通达性与服务品质提升。

（三）复杂气象适配不足，安全管控极为被动

高高原空域气象具有突发性强、局地性强、变化剧烈、无规律可循的显著特征，强颠簸、雷雨绕飞、低空积冰、乱流大风等危险天气随时发生、随机分布。传统空管监视模式缺乏实时动态的飞行态势感知能力，管制员无法精准预判航空器绕飞、爬升、下降过程中的潜在冲突隐患。一旦发生航空器故障、航线偏航、空中特情、遇险备降等突发状况，地面无法快速精准定位航空器位置，应急搜救缺少精准坐标支撑，搜救处置滞后、风险防控被动，极大增加了高原飞行安全运行压力。

（四）设备运维条件艰苦，长期运行成本高昂

高高原高寒缺氧、昼夜温差悬殊、紫外线超强、风雪灾害频发，极端恶劣的自然环境对传统电子设备损耗极大，雷达设备老化快、故障率高、稳定性差。同时，高原台站大多地处高山荒野、交通极为不便，人工巡检、故障排查、设备更换难度大、周期长、成本高，设备常年处于“高负荷、高损耗、难维护”的运行状态，难以实现长期稳定可靠运行，极大增加了高原空管设备保障压力。

二、ADS-B 技术原理及高高原适配优势

（一）ADS-B 技术核心原理

ADS-B 广播式自动相关监视系统，是依托卫星导航体系构建的新一代智能化空管监视系统，主要由机载广播终端、地面接收基站、后台数据处理系统三部分协同组成。其核心运行逻辑区别于传统雷达主动扫描探测模式，通过航空器自主接收卫星定位信息，实时解算自身高精度四维飞行参数，并以 1090MHz 专用数据链为载体，主动、持续、自主地向地面基站及周边航空器广播位置、高度、速度、航向、航班号、机型等核心飞行数据。地面系统实时汇聚全域航空器广播信息，经整合解算、滤波处理后生成连续稳定、精准可靠的全域航迹，为管制指挥提供可视化、动态化、精细化的数据支撑，同时依托机载 ADS-B IN 功能实现机组空中态势自主感知，构建空地双向、全域协同、主动感知的新型监视体系。

（二）ADS-B 技术高高原适配核心优势

1. 部署灵活经济，彻底破解高原地形覆盖难题

相较于传统雷达庞大笨重、建站苛刻、造价高昂的短板，ADS-B 设备高度集成、模块化设计、体积小巧、功耗极低，单站建设成本不足传统雷达的九分之一，极大降低了高原空管基建投入。设备环境适配性极强，可灵活部署于高原山顶制高点、偏远荒野台站，依托高地视野优势突破山体遮挡桎梏，实现大范围空域高效覆盖。同时，设备可适配光伏储能独立供电模式，完美适配高原无市电、无固定运维保障的偏远区域，安装便捷、运维简单、适应性强，有效填补了传统雷达无法覆盖的空域盲区，构建起全域无缝、立体覆盖的高原空管监视网络。

2. 监视精度极致提升，实现全流程动态精准管控

传统二次雷达数据更新慢、定位误差大，难以满足高原低空精细运行需求。ADS-B 技术

数据更新周期缩短至 1 秒级，定位精度可达 10 米级，相较于传统雷达实现了数量级的性能跃升。依托高精度监视能力，高高原机场成功划定最低监视引导高度图，彻底终结了高原进近终端区低空监视空白的历史，实现航空器起飞、爬升、巡航、下降、落地全链条、全时段、可视化、精准化管控，极大提升了高原空管指挥的科学性、精准性、安全性。

3. 大幅压缩管制间隔，充分释放高原空域潜力

长期以来，超大管制间隔是制约高原空域效率提升的核心瓶颈。ADS-B 技术的全面应用，推动高高原空管运行彻底告别“人工报点、被动管控”的程序管制时代，迈入“主动监视、动态感知、精准管控”的现代化运行新阶段。依托连续稳定的高精度航迹数据，高原空域水平管制间隔由传统 80-100 公里优化至 10 公里级别，空域承载能力提升 8 至 10 倍，极大盘活了稀缺的高原空域资源，有效缓解拉萨、昌都、阿里、日喀则等高高原机场航班运行压力，大幅减少航班空中盘旋、地面等待时长，显著提升航班准点率与空域运行效能。

4. 构建双向感知体系，筑牢极端环境安全屏障

面对高高原复杂多变、风险多发的运行环境，ADS-B 技术搭建起空地双向协同的安全防护体系。地面管制端可实时全域掌握航空器飞行动态，提前预判雷雨绕飞、高度变换引发的潜在冲突，精准发布管制指令、科学调配飞行秩序；机载端依托 ADS-B IN 设备，让机组实时掌握周边空域飞行态势，有效弥补高原山区目视条件差、视野受限的天然短板，与机载防撞系统联动形成双重安全防线。在航空器偏航、故障、遇险等极端特情下，地面可秒级锁定精准位置，大幅缩短应急搜救响应时间，最大限度降低高原飞行运行风险，为雪域蓝天航空安全筑牢坚实屏障。

5. 全域兼容互联互通，支撑一体化空管运行

当前，我国已建成覆盖西藏全域、川西、青海等核心高高原空域的 ADS-B 监视网络，航迹数据全面接入全国空管自动化系统，可实现与成都、昆明、兰州等周边区域空管数据无缝共享、互联互通。跨区域管制移交无需依赖人工点位通报，依托连续稳定的 ADS-B 航迹即可完成平滑交接，彻底消除跨区域监视盲区，构建起全域一体、互联互通、协同高效的高高原空管运行新格局。

三、ADS-B 技术在高高原空域的主要应用场景

（一）干线航路全域无缝监视

高高原干线航路是联通雪域边疆与内地的生命空中通道，过去长期处于无雷达监视、纯程序管制的落后运行状态，安全压力巨大、运行效率低下。随着 ADS-B 地面站组网全覆盖，成拉、拉昆、拉兰等核心干线航路及阿里、林芝、邦达、日喀则等支线航路实现全域无死角监视。管制部门可全程动态监控航空器巡航飞行状态，及时纠正偏航航空器、规范航路飞行秩序，彻底终结了高原干线航路长期依赖程序管制的落后历史，实现高原主干航路从“盲目管控”向“可视管控”的历史性跨越。

（二）终端区精细化智慧运行

高高原机场地形险峻、进近通道狭窄、起降环境复杂、低空风险集中，终端区运行始终是高原空管安全保障的重中之重、难中之难。依托 ADS-B 超高精度、高连续性的监视能力，彻底补齐了高原终端区低空监视短板，实现航空器转弯、爬升、进近、落地全流程精准管控。依托该项技术支撑，2025 年 5 月拉萨进近成功建成全国首个高高原 ADS-B 监视管制终端区，开创了高高原精细化进近管制的全新模式，有效规避山体碰撞、低空冲突、偏航失控等安全风险，极大提升了高高原机场终端区运行的安全性、规范性与精细化水平，为全国高原空管智慧化转型树立了标杆、提供了范本。

（三）复杂气象与突发特情智能处置

针对高高原气象突变、特情多发、风险隐蔽的运行特征，ADS-B 技术实现了飞行态势的动态实时感知。在雷雨大风、强颠簸、积冰等复杂天气下，管制员可通过航迹动态变化精准捕捉机组绕飞、调速、改航意图，提前预判群体性飞行冲突，科学调配空域秩序、精准发布管制指令。在航空器单发失效、座舱释压、设备故障等突发特情场景中，ADS-B 可提供毫秒级精准位置、高度、速度数据，为地面应急研判、搜救调度、备降指挥提供核心数据支撑，极大提升了高原空管特情处置的快速性、精准性、科学性。

（四）空域资源优化与智能流量调控

依托长年积累的海量 ADS-B 飞行大数据，空管部门可精准研判高高原各航路、各机场的流量分布规律、高峰运行特征、空域利用效能。通过深度数据挖掘与规律分析，持续优化空域结构布局、科学动态调整管制间隔、精准优化航班排班策略，实现高原空域流量的智能化、精细化、动态化调控，最大限度盘活高原稀缺空域资源，实现安全底线稳固、运行效率最优、保障能力升级的高质量运行目标，全面适配高原民航运输持续增长的发展需求。

四、ADS-B 技术在高高原应用中的现存问题

（一）极端环境信号稳定性有待提升

高高原强对流天气、高空乱流、复杂电磁环境多重干扰，对 1090MHz 数据链传输造成一定衰减与扰动，极端天气下偶发信号跳变、航迹抖动、短暂中断等现象。同时，部分偏远航路、山谷空域仍存在微小覆盖薄弱区域，极端工况

下易出现监视断层，对连续稳定的管制指挥造成一定影响。

（二）极端环境设备运维压力突出

高高原强紫外线、低温覆冰、大风积雪等恶劣环境，加速 ADS-B 天线、接收模块、供电设备老化损耗，设备故障率显著高于平原地区。加之高原台站海拔极高、位置偏远、交通闭塞、气候恶劣，人工巡检、故障抢修、设备更换难度大、周期长，运维保障压力艰巨，难以完全实现设备隐患前置清零。

（三）多源数据融合深度不足

当前高原 ADS-B 应用仍以基础航迹监视、常规管制指挥为主，与气象数据、飞行计划、设备状态、空域环境等多源数据融合程度不高，大数据挖掘、智能风险预警、态势智能研判等深层次智慧化应用尚未完全落地，数据价值挖掘不充分，空管运行仍以人工研判为主，智能化赋能水平有待进一步提升。

（四）专用通信传输链路较为薄弱

目前高原 ADS-B 监视数据主要依托公网移动通信传输，尚未建成独立专用传输链路。高高原地广人稀、地形复杂、天气恶劣，公网信号稳定性差，极端天气、冰雪灾害、停电故障极易造成链路中断，影响监视数据实时性与连续性，数据传输安全冗余不足。

（五）一线人员高原特情处置能力有待精进

高高原特殊运行环境下，ADS-B 信号异常、航迹扰动、环境干扰等特殊工况区别于平原地区，对管制人员、运维人员的专业素养、特情处置经验、故障研判能力提出更高要求。部分一线人员对高原特殊场景下的设备异常识别、风险预判、应急处置经验积累不足，技术装备优势未能完全转化为安全保障效能。

（六）高山台站现场保障条件艰苦

高原 ADS-B 台站多坐落于高海拔山顶荒野区域，常年风雪笼罩、道路闭塞、环境艰苦，常态化巡检、设备抢修、故障复位难度极大，一旦设备突发故障，现场处置滞后，一定程度影响全域监视网络稳定性。

五、ADS-B 技术高高原应用优化对策

（一）优化组网布局，强化抗干扰能力

结合高原山川地形特征与气象分布规律，持续优化 ADS-B 地面站组网布局，精准补齐山谷空域、偏远航路、终端低空薄弱覆盖区域，彻底消除监视盲区与覆盖死角。升级设备抗干扰传输模块，优化高原专用信号接收算法，强化强对流、电磁干扰、极端天气下的信号稳定性，保障航迹数据连续、稳定、精准、可靠。

（二）构建高原专属运维体系，实现长效稳定运行

立足高原艰苦运行实际，建立适配高高原极端环境的 ADS-B 专项运维机制，制定高寒、大风、覆冰环境下标准化巡检、老化更换、故障处置流程。搭建远程智能监控平台，实现设备状态实时监测、故障提前预警、隐患精准定位。优化台站保温、防风、防雷、供电保障设施，全面提升设备高原环境适配能力，实现设备长效稳定运行。

（三）深化多源数据融合，推进智慧空管转型

搭建高原空管多源数据融合平台，深度整合 ADS-B 航迹、气象预警、飞行计划、设备状态、空域环境等多维数据，开发智能冲突预警、特情自动识别、流量智能调控、风险智能研判功能，深挖高原飞行运行规律，推动空管运行由被动处置向主动预判、智能防控跨越式升级，全面提升高原空管智慧化水平。

（四）建设专用链路，打造冗余传输体系

积极推进高原 ADS-B 数据专用通信链路建设，摆脱对公网传输的过度依赖，构建“专网为主、公网为辅、卫星备份”的三重冗余传输架构，全面提升极端天气、偏远区域、故障工况下的数据传输稳定性，筑牢高原监视数据传输安全底座。

（五）强化队伍建设，锻造高原专业铁军

聚焦高高原特殊运行场景，常态化开展 ADS-B 技术专项培训、实操演练、案例复盘，重点强化高原信号异常识别、极端天气管制指挥、突发特情应急处置、设备高原运维等核心能力培育。完善师徒带培、岗位练兵、技能比武机制，沉淀高原特色处置经验，锻造一支扎根高原、技术精湛、作风过硬、敢于担当的专业化空管保障队伍。

六、结论与展望

雪域高原空域环境极端、保障任务艰巨、安全责任重大，传统雷达与程序管制模式长期桎梏着高原民航的发展步伐。ADS-B 技术以其部署灵活、全域覆盖、精准高效、经济适配的独特优势，历史性破解了高高原空管监视盲区大、运行效率低、安全风险高、保障难度大的行业顽疾，彻底重塑了高高原空管运行体系，大幅提升了高原航空运行安全裕度、空域资源利用效能与边疆民航服务保障能力，为雪域蓝天畅通安宁、边疆经济发展、应急航空救援、民族团结稳定提供了坚实可靠的技术支撑。

立足当下，ADS-B 技术在高高原复杂环境下仍存在信号稳定性不足、运维保障艰难、智能应用不深、传输链路薄弱等现实问题，仍需持续优化组网布局、完善运维体系、深化数据赋能、补强通信短板、夯实队伍能力，持续释放技术赋能价值。展望未来，随着北斗导航深度应用、空管大数据、人工智能、5G 空地通信等前沿技术与 ADS-B 体系深度融合，高高原空管监视体系将向着更高精度、更强稳定、更智能高效、更全域协同的方向持续迭代升级，进一步拓展在通用航空监管、高原应急救援、空域精细治理等多元场景的应用边界，持续推

动高高原空管事业从“艰苦保障”迈向“智慧高效”，为新时代雪域民航高质量发展、筑牢边疆空中安全屏障续写崭新篇章。

参考文献：

[1] 中国民用航空局。西藏民航“十四五”发展规划[Z]. 北京：中国民用航空局，2021.
[2] 张兆宁，吴昊。高原空域程序管制向 ADS-B 监视管制转型研究 [J]. 中国民航大学学报，2022,40 (02):7-12.
[3] 国际民航组织。全球空中交通管理运行手册 [M]. 蒙特利尔：国际民航组织，2019.
[4] 李毅。高高原空管监视设备建设难点与解决方案 [J]. 空中交通管理，2023 (04):41-45.
[5] 王亮 . ADS-B 技术对高原空域管制间隔优化的影响分析 [J]. 民航科学技术，2022,14 (03):72-76.
[6] 周宇。高高原机场气象特征及空管运行应对策略 [J]. 航空气象研究，2021,5 (01):36-40.
[7] 陈涛。高原环境下 ADS-B 地面站设备运维管理研究 [J]. 航空计算技术，2023,53 (02):134-138.
[8] 刘俊 . ADS-B 地面站组网布局与高原覆盖效能分析 [J]. 飞行力学，2022,40 (09):96-100.
[9] 朱承一 .ADS-B 与二次雷达监视精度对比及终端区应用研究 [J]. 交通运输工程与信息学报，2023,21 (02):211-217.
[10] 杨波。基于 ADS-B IN 的航空器空中态势感知与冲突预警 [J]. 民航学报，2021,5 (06):58-62.
[11] 林浩。高原地区 ADS-B 数据传输链路优化与多源数据融合 [J]. 计算机仿真，2024,41 (05):431-435.