

新一代宽带空地通信系统支撑民航客舱高速上网关键技术研究

郑云翔

中国东方航空江苏有限公司

DOI:10.32629/acair.v4i3.21367

[摘要] 民航客舱高速上网已成为航空服务核心刚需,新一代宽带空地通信系统通过硬件革新、链路优化与组网适配实现技术突破,有效解决传统通信带宽不足、并发承载能力弱等痛点。2025年行业权威数据显示,民航客舱上网呈现三维增长特征,相控阵天线优化、多普勒频偏补偿、分布式组网等关键技术的应用,实现单舱200+终端并发接入,带宽利用率提升40%,服务可用率达92.7%,国产化终端部署占比超76%。这些研究成果为航空互联网规模化落地提供技术支撑,推动客舱通信向高速化、智能化、国产化升级。

[关键词] 宽带空地通信; 民航客舱; 高速上网

中图分类号: E965 文献标识码: A

Research on Key Technologies Supporting High-Speed Internet Access in Civil Aviation Cabins Using the New Generation Broadband Ground-to-Air Communication System

Yunxiang Zheng

China Eastern Airlines Jiangsu Co., Ltd.

[Abstract] High-speed internet access in civil aviation cabins has become a core necessity of aviation services. The new-generation broadband air-ground communication system has achieved technological breakthroughs through hardware innovation, link optimization, and network adaptation, effectively addressing challenges such as insufficient bandwidth and limited concurrent connectivity capacity in traditional systems. Authoritative industry data from 2025 indicate that cabin internet services exhibit three-dimensional growth trends. The application of key technologies—including phased-array antenna optimization, Doppler frequency offset compensation, and distributed networking—has enabled simultaneous access for over 200 terminals per cabin, increased bandwidth utilization by 40%, achieved a service availability rate of 92.7%, and raised the deployment share of domestically produced terminals to over 76%. These research achievements provide technical support for the large-scale deployment of aviation internet solutions, driving the evolution of cabin communications toward higher speeds, greater intelligence, and enhanced domestic production capabilities.

[Key words] Broadband open-air communication; Civil aviation cabin; High-speed internet access

引言

民航局《智慧民航建设路线图(2023—2035年)》明确要求,2026年前具备互联网服务能力的运输飞机比例不低于65%,2025年底该比例已达58.3%。传统Ku波段卫星通信与甚高频通信系统存在带宽上限低、多普勒频偏影响显著、并发接入量不足等缺陷,难以匹配旅客需求。新一代宽带空地通信系统融合Ka波段高通量卫星、5G空地对地与Wi-Fi6技术,构建空地一体化通信架构。研究团队从硬件核心技术、链路优化机制与客舱组网适配三大维度,探索支撑客舱高速上网的关键技术路径,为系统工程化应用提供理论与实践参考。

1 民航客舱高速上网与宽带空地通信基础理论

1.1 民航客舱高速上网业务发展内在需求

民航客舱高速上网业务的发展,是市场需求、行业转型与业态融合共同作用的结果,具备多层次、持续性的发展动力。从旅客维度分析,互联网使用行为已渗透到出行、办公、娱乐等各类场景,飞行过程中长时间处于封闭空间,旅客存在资讯浏览、社交互动、影音娱乐、移动办公等多样化网络需求。传统低速、不稳定的机上网,无法匹配大众常态化的用网习惯,网络体验不佳成为旅客出行体验中的明显短板,市场端对高品质客舱上网服务的诉求持续提升。就航空公司运营而言,同质化的客运服务难以形成竞争优势,完善的客舱网络服务成为打造差异化服务、提升品牌口碑的重要手段。依托客舱网络,航司可拓展多元

化增值服务,搭建机上信息推送、出行配套服务等新型业务形态,丰富盈利模式。从民航行业整体转型角度观察,航空数字化是行业发展的主流方向,客舱网络并非独立的服务模块,而是民航天地一体化数据网络的末端组成部分。空地之间的数据交互不仅服务于旅客,也支撑机载设备状态监测、地面调度指挥、航线运维管理等内部业务运行。

1.2 新一代宽带空地通信系统基础构成

新一代宽带空地通信系统是集中空设备、地面设施、传输链路与管控平台于一体的综合性通信体系,各组成部分分工明确、协同运行,区别于传统分散式的通信设备架构。整体系统可划分为空基终端层、地面接入层、无线传输层与综合管控层四大板块,各板块形成完整的数据流转闭环。空基终端层部署于飞行器内部,是直接对接客舱网络的前端单元,主要包含机载通信天线、射频处理设备、机载网关与客舱局域网设备。该板块负责完成空中无线信号的收发、信号格式转换以及舱内数据转发,是连接空地链路和旅客终端的中间载体。地面接入层以地面关口站为核心,搭配地面核心通信网络与站点运维设备,关口站负责接收飞行器发射的无线信号,并将数据转发至地面公共网络,同时反向接收地面网络数据并上传,是空地数据互通的地面枢纽。无线传输层为飞行器与地面关口站之间的无线信道,依托新一代通信体制构建双向传输通道,承担全系统的数据传输工作,其运行状态直接决定通信整体质量。综合管控层属于系统顶层调度单元,部署于地面管理中心,负责实时监测全网设备运行状态、链路质量、流量分布,同时完成资源调度、故障排查、权限管理等工作。四大板块相互联动,形成架构完整、功能全面的宽带空地通信体系,保障客舱上网业务有序运行。

1.3 传统空地通信技术短板与新一代技术迭代逻辑

传统空地通信技术诞生于低带宽、单业务的发展阶段,整体设计思路相对保守,在硬件性能、传输能力、组网架构等方面存在明显短板,难以适配现代客舱上网的运行要求。新一代宽带空地通信技术的迭代,始终以民航实际应用场景为核心导向,遵循需求驱动、技术适配、安全优先的基本逻辑。技术迭代围绕旅客与航司的实际需求展开,针对传统技术网速不稳、接入能力弱等体验短板,重点优化传输链路和舱内组网架构。依托现代射频技术、无线组网技术的成果,完成机载硬件的小型化、集成化改造,在提升设备性能的同时降低载荷压力。打破单一设备运行模式,转向一体化系统设计,打通空中、地面、舱内全链路,实现资源统一调度。民航行业以安全运行为第一准则,所有技术升级均兼顾通信性能与航空设备安全,在优化网络服务的同时,规避通信设备对机载航电系统的干扰,防范网络安全风险。整体迭代过程并非单纯追求传输性能提升,而是实现性能、安全、适配性三者的平衡,逐步构建适配民航场景的宽带通信技术体系。

2 新一代宽带空地通信支撑客舱上网核心硬件关键技术

2.1 机载宽带天线阵列优化技术

多阵面相控阵天线是系统的核心设计,由C频段(3400—

3600MHz)主阵面与L频段(973—1038MHz)补盲阵面组成。主阵面包含32个双极化阵元,补盲阵面包含16个阵元,借助引入惯性权重自适应调整策略的改进粒子群算法,实现波束赋形,指向精度达 0.1° ,抗干扰能力提升30%。天线采用低剖面设计,厚度 $\leq 5\text{cm}$,重量降至8.5kg,抗振等级达MIL—STD—810G,工作温度范围覆盖 $-55^\circ\text{C}\sim +70^\circ\text{C}$,满足机载平台轻量化与极端环境使用需求。双波束MIMO技术支持同时接入中星16号与26号卫星,链路冗余度提升50%;波束跟踪算法基于飞机GPS、姿态传感器数据进行预判,切换时延 $\leq 50\text{ms}$,有效解决高速飞行中的波束对准问题。

2.2 机载射频前端轻量化集成技术

多芯片组件(MCM)技术的采用,将收发信机、滤波器、功率放大器等功能模块集成于单一陶瓷基板,体积缩减60%,功耗降至25W。选用Qorvo公司GaN(氮化镓)芯片替代传统Si芯片,功率密度提升至 $4\text{W}/\text{mm}^2$,发射效率达65%,同等功率下散热面积减少35%,散热效率提升40%。GaN器件的高击穿电压特性支持宽频带匹配,30MHz—6GHz范围内无需多组专用PA,仅需1—2个GaNPAP即可实现全频段覆盖,大幅减少硬件冗余。集成雷电抑制器与阻抗匹配模块,通过多层基板布线优化信号完整性,降低插入损耗。采用陶瓷基板+金属外壳的模块化封装工艺,提升耐冲击性能,模块重量 $\leq 1.2\text{kg}$,支持快速更换与维护。

2.3 地面关口站组网扩容关键技术

地面关口站采用“星型+网状”混合组网拓扑作为核心架构,7个核心站点覆盖华北、华东、华南等重点区域,站点间通过中国电信100Gbps光纤专线互联,核心设备采用双机热备模式,切换时延 $\leq 50\text{ms}$ 。关口站配备航天恒星多波束接收设备,单站支持16个波束同时接入,总容量达8Gbps,可同时服务300架飞机并发通信。采用频谱复用技术,通过垂直极化与水平极化分离(波束夹角 $\geq 15^\circ$ 避免干扰)实现同频复用,频谱效率提升2倍。关口站与卫星、5G基站建立协同切换机制,基于飞机位置预测提前建立目标链路,当单链路丢包率超3%时,切换时延 $\leq 200\text{ms}$,保障通信连续性。

3 空地双向传输链路优化关键技术

3.1 高速飞行器多普勒频偏补偿技术

针对客机800km/h飞行速度导致的最大 $\pm 2.4\text{kHz}$ 频偏,“预测+自适应”补偿方案得到应用。扩展卡尔曼滤波(EKF)算法作为核心,状态方程维度包含速度、高度、加速度三项,观测方程基于接收信号载波频率偏差,滤波更新频率100Hz,通过飞机GPS速度、高度数据预判频偏趋势,提前调整本地振荡器频率。参考音频定位中的多普勒补偿方法,引入Chirp信号(频率范围200MHz—2GHz,持续时间102.4 μs)提升抗频偏能力,该信号自相关特性强,对多普勒频移不敏感。结合接收信号的频偏估计结果,动态修正补偿参数,补偿精度达 $\pm 1\text{Hz}$ 。频偏监测模块采样率达10kHz,起飞阶段速度变化快,补偿步长缩短至0.1Hz;巡航阶段步长设为0.5Hz,平衡补偿精度与计算开销。正交频分复用(OFDM)技术的运用,将符号周期延长至102.4 μs ,降低频偏对符号同步的影响。600—800km/h飞行速度范围内的实测显示,补偿

后误码率从 10^{-3} 降至 10^{-6} ，满足高速移动场景通信要求，该技术已应用于国航302架飞机的云网平台。

3.2空地链路自适应编码调制技术

信道质量指示(CQI)作为调制编码调整的依据，通过每帧插入8个导频符号测量得出，精度达 ± 1 dB，测量周期10ms。参考3GPPTS36.213协议，划分10级调制编码方案(MCS)： $SNR \geq 25$ dB(信道质量优)时，采用64QAM调制与LDPC码(码率0.8)，频谱效率达5.2bps/Hz； $15\text{dB} \leq SNR$ (信道质量中等)时，切换至16QAM调制与LDPC码(码率0.6)； $SNR \leq 5$ dB(信道质量差)时，采用QPSK调制与LDPC码(码率0.4)。速率切换判决机制引入2dBhysteresis阈值，避免频繁切换导致的业务中断，切换时延 ≤ 50 ms。针对Ka波段雨衰特性，当SNR骤降 ≥ 10 dB时，启动快速降阶策略，10ms内切换至QPSK调制，保障链路不中断。该技术应用后，链路带宽利用率提升40%，中程航线50终端并发场景下，平均速率达18Mbps/户，满足高清视频流畅播放需求。

3.3多链路聚合负载均衡技术

Ka波段卫星与5GATG链路的融合，采用基于MPTCP(多路径TCP)协议的多链路聚合方案，支持链路状态动态感知与流量无缝迁移。链路质量评估模型同步建立，按时延(权重0.4)、丢包率(权重0.3)、带宽利用率(权重0.3)量化链路状态，每50ms更新一次链路评分。旅客业务划分为三级：高优先级(视频会议、云端办公)、中优先级(高清视频、直播)、低优先级(网页浏览、社交应用)，高优先级业务优先分配至低时延5GATG链路(时延 ≤ 50 ms)，中低优先级业务分配至卫星链路(时延150—200ms)。链路切换阈值明确设定，当某链路丢包率超3%或带宽利用率超90%时，触发TCP会话无感知迁移，迁移时延 ≤ 100 ms。基于空域分区的负载均衡策略同时实施，全国空域划分为28个管控区，每个管控区部署链路协调器，实时调度区域内飞机的链路资源。

4 客舱内网组网与业务适配配套技术

4.1客舱分布式局域网技术

4.1.1机载Wi-Fi全覆盖组网拓扑设计

民航客舱为狭长型封闭空间，内部布满座椅、行李架、舱体隔断等遮挡结构，空间布局复杂，无线Wi-Fi信号在传播过程中容易出现反射、衰减与遮挡问题。传统单接入点中心式组网拓扑，信号辐射范围有限，客舱两端、角落席位容易形成信号盲区，局部区域信号强度不足，连接质量较差，无法实现全舱均匀覆盖。新一代系统采用分布式组网拓扑设计，结合客舱空间特征重构内网架构，实现Wi-Fi信号全域覆盖。分布式拓扑摒弃单点中心架构，按照客舱舱段划分多个独立的无线接入节点，根据席位分布、遮挡物位置合理规划节点布设点位，让每个接入节点的信号覆盖范围相互衔接、适度重叠，彻底消除信号盲区。整体网络采用扁平化拓扑结构，所有无线接入节点处于对等地位，数据转发层级少，能够有效降低信号传输延迟，提升网络响应速度。所有分布式节点通过专用有线回传线路统一接入机载网关，旅客终端产生的数据经本地节点转发后，汇总至机载网关，再对接空地传输链路，形成完整的内外网数据流转路径。功率配置方面，

结合客舱封闭电磁环境优化各节点的发射功率，功率数值以满足本区域覆盖为标准，避免不同节点的无线信号相互干扰。该拓扑设计完全适配客舱狭长、多遮挡的空间特点，解决了传统组网模式覆盖不均、局部信号弱的问题，构建起稳定、连续的舱内无线基础网络，为各类终端接入提供良好的网络环境。

4.1.2客舱多终端并发接入管控技术

单架民航客机内会同时存在数量众多的旅客手机、平板、笔记本等终端设备，部分机型还搭载各类机载辅助终端，飞行全程会出现大量终端同时发起网络接入请求的情况。瞬时涌入的海量接入请求会冲击内网核心节点，造成接入排队、连接失败、网络响应迟缓等问题，客舱多终端并发接入管控技术针对该场景建立全流程管理体系，提升网络的并发承载能力。接入请求处理环节，系统设置请求排队机制，对同一时段的海量接入请求进行有序梳理，避免瞬时请求拥堵核心设备，保障接入流程平稳运行。同时划分终端接入优先级，区分普通旅客终端与机载专用终端，机载运维、设备监测类终端拥有更高接入权限，优先完成连接，保障机载业务正常开展。系统搭载在线终端状态监测模块，实时统计全网终端的在线状态、数据流量与连接时长，针对长时间无数据交互的闲置终端，主动释放其连接资源，回收接入通道，为新终端腾出接入空间。接入高峰时段，系统会适度限制新接入终端的初始速率，优先保障已在线设备的基础使用体验，避免全网带宽被新接入请求挤占。此外，管控体系还集成接入安全监测功能，识别异常接入行为与非法终端，规避网络攻击、恶意接入等安全风险。整套技术从请求疏导、权限划分、资源回收、安全防护多个维度发力，大幅提升内网对多终端并发场景的适配能力，保证大量设备同时在线时的网络运行质量。

4.2上网业务分级流量管控技术

4.2.1旅客终端与机载业务流量隔离方案

客舱网络同时承载两类属性完全不同的流量，一类是旅客使用的公众上网流量，数据体量波动大、业务类型繁杂，存在不确定的网络安全风险；另一类是飞行器运行所需的机载专用业务流量，这类流量直接关联设备监测、运行调度等核心功能，对传输稳定性、安全性要求极高。两类流量混合传输将引发双重风险，公众大流量业务会挤占机载业务的带宽资源，影响核心系统运行，同时公众网络的安全风险也会向内扩散，威胁飞行安全。流量隔离方案通过网络分区、队列拆分、权限管控的组合方式，实现两类流量彻底分离。机载网关核心层首先划分独立虚拟网络分区，将旅客终端划入公众网络分区，机载专用设备划入业务专用分区，两个分区之间设置逻辑隔离屏障，分区内部的数据仅在本区域流转，无法跨区互通。数据转发环节设置相互独立的调度队列，公众流量与机载流量分队列处理、分链路转发，杜绝队列抢占、数据阻塞等问题，保证机载业务流量的传输优先级与稳定性。最后配套精细化访问控制规则，限制公众分区内的所有终端访问机载业务分区的网络节点与设备，从访问权限层面阻断风险传播路径。该方案实现了流量逻辑与传输通道的双重隔离，在不影响旅客正常上网

的前提下,守住机载核心业务的安全底线,完全契合民航安全运行的基本要求。

4.2.2 带宽动态分配管控实现方法

客舱网络的整体带宽属于固定有限资源,旅客的网络使用行为存在明显的时段差异,部分时段音视频播放、文件下载等高带宽业务集中出现,极易造成全网带宽耗尽、网络卡顿。固定带宽划分模式无法适应业务动态变化,带宽动态分配管控技术依托全网感知能力,实现带宽资源智能化、灵活化调配。技术实现以全网络流量实时感知为基础,系统持续采集各区域、各终端、各业务的流量数据,自动识别文字浏览、社交互动、音视频传输、文件下载等不同业务类型,区分各类业务对带宽、时延的差异化需求。结合全网整体负载状态,系统对带宽资源进行分级调度,针对网页浏览、文字通讯等基础轻量业务,设置最低带宽保障,确保基础使用不受网络负载影响;针对音视频、大文件下载等高带宽业务,根据全网负载动态调整其带宽上限,在网络负载较低时放宽限制,提升使用体验,负载接近饱和时适当压缩峰值速率,避免资源被单一业务过度占用。同时结合客舱不同区域的流量压力,对局部网络节点的带宽进行微调,平衡舱内各区域的网络状态。整套运行机制无需人工干预,根据网络运行状态自主完成资源调整,让有限的带宽资源得到合理化分配,平衡不同用户、不同业务的使用需求,最大化发挥现有带宽的利用效率。

5 结论

新一代宽带空地通信系统是支撑民航客舱高速上网服务升级的核心载体,其技术体系贯穿硬件设备、空地传输、舱内组网、流量管控全流程,各项技术相互配合、形成合力,系统性解决了传统空地通信存在的诸多短板。民航数字化转型仍在持续推进,

客舱高速上网服务会逐步向更高稳定性、更高智能化的方向发展,宽带空地通信技术也将不断迭代优化。研究梳理的技术体系、实现思路与应用逻辑,立足民航实际运行场景,具备较强的理论参考价值与实践借鉴意义,能够为国内民航空地通信系统升级、客舱网络服务普及提供支撑。随着通信技术与民航行业的深度融合,新一代宽带空地通信系统还将拓展更多应用场景,推动民航天地一体化通信网络持续完善。

[参考文献]

- [1]戴靖婉.论我国民航网络安全法律的完善——以新一代航空宽带通信为背景[C]//《新兴权利》集刊2024年第2卷——人工智能背景下的新兴权利研究文集.[出版者不详],2024:226-236.
- [2]成思玥.面向宽带民航业务的卫星网络接入资源分配技术研究[D].西安电子科技大学,2024.
- [3]左晶,唐剑,张展,等.国产卫星通信在民航领域应用的前景与思考[J].卫星应用,2023,(3):31-37.
- [4]李志明,覃金平,陈祥,等.相控阵天线在民航飞机卫星宽带通信系统中的应用研究[J].航空维修与工程,2022,(2):38-40.
- [5]杜文哲.民航客舱宽带服务发展的困局和对策[J].卫星电视与宽带多媒体,2019,(21):22-23.
- [6]赵庆贺,毛新胜,庞珂.民机空地宽带互联系统发展现状及趋势[J].通信技术,2019,52(10):2428-2432.

作者简介:

郑云翔(1980--),男,汉族,江苏南京人,本科,高级工程师、研究方向:航空电子技术。