

航空电子通信系统及关键技术

徐一帆 孙楠 米守波
西安爱生技术集团有限公司 陕西 西安 710065

摘要：本文围绕航空电子通信系统及关键技术展开研究，阐述系统定义、组成架构、分类应用及性能指标，重点分析数据链、卫星、抗干扰、IMA四大核心技术的原理、应用及突破。指出当前系统在技术、产业、标准层面的现存问题，提出针对性优化策略及预期效果，展望空天地一体化、智能化、国产化的发展趋势，为航空电子通信系统的技术升级、产业发展及自主可控提供理论与实践参考。

关键词：航空电子；通信系统；关键技术

引言：航空电子通信系统是保障飞行安全、提升运行效率的核心基础设施，贯穿飞行全流程，支撑空地、空空及机内多场景信息交互。随着智慧民航建设推进及军民航空需求升级，传统通信技术已难以满足高速率、高可靠、抗干扰的发展需求。本文立足行业现状，梳理系统核心构成与关键技术，剖析现存瓶颈并给出优化路径，助力推动航空电子通信技术迭代，支撑我国航空产业高质量发展。

1 航空电子通信系统概述

1.1 航空电子通信系统的定义与核心功能

(1) 定义：航空电子通信系统是航空电子系统的核心组成部分，是利用电气与电子技术实现飞机与地面、飞机与飞机、机组内部及飞行控制系统之间实时信息交换的系统集合，是保障飞行安全、提升运行效率的关键基础设施。(2) 核心功能：包括空地/空空通信、导航定位、飞行监视、数据传输、机内协同通信五大核心功能，覆盖飞行全流程，支撑空中交通管制、航班运行控制、机务维修数据回传等多场景应用。

1.2 航空电子通信系统的组成架构

(1) 硬件组成：包括机载通信终端（甚高频电台、高频电台、卫星通信终端）、地面通信站、天线设备、核心处理模块（CPIOM）、远程数据集中器（RDC）等，其中机载硬件在2025年全球航空通信市场中占比约40%。(2) 软件组成：涵盖通信协议（ARINC429、

ARINC664、TCP/IP等）、数据处理软件、抗干扰软件、监控管理软件，支撑系统各硬件模块的协同运行与功能实现^[1]。(3) 系统架构演变：从传统联合式架构（如空客A320，采用ARINC429总线，最大传输速率100Kbps），逐步升级为IMA综合化架构（如波音787、C919）、开放式IMA架构（如空客A380，采用AFDX总线，最大速率100Mbps）及分布式IMA架构（如空客A350）。

1.3 航空电子通信系统的分类与应用场景

(1) 分类：按通信范围可分为空地通信、空空通信、机内通信；按技术类型可分为无线电通信、卫星通信、数据链通信；按应用领域可分为民用航空通信、军用航空通信、通用航空通信。(2) 应用场景：民用航空中用于航班调度、气象数据传输、旅客机载互联；军用航空中用于战术指令传输、目标识别与跟踪；通用航空中用于无人机巡检、私人飞机导航，其中机载宽带互联需求近年来呈现爆发式增长。

1.4 航空电子通信系统的性能指标

(1) 核心性能指标：包括传输速率（L波段数字航空通信系统较传统甚高频数据链提升10倍以上）、通信延迟（民用航空通信延迟需 $\leq 100\text{ms}$ ，军用航空需 $\leq 50\text{ms}$ ）、抗干扰能力、可靠性（平均无故障工作时间 ≥ 2000 小时）、覆盖范围。(2) 指标对比图表：

通信类型	传输速率	通信延迟	覆盖范围	应用场景
甚高频（VHF）通信	$\leq 100\text{Kbps}$	50-100ms	短中程（ $\leq 300\text{km}$ ）	民用航班近程调度
卫星通信（Ka/Ku波段）	百Mbps级	200-500ms	全球覆盖	远程航班、旅客互联
L波段数字通信	$\geq 1\text{Mbps}$	$\leq 80\text{ms}$	区域覆盖	下一代空管通信
军用数据链通信	$\geq 10\text{Mbps}$	$\leq 50\text{ms}$	中远程（ $\leq 1000\text{km}$ ）	战术指令传输

图表说明：该表对比了不同类型航空电子通信的核心性能指标及应用场景，清晰呈现各类通信技术的优势与适用范围，数据来源于中研普华2026年航空通信行业报告及行业实测数据。

2 航空电子通信系统关键技术

2.1 数据链通信技术

(1) 技术原理：以数字方式替代传统语音指令，通过标准化协议实现航空设备与地面、其他航空器之间的精准数据交换，是现代航空通信的核心支撑技术。其核心是将飞行参数、管制指令、气象信息等转化为数字信号，依托专用通信链路实现高效传输，摆脱传统语音通信的模糊性和低效性，为航电系统高效运行提供基础。

(2) 核心类型与应用：包括ACARS飞机通信寻址与报告系统、CPDLC管制员—飞行员数据链通信。其中ACARS可实现飞行计划、气象数据、飞机状态参数的自动传输，无需人工干预，目前全球80%以上的民用航班已配备ACARS系统，广泛应用于航班日常运营监控；CPDLC通过数字化指令替代语音沟通，可减少语音通信误差，提升空管效率，已在海南空管等场景完成全阶段数字化管制测试验证^[2]。(3) 技术难点与突破：难点在于多设备协同兼容与复杂飞行环境下的数据传输稳定性。目前通过采用ARINC664协议（含AFDX以太网标准），实现了数据链与机载设备的高效兼容，解决了多节点时序同步问题，使传输可靠性提升至99.9%以上，已应用于波音787、空客A380等主流机型。

2.2 卫星通信技术

(1) 技术原理：利用卫星作为中继站，实现飞机与地面的远距离、大范围通信，突破传统地面通信的覆盖局限，是远程航空通信的核心技术。其通过机载卫星终端接收和发送信号，借助卫星星座实现全球范围内的信号覆盖，尤其适用于跨洋、偏远地区等地面通信盲区的航班通信。(2) 关键技术要点：包括卫星星座部署、机载卫星终端小型化、信号调制解调技术。其中低轨卫星星座的规模化部署使全球无盲区宽带通信成为可能，SpaceX星链已实现机载互联带宽百Mbps级突破，亚马逊Leo系统更是推出千兆级机载天线，进一步提升通信速率；机载终端小型化则降低了设备对机身空间和载重的占用，提升了适配性。(3) 应用数据与进展：2025年全球卫星通信服务在航空通信市场中占比约35%，呈稳步上升趋势。我国北斗星基增强系统（含“吉星”卫星）已获国际民航组织认可，为亚太地区航班提供高精度定位服务，其短报文通信功能实现升级，可发送千字符信息，为通用航空提供了可靠的应急通信手段^[3]。

2.3 抗干扰通信技术

(1) 技术背景：航空电子通信面临复杂电磁环境，VHF、L等频段资源稀缺，各类电磁干扰问题日益突出，抗干扰能力直接决定飞行安全，尤其是军用航空和偏远

地区民用航空，对通信抗干扰性要求更为严苛。(2) 核心技术类型：包括频率跳变、直接序列扩频、正交频分复用（OFDM）、自适应波束成形技术。其中自适应波束成形技术可通过算法调节信号波束方向，滤除杂波干扰，使通信抗干扰能力提升30%以上，柯林斯宇航的DIGAR系列接收机就采用该技术，支持多波束抗干扰；频率跳变技术则通过快速切换通信频率，躲避干扰信号^[4]。(3) 技术应用效果：采用抗干扰技术后，机载通信系统在复杂电磁环境下的误码率可降至 10^{-6} 以下，满足民用航空与军用航空的高可靠性需求。目前柯林斯宇航、霍尼韦尔等企业的抗干扰设备已广泛应用于主流机型，美军E-2D预警机也通过相关技术提升了低空目标探测中的抗干扰能力。

2.4 综合模块化航空电子（IMA）技术

(1) 技术定义：通过共享硬件和软件资源，构建灵活可重用的航电平台，实现航电系统的高度集成，是现代航电架构的核心技术。其打破了传统航电系统各设备独立运行的模式，将导航、通信、监控等功能集成于统一平台，提升系统协同效率。(2) 技术优势与演进：相较于传统联合式架构，IMA架构可减少航电系统重量30%以上、功耗25%以上，降低维护成本40%，大幅提升飞机续航能力和运营效益。其演进历程从封闭式IMA（如波音777AIMS系统），逐步发展至开放式IMA（空客A380）、分布式IMA（空客A350），系统灵活性与可扩展性不断提升，适配不同机型需求^[5]。(3) 国内应用现状：我国C919大飞机采用IMA架构，核心处理模块实现部分国产化，中航机载自主研发的IMA系统处理性能较前代提升3倍，核心软件包自研率达70%。目前国产IMA设备的适航认证通过率已达85%，计划2026年完成适航取证并批量替换，逐步打破国外技术垄断，推动我国大飞机航电系统自主可控。

3 航空电子通信系统的现存问题与优化策略

3.1 现存核心问题

(1) 技术层面：高端核心芯片、核心协议仍依赖进口，国产化设备的稳定性与国际先进水平存在差距；抗干扰技术在复杂电磁环境下的适配性不足，部分场景存在通信延迟超标问题。(2) 产业层面：机载通信设备适航认证门槛高、周期长，一项新技术从原型到获证需2-3年，成本高达数百万美元；中小企业参与度低，产业链协同性不足。(3) 标准与资源层面：全球航空通信标准统一与区域部署进度不协调，国际频谱分配周期漫长，难以跟上技术迭代节奏；VHF、Ku/Ka等频段资源稀缺，频谱拥塞问题日益突出。

3.2 针对性优化策略

(1) 技术优化: 加大核心芯片、核心协议的研发投入, 推动北斗+5G融合应用, 开发轻量化、低成本的抗干扰设备, 提升国产化设备的稳定性与适配性; 优化IMA架构设计, 降低系统集成难度。(2) 产业优化: 完善适航认证体系, 简化认证流程, 降低认证成本, 鼓励中小企业参与核心技术研发; 加强产业链协同, 推动国产设备与国产大飞机、通用航空机型的适配应用。(3) 标准与资源优化: 积极参与国际航空通信标准制定, 推动北斗相关标准成为国际标准; 加强频谱资源统筹规划, 研发频谱高效利用技术, 缓解频谱拥塞问题。

3.3 优化效果验证

(1) 验证方法: 通过实验室仿真与真机测试相结合的方式, 对比优化前后系统的传输速率、抗干扰能力、可靠性等核心指标。(2) 预期效果: 优化后, 国产核心设备的市场占有率可提升至40%以上, 系统抗干扰能力提升30%, 通信延迟控制在50-80ms以内, 适航认证周期缩短至1.5年以内, 满足智慧民航建设需求。

4 航空电子通信系统的发展趋势展望

4.1 技术发展趋势

(1) 空天地一体化网络成为终极架构: 低轨卫星与地面5G/6G网络无缝切换, 实现全程不掉线连续覆盖, 预计到2028年, 全球主要航司的宽体机队将普遍配备高通量卫星通信终端。(2) 智能化与自主化升级: 引入人工智能、大数据技术, 实现通信系统的自主故障诊断、自适应抗干扰、自动频谱分配, 降低机组工作负荷, 推动单pilot操作与全自主飞行发展。(3) 国产化与标准化融合: 国产航空电子通信设备逐步实现全面替代, 北斗+5G融合应用成为中国特色方案, 推动国产技术标准与国际标准接轨, 提升我国在全球航空通信治理中的话语权。

4.2 产业发展趋势

(1) 市场规模持续增长: 预计2030年全球航空通信行业市场规模将突破500亿美元, 中国市场规模将突破800亿元人民币, 年复合增长率维持在12%以上。(2) 商

业模式创新: 从传统设备销售向“设备+服务”打包模式转型, 连接服务订阅和按流量计费成为新的增长引擎, 航空公司逐步转向按飞行架次或飞行小时支付通信服务费。(3) 产业链协同深化: 形成“研发-生产-适航-应用”完整产业链, 中小企业与龙头企业协同发展, 推动核心技术的快速迭代与产业化应用。

4.3 未来研究方向

(1) 新型抗干扰技术研发: 聚焦极端电磁环境下的抗干扰通信技术, 提升系统的抗毁性与可靠性, 满足军用航空与深空探测需求。(2) 空天地一体化网络融合技术: 研究低轨卫星与5G/6G、地面通信站的无缝融合技术, 解决网络切换延迟与兼容性问题。(3) 轻量化、低成本通信设备研发: 适配通用航空、无人机等新业态需求, 开发小型化、低成本的机载通信终端, 扩大应用场景。

结束语

航空电子通信系统的发展与航空产业升级、国家科技实力提升深度绑定, 其技术水平直接决定飞行安全与运行效能。本文系统梳理了该系统的核心内容、关键技术、现存问题及发展趋势, 明确了技术优化与产业协同的重要性。未来需持续加大核心技术研发投入, 推动国产化替代与标准融合, 破解产业瓶颈, 助力空天地一体化通信体系构建, 为航空事业可持续发展注入持久动力。

参考文献

- [1]郭玲.航空电子通信系统关键技术问题的浅析[J].电子测试,2022,9(7):128-129.
- [2]张明璐.基于DSP的航空电子通信系统研究[J].中国信息化,2023,12(3):77-80.
- [3]唐珺.航空电子通信系统关键技术问题浅析[J].科技传播,2022,9(19):43-47.
- [4]段超,李晓敏.航空电子通信系统关键技术问题的浅析[J].电子制作,2023,34(11):148-150.
- [5]由君光.航空电子通信系统中的关键技术研究[J].信息通信,2024,16(8):192-194.