

5G 地空通信 (ATG)

航空互联技术体系白皮书

1.0



中国移动通信集团有限公司
2025年10月

前言

PREFACE

航空互联网是推动民航业数字化升级、提升旅客出行体验的关键基础设施，对构建“智慧航空”新业态具有战略意义。5G 地空通信（Air to Ground，以下简称 5G-ATG）作为实现航空宽带接入的重要技术路径，凭借其低时延、高带宽、低成本的优势，为优化客舱服务体验、提升民航运行效率提供了可靠技术底座，是我国从“民航大国”迈向“民航强国”的战略性技术选择。

中国移动积极发挥产业引领作用，加速推动 5G-ATG 技术成熟与产业落地，秉承“网端协同、空地协同、智能协同”的核心理念，系统构建涵盖终端、网络、平台的端到端 5G-ATG 技术体系，解决超高速、超高空条件下的覆盖以及空地干扰难题。同时，中国移动作为 3GPP ATG 项目报告人牵头技术标准制定，在 CCSA 推动 5G-ATG 基站及终端系列行业标准立项，促进产业发展及成熟。近期，依托工信部批复的 4.9GHz 试验频率，中国移动在西部航线建成业界首个 5G-ATG 试验网，完成多项关键技术验证，为后续规模化商用奠定了坚实基础。

本白皮书系统勾画了中国移动 5G-ATG 的发展愿景和技术发展规划，为产业在地空通信技术发展、技术引入规划和产品解决方案设计等方面提供参考和指引。中国移动愿与产业各方协同攻坚，共同推进 5G-ATG 规模化商用，赋能智慧航空建设，助力我国航空互联网高质量发展。

本白皮书的版权归中国移动所有，未经授权，任何单位或个人不得复制或拷贝本白皮书之部分或全部内容。

本白皮书由中国移动通信有限公司研究院、中移(上海)信息通信科技有限公司、中国移动通信集团设计院有限公司联合撰写。感谢中兴、中国商飞、中国国际航空公司、成都航空公司等在撰写过程中提供相关素材及数据支持。

目 录

1. 航空互联网概述	1
2. 航空互联网发展趋势	2
2.1. 市场前景广阔	2
2.2. 政策支持利好	3
2.3. 技术快速发展	4
2.4. 产业积极跟进	5
3. 5G 地空通信网络架构及关键技术	6
3.1. 端到端网络架构	6
3.2. 面临的五大挑战	7
3.3. 5G 地空通信技术体系	8
3.3.1. 端到端技术体系	8
3.3.2. 新算法：克服超高多普勒频偏	9
3.3.3. 新空口：突破超广域覆盖边界	10
3.3.4. 新站型：实现超高空连续覆盖	10
3.3.5. 新技术：优化超复杂空地干扰	11
3.3.6. 新方法：提升立体维评估精度	12
4. 5G 地空通信标准化进展	12
4.1. 3GPP	12
4.2. CCSA	13
4.3. CTSO	13
5. 5G 地空通信航线试验进展	14
6. 总结与展望	15

1. 航空互联网概述

航空互联网是可以为民航飞机提供高速稳定的互联网接入服务，提升乘客飞行体验的技术统称。依托航空互联网，航空公司可以实现三个层面的价值跃升：一是提升航司的竞争力，通过提供接近地面使用体验的互联网接入服务，大幅提升旅客出行的幸福感；二是实现商业价值拓展，航司与内容服务提供商合作，实现精准增值服务推送和定制化广告投放，提升航班运行收益；三是提升航空运营效率，基于实时数据交互能力连续监测飞机运载状态，优化航线调度。

航空互联网有两种主流技术路线：基于星基系统的机载卫星通信和基于陆基系统的地空通信（即 ATG）技术，如图 1 所示。基于星基系统的机载卫星通信技术是指利用高轨或低轨卫星作为中继，建立飞机与地面信关站的通信链路，乘客或机组人员的数据传输至卫星，经卫星地面关口转发接入互联网。基于陆基系统的地空通信技术是指通过沿航线部署对空覆盖的 ATG 基站，实现飞机到地面网络的直接通信，此时机载天线安装在飞机腹部，将移动蜂窝转换为 WiFi 信号实现机舱内的网络覆盖。

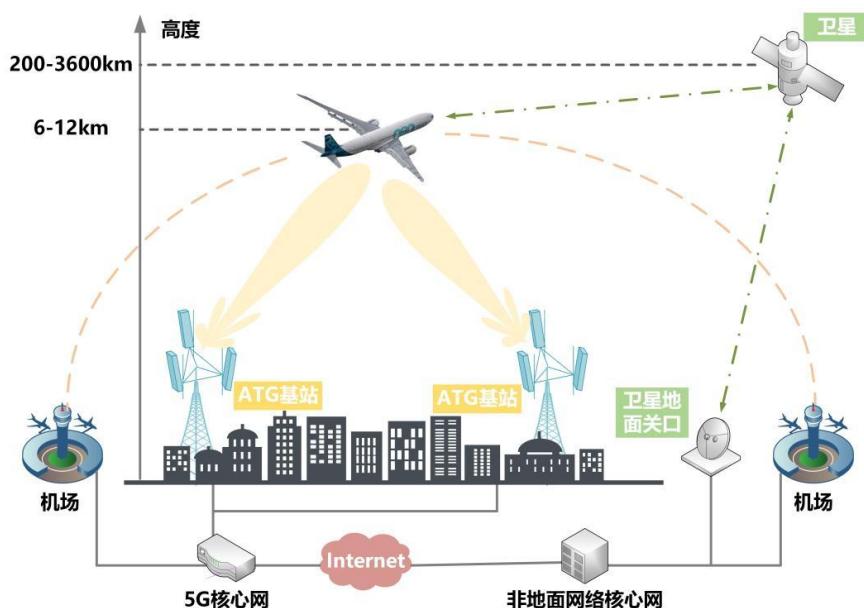


图 1 航空互联网主流技术路线示意图

国际上，欧美以“ATG+卫星”混合组网率先开拓飞机网联市场。在欧洲，最早采用 Ku 波段高轨卫星提供网联服务，但单机带宽小、性能差，加之欧洲空域碎片化严重，在政策与空管需求驱动下逐步演进为卫星及 ATG 共存的组网方式。2015 年，德国电信、Inmarsat、泰雷兹等联合开发欧洲航空网(European Aviation Network, EAN)，累计部署了 400 个 4G-ATG 基站实现欧洲境内覆盖，同步采用卫星覆盖洲际范围，目前随着 5G 技术的不断成熟，正计划采用 NSA 向 SA 过渡的

5G-ATG 升级方案。在北美，美国 Gogo 公司于 2008 年采用 3G-ATG 部署 425 个基站覆盖美国全境及五大湖区域，北美以外采用卫星网络。近年来，Gogo 公司持续演进组网策略，先后提出了 Gogo 4G-ATG 和 Gogo 5G-ATG 演进计划，2025 年 7 月完成首次基于 5G-ATG 的通话测试，预计 2026 年实现商用服务。

在国内，因政策约束加之卫星资源匮乏，航空互联网起步较晚。初期，主要依赖国际海事卫星组织（Inmarsat）的高轨卫星，随着国内中星系列、亚太 6D 等高通量卫星体系的成熟，截至 2024 年全国约 200 架飞机采用该方式提供网联服务，且受性价比制约，目前主要应用于宽体飞机。

2. 航空互联网发展趋势

我国航空互联网发展初期因技术落后、整机带宽小体验差、流量资费高等因素，网联飞机的改装规模始终处于较低水平。近期，受市场需求、技术演进以及政策开放的多重驱动，航空互联网产业发展迎来历史机遇。

2.1. 市场前景广阔

欧美航空互联网普及率较高，美国超 80%、欧洲超 50%，全球市场规模达百亿美元。相比之下，国内航空领域长期处于互联网服务盲区，覆盖率不足 6%。我国是全球第二大民航市场，2023 年民航旅客运输量为 6.2 亿人次，2024 年达 7.3 亿人次，同比增长 17.9%。得益于我国移动通信网络的大范围普及，人们已习惯于“实时在线”的生活方式，飞行中的“信息孤岛”愈发难以忍受，民航旅客日益增长的联网需求与联网率低的矛盾日益突出。调研显示，超 60%的旅客愿意有偿使用机上网联服务，航空互联网的商业潜力巨大。

航空互联网典型应用场景分为前舱和后舱业务，如下图 2 所示。近期主要聚焦以服务后舱业务为主，未来在政策监管的许可下可进一步面向前舱提供服务。飞机前后舱业务种类多、差异大，对网络性能提出了更高的要求，推动航空互联网服务向宽带化、实时化和低本化演进，具体为：

- ◆ **宽带化：**满足业务的大带宽需求，如后舱应用中的短视频、高清电影，以及叠加网页浏览、即时通信（微信/邮件）、社交媒体等数据业务；以及前舱应用中黑匣子部分数据的实时云端冗余存储等。
- ◆ **实时化：**满足业务的低时延需求，如后舱应用中的在线游戏、AR/VR，以及远程医疗会诊、应急通信等紧急保障服务等；以及前舱应用中的气象、空域动态等飞行数据信息同步。
- ◆ **低本化：**无论是基于航程、流量等付费方式，其资费标准不应比地面收

费高很多。



图 2 航空互联网服务典型应用场景

2.2. 政策支持利好

随着机载航空通信业务相关政策的解禁，航空互联网迎来快速发展契机。2018年，工信部下发《关于航空机载通信业务商用试验转为正式商用的通知》，民航飞机上网正式获得批准。同年，中国民用航空局发布《机上便携电子设备(PED)使用评估指南》，开放了机上便携电子设备使用的限制。2021年，国家无线电办公室印发《关于加强地空移动通信(ATG)业务无线电管理有关事宜的通知》，对ATG业务使用无线电频率、无线电发射设备等提出要求。同年，民航局正式发布《中国民航新一代航空宽带通信技术路线图》，首次明确提出以5G为代表的新一代航空宽带通信技术应用于中国民航的系统性实施路径。2023年初，工信部正式向电信运营商下发《中华人民共和国工业和信息化部公告(2023年第7号)》，取消机载卫星设备3000米以上方可开机使用的限制，乘客可以享受从起飞到落地的全航段完整网络服务。同年，工信部批复中国移动使用4.9GHz部分5G频率资源在国内有关省份开展5G地空通信技术试验，加快了5G-ATG技术的商用进程。

2025年，工信部向国内有关部门下发《中华人民共和国无线电频率划分规定》(修订征求意见稿)，明确规定相关频段可用于航线内不涉及安全应用的有人驾驶航空器地空通信(ATG)，以及民用无人驾驶航空器遥控、遥测及信息传输的相关要求。6月17日，民航局空管办发布“关于征求《中国民用航空无线电管理规定(征求意见稿)》意见的通知”，为1990年5月26日颁布实施以来的首次更新，明确要求安装机载卫星或地空通信终端的，需提交我国境内卫星或

地空通信网络运营单位出具的入网证明文件（但批准临时使用频率的除外），为 5G-ATG 航空应用的监管做好准备。

2.3. 技术快速发展

在卫星通信方面，随着天通、中星、亚太等系列卫星的发射运营，我国高轨卫星技术已愈发成熟，在波束数量、单波束容量、星载容量等方面取得长足进步。近年来，低轨卫星星座的发展非常迅速，以中国星网公司的“GW 星座”和上海航天卫星公司的“千帆星座”为代表，卫星发射频次显著提升，但整体仍处于技术验证阶段，受限于卫星制造及发射成本，短期内暂无法形成具备商用落地能力的星座规模。

在 5G-ATG 方面，得益于覆盖完备的陆基网络，发展地空通信技术具备天然的技术与产业优势。与卫星通信相比，其与飞机的距离近、传播损耗小，性能优异，针对民航飞行环境做针对性优化即可提供与地面一致的体验保障；同时，发展地空通信能够充分复用现有 5G 产业链基础，端到端自主可控能力更强。5G-ATG 与机载卫星通信的对比如下表 1 所示。

表 1 5G-ATG 与机载卫星通信技术优劣对比

对比项		5G-ATG	机载卫星通信	
			Ku/Ka 高通量卫星	低轨卫星星座
技术层面	通信高度	约 6-12 公里	约 36000 公里	200-2000km
	单机带宽	420Mbps	约 150Mbps	约 200Mbps
	空口时延	20ms	540ms	<99ms
	全国覆盖	1500 站	1 颗星	同时在空 ≥100 颗星（仅基础连接）
	系统容量	15750Gbps	100Gbps	2000Gbps
	覆盖范围	陆域航线	全球航线	全球航线
运	建设成本	约 7.5 亿元	约 20 亿元	约 66 亿元

营 层 面	网络寿命	>15 年	约 15 年	3-5 年
	单机改造成本	<150 万	约 450 万	约 450 万
	流量资费	单 GB 略高于地面	300 元/G	18 万元/架/月
产 业 层 面	国内基站/卫星设备成熟度	成熟, 可自主生产	逐步成熟	逐步成熟
	国内机载设备成熟度	成熟, 可自主生产	逐步成熟	逐步成熟

我国是陆地大国, 周边中亚、东南亚、中东、俄罗斯、欧盟等与我国均直接或间接通过陆地链接, 内陆航线占比超 80%。同时, 我国 5G 产业优势全球领先, 近期采用 5G-ATG 技术路线更具落地优势, 面向中远期(未来 5-10 年)可通过与卫星通信在设备、能力等方面全面融合, 实现优势互补, 为民航客机提供全球网联服务。本白皮书 1.0 版本仅面向近期, 围绕 5G-ATG 在技术、标准及产业方面展开详细分析, 暂不涉及卫星通信的相关内容。

2.4. 产业积极跟进

随着市场需求的涌现、政策支持的逐步利好以及 5G-ATG 技术的日趋成熟, 国内产业积极跟进。5G-ATG 端到端上中下游产业链组成如下图 3 所示。上游提供软硬件设备, 包含地面设备、机载设备和航电系统提供商; 中游提供网络运营及服务, 包含 ATG 网络运营商以及具备集成能力的专业服务提供商; 下游为 5G-ATG 提供应用, 含航空公司以及内容服务提供商。



图 3 国内 5G-ATG 端到端产业链图谱

在上游，以中兴通讯为代表，凭借其在 ATG 领域的持久投入，已具备相对成熟度的 5G-ATG 基站和机载 CPE 供应能力；华为与空陆互联也已完成实验室的联调测试；多尼卡具备较为成熟的机载客舱产品及解决方案等。在中游，以中国移动为代表，已完成全球首个基于“成都-敦煌-吐鲁番”商用航线的 5G-ATG 试验网建设，且已完成多次飞行测试，网络性能得到充分优化，具备预商用能力；中国电信等也在积极推进。在下游，以成都航空为代表，已联合商飞完成 C909 机型的改装，且已通过适航认证，依托中国移动建设的 5G-ATG 试验网已完成多次飞行；而腾讯则积极布局航空互联网，致力于打造数字客舱精品服务。

得益于 5G-ATG “产、研、用”各方的积极推进，上下游产业链逐步贯通，生态合力日益显现。5G-ATG 技术的成熟也将助力国产大飞机的全面升级，国际竞争力进一步提升，加速我国从民航大国向民航强国转变。

3. 5G 地空通信网络架构及关键技术

5G-ATG 虽然复用陆基网络，但因其服务民航飞机运行环境的特殊性，在网络架构、面临的挑战以及解决路径上与传统地基网络存在一定区别。对此，中国移动积极联合产业开展技术攻关，构建从终端、网络到平台一体贯通的技术体系，推动 5G-ATG 技术成熟应用。

3.1. 端到端网络架构

5G-ATG 系统通过沿航线部署对空覆盖 5G-ATG 基站，实现飞机到地面网络的直接通信，为民航客机提供高速网联服务，满足乘客在航行过程中对娱乐、社交、购物、应急等场景使用的网络需求。5G-ATG 系统端到端总体网络架构如下图 4 所示。

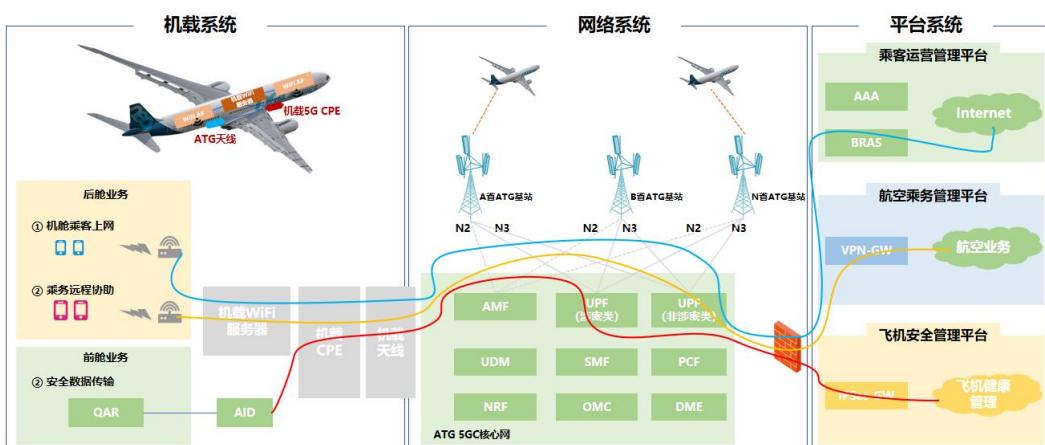


图 4 5G-ATG 端到端系统架构

5G-ATG 端到端由网络系统、机载系统和平台系统三大部分组成，其中各部分如下：

(1) 网络系统：由接入网和核心网两部分组成。接入网主要为 5G-ATG 基站，沿航线部署，为飞机所在空域提供无线覆盖；核心网主要为 AMF、UPF 等系列网元，可采用 5G 专网或复用部分大网的方式建设。5G-ATG 基站通过 SPN/PTN+IP 承载网与 AMF、UPF 互联，核心网用户面出口部署防火墙用于与外部平台数据的隔离防护。

(2) 机载系统：包含机载 5G CPE、机载天线、机载 WiFi 服务器和机舱 WiFi AP。其中，机载 CPE 为具备 5G 通信能力的端侧设备，对内与机载 WiFi 服务器相连，对外与机载天线相连，是贯通舱外 5G 与舱内 WiFi 的桥梁。机舱 WiFi AP，用于舱内 WiFi 信号的覆盖，乘客的便携电子设备通过连接舱内 WiFi 完成认证后访问互联网业务。

(3) 平台系统：主要包含乘客运营管理平台、航空乘务管理平台和飞机安全管理平台三大类。其中，乘客运营管理平台由运营商管理维护，AAA 平台用于舱内乘客的登录认证、BRAS 平台用于业务流量统计及访问控制等，外部联通互联网；航空乘务管理平台和飞机安全管理平台由航空公司管理维护，传输机组远程数据、飞机健康数据等，安全性要求较高，需要进行安全隔离。

3.2. 面临的五大挑战

移动通信网络初始设计以满足地面用户的需求为主，例如：人的正常行走，到乘坐汽车、高铁等。然而，随着业务的不断发展，应用场景逐步由地面延伸至低空和高空，网络覆盖也逐步由二维向三维拓展，其面临的问题更加严峻。具体地，5G-ATG 网络面临如下五方面挑战：

(1) 快：移动速度。在地面移动通信场景中，汽车移动速度约为 120km/h，高铁移动速度约为 300–350km/h，而民航飞机的巡航速度一般在 800–1200km/h 范围内，是汽车的 6.67–10 倍、高铁的 2.28–4 倍。在 4.9GHz 频段，800–1200km/h 的巡航速度将造成 3630–5444Hz 的单倍多普勒频偏，严重影响飞机接入成功率。普通终端一般不具备上行频偏纠正能力，5G-ATG 系统需要克服近 11KHz 频偏，已远超现有参考信号的纠偏能力，对接入成功率及业务质量保障带来严峻挑战。

(2) 广：覆盖范围。700MHz 5G 地面基站覆盖半径约 1km，4.9GHz 频段约为 300–500m。相比之下，为满足沙漠及近海覆盖需求，且尽可能减少频繁的切换，5G-ATG 基站需设计支持最大 300km 的覆盖，是常规 5G 地面基站覆盖能力的

300–1000 倍，导致两方面问题：一是路径损耗大幅增加，相比地面二维覆盖传输损耗增加近 50–60dB；二是传播时延大幅增加，300km 覆盖半径下信号传播时延增加至 1ms。对此，需要对机载终端发射功率、大网时隙结构、接入方式及定时关系等进行相应调整。

(3) 高：巡航高度。地面及低空网络的垂直覆盖高度在 0.6km 以下，可通过常规天线的倾角调节实现有效覆盖；而民航飞机的巡航高度为 6–12km，传统 AAU（如 4.9GHz）设备的垂直波束扫描角度受限（最大 24°），会导致基站顶部区域覆盖困难，存在覆盖空洞，飞机飞越基站正上方时面临通信链路中断的风险。

(4) 杂：空地干扰。一方面既要考虑 5G–ATG 与射电天文、无线电高度表等 IMT 外的系统兼容性问题；另一方面也需兼顾 5G–ATG 对 IMT 内的地面大网、低空和通感的影响，如同频干扰、交叉时隙干扰等。

(5) 难：仿真评估。传统 5G 地面网络采用单点小区边缘速率作为业务需求满足度的核心评估指标，而 5G–ATG 网络在终端分布、水平及垂直维度上呈现显著三维动态特性，传统评估指标无法代表机载终端在三维全链路上的业务需求满足度，仿真评估面临困难。具体表现在：一是民航飞机运动状态时变性强，传播损耗与天线增益动态偏移，链路质量非线性波动；二是小区内终端分布极稀疏，但单机业务速率需求远超地面用户均值；三是 5G–ATG 网络覆盖三维空域，单点速率指标仅反映二维平面边缘性能，无法量化高空弱覆盖区。

3.3. 5G 地空通信技术体系

3.3.1. 端到端技术体系

针对上述五大挑战，基于 5G–ATG 端到端网络架构，中国移动秉承“网端协同、空地协同、智能协同”的核心理念，构建从终端层、接入层、网络层、平台层、安全层等一体贯穿的 5G 地空通信技术体系（1.0），攻克高速、高空环境下的覆盖以及空地干扰难题，高质量支撑民航客舱内多样化业务应用，如下图 5 所示。

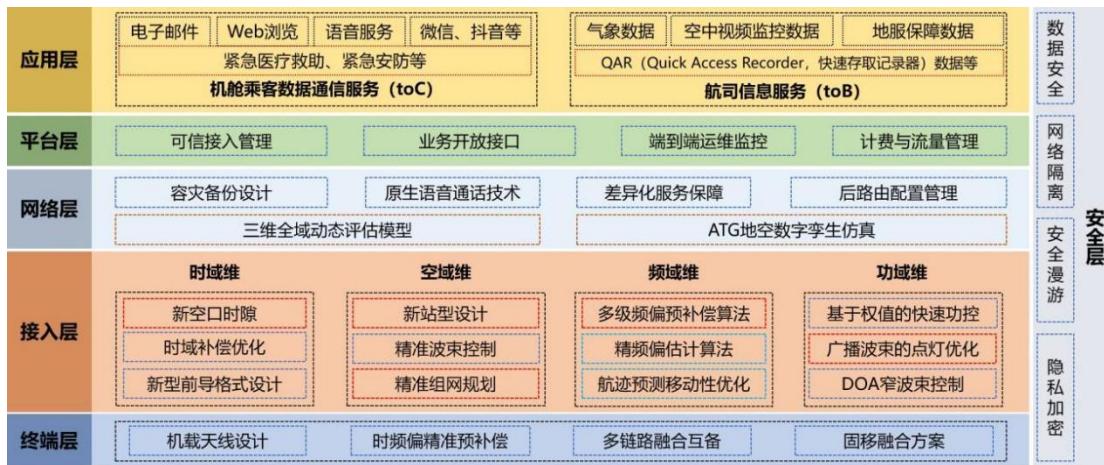


图 5 5G 地空通信技术体系 (1.0) 示意图

其中，终端层通过创新时频偏补偿算法保障高速接入的稳定性，并通过重构机载天线设计以提升收发增益、抑制对地干扰；接入层硬件侧采用新站型扩展AAU垂直扫描能力，软件侧设计新空口时隙结构适配广覆盖，并引入空地干扰抑制方案；网络层基于航路分布设计无线与核心网协同组网架构，实现全国高可靠低成本覆盖；安全层结合网络隔离及隐私加密策略，确保端到端数据绝对安全。围绕上述创新，凝练为新算法、新空口、新站型、新技术、新方法，具体展开如下。

3.3.2. 新算法：克服超高多普勒频偏

为克服民航飞机高速移动带来近 11kHz 的超大多普勒频偏问题，设计多级预补偿技术逐步抑制多普勒频偏，同时保证高精度、低复杂度的系统性能。具体为，机载 CPE 根据其位置、终端速度，和基站粗略位置分别计算上下行的多普勒频移，并参考计算结果，在上行传输和下行接收前，进行频域预补偿。在下行同步过程中，通过 SSB 进行 ±6.29kHz 的粗频偏估计，接入后利用 TRS 进行频偏跟踪与补偿。在上行发射时，将下行频偏估计值取反后进行上行频偏预补偿，同时，基站侧仍基于常规的频偏估计算法进行进一步的频偏补偿，补偿后的残余多普勒频偏最高为 0.01ppm，在现有参考信号估计补偿的范围内，如下图 6 所示。

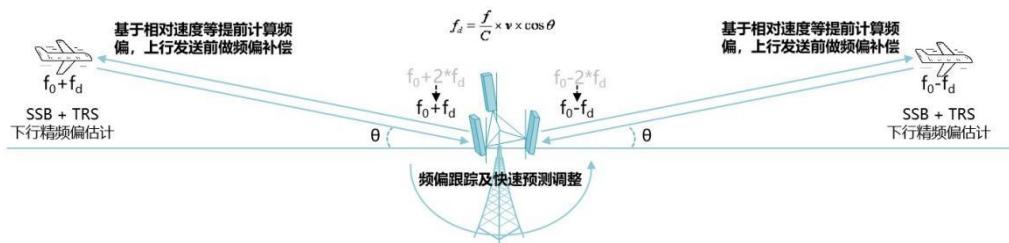


图 6 5G-ATG 超高多普勒频偏补偿示意图

3.3.3. 新空口：突破超广域覆盖边界

民航客机飞行速度快，为减少频繁切换、降低部站成本，同时考虑我国东部沿海航线的覆盖，ATG 基站设计支持 300 公里的极限覆盖能力。目前现网 4.9GHz 频段时隙配置为 2.5ms 双周期（7D3U），特殊时隙配置为 10:2:2，保护间隔 GP 仅 2 个符号，支持的最大覆盖半径约为 10km，且现有 3GPP PRACH 格式的覆盖能力亦无法满足需求。

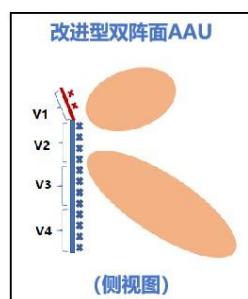
针对上述问题，重新设计 20ms 长周期帧结构并优化 PRACH 接入机制，实现极致 300 公里的覆盖需求和接入能力。一是电磁波传输环回时延为 2ms，即上下行转换时延间隔 GP 至少为 2ms。考虑民航飞机上的通信业务模型和大网模型一致，主要以下行业务为主，上行传输需求较少，因此采用典型的上下行时隙比例为 1:5。同时，为了尽可能减少上下行时隙转换之间保护间隔带来的资源损耗，设计采用 20ms 单周期的方式，如图 7 所示。二是现有 3GPP 定义的 PRACH 格式，最大仅支持 102 公里半径覆盖，无法满足 300 公里的大半径覆盖要求。对此采用时域预补偿技术，保障超大半径下随机接入的稳定性。

n-1										n										n+1										n+2									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D	D	S	S	S	S	U	U	U	U	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D			

图 7 5G-ATG 20ms 长周期帧结构设计

3.3.4. 新站型：实现超高空连续覆盖

针对传统 AAU 垂直波束扫描角度受限，基站顶部存在覆盖空洞的问题，重新设计具备超大垂直扫描范围的新型 AAU。目前存在两种解决方案：一是改进现有 AAU 的天线阵面，将其分成不同阵面，比如 2° - 40° 覆盖区域使用阵面 A 覆盖，在顶部 40° - 90° 过顶区域使用阵面 B 覆盖，通过灵活的阵面设计来满足超高空连续覆盖，解决现有 AAU 的覆盖空洞问题；二是设计具备垂直超广角能力的 AAU，如业界现有 128TR 通感一体 AAU，采用 768 阵子将垂直扫描能力从传统的 24° 提升至 60° ，显著改善基站顶部超高空的连续覆盖。如下图 8 所示：



方案一示意图



方案二示意图

图 8 5G-ATG 新 AAU 站型示意图

3.3.5. 新技术：优化超复杂空地干扰

ATG 系统因覆盖区域由二维平面变为三维立体，加之采用新的时隙配比，其对 IMT 系统内外上下行有较多的潜在干扰。传统干扰控制手段包括：一是物理隔离，如 5G-ATG 基站的选址需与受扰源满足一定的物理隔离条件；二是错频调度，如 5G-ATG 网络与低空和地面基站之间采用动态或静态错频调度；三是时隙静默，如对应通感中的 G 时隙的 5G-ATG 上行时隙不进行任何的数据发送。上述干扰控制手段可以在一定程度上有效解决或规避 5G-ATG 与其它系统的干扰共存问题，但在实际部分场景下面临的干扰无法解决，如部分地方 ATG 基站部署无法满足物理隔离的要求，如一些旅游热点城市、东部航线密集城市等。另外，随着低空经济的发展，无人机飞行越来越多，且其范围不固定无法用物理隔离来保障，ATG 基站主瓣或旁瓣对空的长时间、大范围覆盖极易干扰无人机飞行等。

对此，需采用可进一步降低空地干扰的优化手段。如下图 9 所示，结合 ATG 场景特征设计基于航迹追踪的动态干扰优化方案，其初始状态为除机场周边一定范围内的 ATG 基站处于常规广播波束发送外，其它 ATG 基站均静默。当飞机按计划飞行时，沿航路分布的 ATG 基站根据飞机所在位置，逐个进行“熄灯”→“点灯”→“熄灯”的状态转换，在“熄灯”状态下射频关闭，广播波束等均不发送等待唤醒；在“点灯”状态下射频正常工作，广播波束根据配置发送，进行正常的接入及上下行业务等。采用该方案，既可以降低常发态的广播波束对地面通信站、低空（含飞行的无人机）及通感站的干扰；也可以降低 ATG 基站间在 3 公里以上高空覆盖的同频干扰，使切换准确率更高。同时，对于无法满足物理隔离条件部署的 ATG 基站，因动态“点灯”、“熄灯”的机制也会将长时间干扰降低为瞬时干扰，加之地面业务和机载业务的随机性，干扰产生的影响大幅降低。

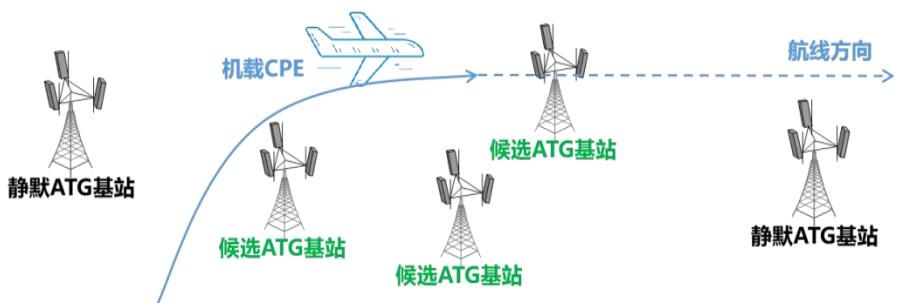


图 9 基于航迹追踪的动态干扰优化方案

3.3.6 新方法：提升立体维评估精度

5G-ATG 与传统地基网络的差别主要体现在小区半径极大、终端位置极高、并发用户极少、传播模型极简四个方面，采用单点小区边缘速率评估业务需求满足度的传统方式不再适用。

对此，针对 5G-ATG 场景创新提出三维全域评估模型，可综合 5G-ATG 基站、机载 CPE 的天线方向图，对民航客机由远及近、由高到低的整个三维空域链路情况进行评估，对上下行速率进行精确评估，快速找到覆盖盲点指导后续规划。该模型突破传统地面网络采用边缘速率这一单“点”指标的成规，将速率评估能力扩张到不同投影距离下的“线”分布、继而不同飞行高度下的“面”分布，并兼容不同方位指向下的“体”分布的未来演进，最终形成立体全域的 ATG 通信链路预算能力，如下图 10 所示。

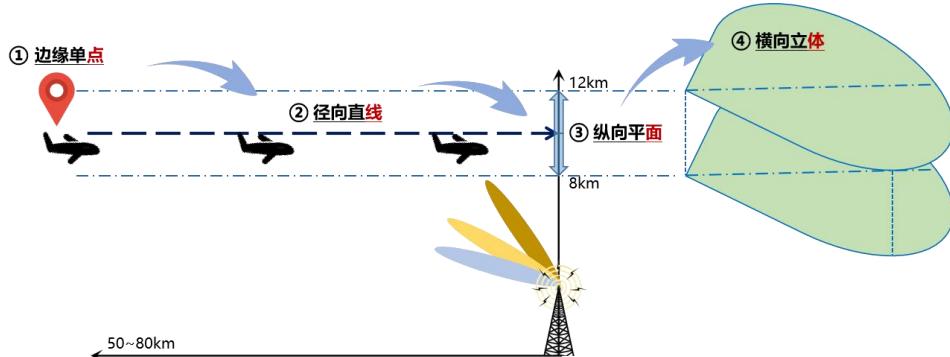


图 10 5G-ATG 三维全域评估模型示意图

4. 5G 地空通信标准化进展

随着 5G-ATG 技术的快速演进，其标准化体系也逐步完善。国际通信标准方面，3GPP R18 于 2024 年 6 月 18 日冻结发布，定义了支持 5G-ATG 的相关增强技术，成为支持 5G-ATG 的首个标准版本；国内行业标准方面，围绕 5G-ATG 系统建设、频段及兼容性等已完成多项研究课题，基于此 TC5 WG9 已启动立项 5G 地空通信端到端技术要求及测试方法等系列标准，加速推动产业及生态统一；国内民航标准方面，中国民航局航空器适航审定司组织完成 5G-ATG 机载设备标准的制定并发布征求意见稿，为 5G-ATG 航空应用统一技术要求。

4.1. 3GPP

中国移动担任地空通信 ATG 项目报告人，牵头制定 5G NR ATG Rel-18 及 Rel-19 相关技术研究和标准化工作，定义可满足民航飞机网联需求的系列增强

特性。其中，3GPP Rel-18 聚焦 FR1 单载波单流数据传输场景，已于 2024 年 6 月冻结发布，Rel-19 标准聚焦 FR1 载波聚合及双流数据传输等增强场景。围绕 5G-ATG，3GPP R18 定义的要求及增强功能如下：

- **频段方面：**ATG 复用现有地面网络的 5G FR1 频段，基于运营商需求，截至目前，规定了 n1、n3、n34、n39、n41、n78、n79 可用于 ATG 部署；
- **天线类型：**规定机载终端除支持全向天线类型外，可以额外支持阵列天线类型，以提升信号的指向性提供更好的上下行覆盖及链路性能，并定义了相关射频指标及测试方法；
- **系列增强技术：**面向 300km 的超远基站覆盖范围、1200km/h 的超高终端移动速度的挑战，3GPP 基于地面网络的 5G 技术，新增了 SIB22 广播消息，增强了基于终端位置和基站粗位置的时频域预补偿、TDD 特殊时隙配置及符号级 TA 上报、基于位置的条件切换等系列技术，更新了阵列天线的测量指标等。

4.2. CCSA

在 CCSA TC12WG2、TC5WG8，中国移动、信通院、中国电信等先后发布《基于运营商自有频段进行空对地（ATG）系统建设研究》、《航空机载通信 ATG 子系统技术要求》、《地空宽带通信系统（ATG）频谱需求测算及兼容性研究》等系列研究报告，明确 5G-ATG 技术的基本原理、关键技术及整体解决方案，探讨利用运营商频率建设 ATG 系统的可行性，为 5G-ATG 技术标准的制定奠定了坚实的理论基础。

2024 年 10 月，由中国移动牵头，联合信通院、中国电信、中国联通在 TC5 WG9 先后完成 5G 地空通信的基站/终端设备技术要求和测试方法，填补 5G-ATG 行业标准的空白。该系列标准未来将指导地空通信基站及终端设备的研发与入网认证，对加速产业链协同发展、推动 5G-ATG 规模化商用部署具有重要意义。

4.3. CTSO

2022 年，中国民航局航空器适航审定司组织开展 5G-ATG 机载设备标准的制定工作，中国移动、中兴等积极参与，于 2024 年 1 月 16 日发布了中国民用航空技术标准规定《面向航空器后舱互联网应用的 5G 空地宽带通信网络机载设备》（CTSO-2C610）草案，并公开征询意见。草案中规定了机载空地宽带终端、机载有源阵列天线、机载功放单元的技术指标和测试方法，并以附件形式给出，包括《附录 1 机载空地宽带终端的最低性能标准》、《附录 2 机载有源阵列天线的

最低性能标准》、《附录 3 机载功放单元的最低性能标准》、《附录 4 机载 CPE、UPA 和有源阵列天线的测试方法》4 个部分。同时，草案中明确“面向航空器后舱互联网应用的 5G 空地宽带网络机载设备”的适航安全等级为 E 级，即功能丧失为无安全影响失效状态。

该标准是我国民航领域首个针对 5G-ATG 机载设备的适航规范，旨在规范后舱互联网应用的机载设备性能及测试方法，标志着我国 5G 航空通信进入规范化阶段，对于推动 5G 航空互联网的商用化发展有重要价值。

5. 5G 地空通信航线试验进展

在国内，中国移动、中国电信积极推动 5G-ATG 相关技术及产业发展。中国移动联合通信设备商、航电厂商等产业伙伴，已完成 5G-ATG 端到端设备研发，并基于商飞 C909 机型取得 TC/SB 的适航取证。2025 年 1 月，工信部独家批复中国移动开展 5G 地空通信技术试验使用频率的申请，许可中国移动使用 4840-4900MHz 频段开展技术性能及与其他无线电业务的频率兼容测验证。

基于此，中国移动完成覆盖“成都-敦煌-吐鲁番”西部航线的 5G-ATG 试验网建设，涉及四川、青海、甘肃、新疆四省份。期间经多次航线覆盖优化目前网络性能已接近最优，在覆盖方面平均 RSRP 为 -107dBm、SINR 约为 9.8dB，优化前后的对比如下图 11 所示。依托西部航线，实际飞行测试上/下行峰值速率可达 73/353Mbps、平均时延 129ms，全程网络切换成功率为 100%。

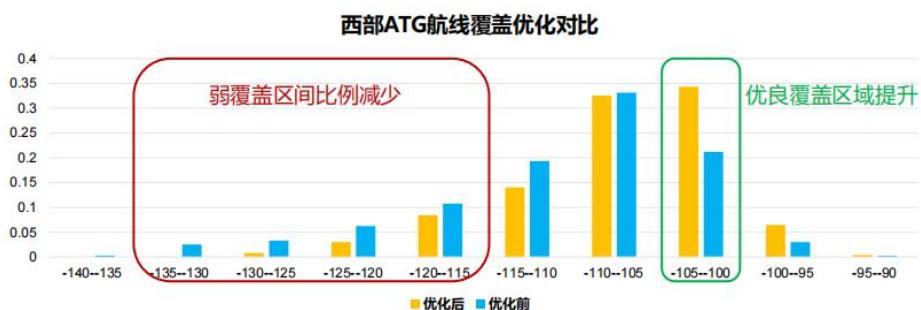


图 11 中国移动 5G-ATG 试验网覆盖优化前后对比

自 2025 年 2 月到 2025 年 7 月，中国移动先后组织 4 次飞行测试，并邀请中国商飞、成都航空、南方航空、空客等客户参加体验，得到客户的高度评价。其中，体验内容包括微信即时通信、4K 高清直播、大规模视频会议、在线游戏（如王者荣耀）等热点业务，整个飞行过程中业务体验流畅，使用体感与地面网络基本一致。

6. 总结与展望

本白皮书全面剖析了航空互联网发展的内在需求及演进趋势，结合地空通信面临的关键挑战，重点阐述了中国移动在端到端技术体系、关键攻关及试验验证方面取得的突破性进展，并对当前标准化及产业生态进展进行了总结。中国移动坚持 ATG 与机载卫星通信“两条腿走路”的战略路径，近期将依托国产大飞机战略机遇，充分发挥 5G-ATG 技术和成本优势，加快推进 ATG 在国内航线市场的商用落地；中长期将同步构建机载卫星通信能力，形成可服务于国内外市场、全球领先的航空互联网服务能力。

展望未来，地空通信将成为 6G 空天地一体化网络的重要组成部分。ATG 将与地面蜂窝网络、卫星互联网在技术、标准、设备形态等方面实现渐进式融合发展，构筑一体协同的陆基与星基网络系统，实现全球三维空间内“随时、随地、随需”泛在连接的美好愿望。

最后，5G-ATG 是横跨通信、航空、制造等多领域的平台型产业，需产业链各方协同共进，谋求共赢发展。对此中国移动愿与产业伙伴携手，持续完善技术标准与适航认证体系，共同探索可持续的商业模式与创新应用场景，推动我国航空互联网产业高质量发展。