

# 航空电子通信系统关键技术问题的浅析

李 会

凌云科技集团有限责任公司 湖北 武汉 430040

**摘 要:** 航空电子通信系统作为航空器信息交互核心, 面临信号传输、网络架构、系统可靠性等多维度技术挑战。本文聚焦信号衰减与失真、复杂电磁干扰、多信道串扰等关键问题, 剖析分布式拓扑优化、异构网络适配、动态带宽分配等架构难题, 探讨冗余设计、故障切换、极端环境保障等可靠性瓶颈。从材料优化、算法创新、架构重构等角度提出解决对策, 涵盖信号调制、认知无线电、软件定义网络等技术路径, 为提升航空电子通信系统性能提供理论支撑与实践参考。

**关键词:** 航空电子通信系统; 信号传输; 抗干扰技术; 网络架构; 系统可靠性

引言: 航空电子通信系统是航空器实现信息交互与任务执行的核心支撑。伴随航空技术不断进步, 高清视频传输、多机协同等新场景对通信系统提出更高要求。然而, 高速数据传输中的信号衰减与失真、复杂电磁环境下的抗干扰难题、多信道并发传输的串扰问题, 以及网络架构优化、异构网络互联、系统可靠性保障等方面的挑战日益凸显。深入剖析这些问题并探寻有效解决策略, 对提升航空电子通信系统性能具有重要意义。

## 1 航空电子通信系统信号传输与抗干扰关键技术问题

### 1.1 高速数据传输中的信号衰减与失真问题

航空电子通信系统对数据传输速率的要求随技术发展持续提升, 尤其在高清视频传输、实时传感器数据交互等场景下, 高速信号在传输过程中面临的衰减与失真问题日益突出。信号衰减主要源于传输介质损耗、连接器接触电阻及电磁辐射能量耗散<sup>[1]</sup>。当数据速率超过吉比特每秒量级时, 传输线缆的趋肤效应会显著增强, 导致高频分量能量快速衰减, 进而引发码间干扰与眼图闭合。失真问题则与信号带宽、介质特性及系统阻抗匹配密切相关, 若传输路径中存在阻抗突变点, 信号反射波与入射波叠加会产生驻波, 使接收端信号波形发生畸变。为缓解此类问题, 需从材料、结构与算法三方面协同优化。例如采用低损耗介质材料降低介质损耗角正切值, 通过优化线缆几何结构控制特性阻抗一致性, 并利用预加重与均衡技术补偿高频分量衰减, 从而在保证传输速率的同时维持信号完整性。

### 1.2 复杂电磁环境下的抗干扰技术瓶颈

航空电子设备工作场景中, 雷达脉冲、通信基站辐射及机载设备间耦合干扰构成复杂电磁环境, 对通信系统稳定性构成严峻挑战。传统抗干扰手段如扩频通信与跳频技术虽能提升抗截获能力, 但在面对高功率窄带干

扰或宽带阻塞式干扰时, 频谱资源利用率与系统容量会显著下降。更严峻的是, 新型电磁武器产生的瞬态强脉冲干扰可在微秒级时间内覆盖全频段, 导致接收机前端器件饱和甚至永久性损伤。当前技术瓶颈集中于干扰识别精度与响应速度的矛盾, 基于特征提取的干扰分类算法需较长时间积累信号样本, 难以满足实时性要求; 而快速傅里叶变换等时频分析方法虽能缩短检测周期, 却在低信噪比条件下易产生误判。突破这一瓶颈需融合机器学习与认知无线电技术, 通过构建动态干扰模型实现干扰特征自主学习与快速匹配。

### 1.3 多信道并发传输的信号串扰抑制问题

为提升通信系统吞吐量, 航空电子设备普遍采用多信道并发传输技术, 但信道间频谱重叠或空间耦合会导致串扰问题。频分复用系统中, 相邻信道滤波器的滚降特性不足会引发频谱泄漏, 使接收端难以分离目标信号与邻道干扰。时分复用系统则可能因时钟同步误差导致时隙重叠, 造成数据帧碰撞。空间域上, 多天线阵列的互耦效应会改变天线辐射方向图, 降低信道隔离度。针对频域串扰, 可采用自适应滤波技术动态调整滤波器系数, 或通过正交频分复用技术将信道划分为正交子载波。时域串扰抑制需优化时钟分配网络设计, 结合全局时钟同步协议确保各节点时间基准一致。空间域串扰则可通过天线去耦网络或波束赋形算法实现, 前者通过添加匹配网络降低天线间互阻抗, 后者利用数字信号处理技术调整各天线单元相位与幅度, 形成具有方向性的合成波束以抑制旁瓣辐射。

## 2 航空电子通信系统网络架构与互联关键技术问题

### 2.1 分布式通信网络的拓扑结构优化问题

航空电子通信系统向分布式架构演进过程中, 拓扑结构设计的合理性直接影响系统可靠性、扩展性与维护

效率<sup>[2]</sup>。传统集中式架构依赖单一核心节点处理全部通信任务,存在单点故障风险且扩展性受限。分布式架构通过将功能分散至多个子节点,利用节点间直接通信降低对中心设备的依赖,但需解决拓扑结构动态调整与路径优化难题。例如,在多机协同或任务设备增减场景下,固定拓扑难以适应节点数量变化,而全连接拓扑虽能提供冗余路径,却会因连接数指数增长导致布线复杂度激增。优化方向包括引入层次化设计,将系统划分为核心层、汇聚层与接入层,通过分层管理简化网络维护;或采用混合拓扑结构,结合星型拓扑的集中控制优势与网状拓扑的冗余特性,在关键链路部署多路径备份以提升容错能力。此外,自组织网络技术可支持节点自主发现与动态组网,通过分布式算法实现拓扑自适应重构,进一步增强系统对环境变化的适应性。

## 2.2 异构通信网络的互联互通适配问题

航空电子设备通常集成多种通信协议与接口标准,如ARINC429、AFDX、CAN总线及以太网等,异构网络间的互联互通成为系统集成关键挑战。不同协议在数据格式、传输速率、时序要求等方面存在差异,直接互联会导致数据解析错误或传输延迟。例如,低速总线设备与高速以太网设备交互时,速率不匹配可能引发数据丢失;而实时性要求严格的协议与非实时协议共存时,时序冲突会破坏系统确定性。解决此类问题需构建中间适配层,通过协议转换网关实现数据格式标准化,或采用软件定义网络技术抽象底层硬件差异,提供统一的应用接口。此外,时间同步机制对异构网络协同至关重要,需通过全局时钟分发或时间戳标记确保各节点时间基准一致,避免因时钟漂移导致的数据错位。

## 2.3 网络带宽动态分配与负载均衡技术问题

航空电子通信任务具有数据流量突发性与优先级差异特征,静态带宽分配难以满足动态负载需求。例如,导航数据更新与娱乐系统流量竞争可能导致关键任务延迟,而固定带宽分配策略则会造成资源浪费。动态带宽分配技术通过实时监测各通道流量需求,按优先级调整资源分配比例,确保高优先级任务优先传输。负载均衡则需解决多路径选择与流量调度问题,避免部分链路过载而其他链路闲置。分布式算法可支持节点自主计算最优路径,结合流量预测模型提前调整分配策略,减少拥塞发生概率。此外,服务质量(QoS)保障机制需与带宽分配协同,通过标记数据包优先级、设置最小带宽阈值等方式,确保关键业务在拥塞场景下仍能维持最低性能要求。

## 3 航空电子通信系统可靠性与容错关键技术问题

### 3.1 通信链路的冗余设计技术难点

航空电子通信系统对链路可靠性要求极高,冗余设计成为保障通信连续性的核心手段,但实际部署中面临多重技术挑战<sup>[3]</sup>。物理层冗余需解决空间布局与电磁兼容问题,若冗余链路布线过于集中,可能因单点故障(如电磁干扰或机械损伤)导致多链路同时失效;而过度分散则增加系统重量与功耗,违背航空设备轻量化设计原则。链路层冗余需平衡切换速度与资源开销,传统热备份方式虽能实现零切换延迟,却会持续消耗双倍带宽资源;冷备份虽节省资源,但故障切换时需重新建立连接,可能引发通信中断。协议层冗余设计则需解决状态同步难题,例如在双链路并行传输时,若两端设备状态不一致,可能导致数据包乱序或重复接收。为突破这些难点,需采用混合冗余策略,结合空间分集与时间分集技术,通过动态调整冗余链路激活比例,在可靠性、资源占用与系统复杂度间寻求最优解。

### 3.2 故障检测与快速切换技术问题

故障检测的准确性与切换速度直接决定系统容错能力,但航空场景的特殊性加剧了技术实现难度。传统基于阈值比较的故障检测方法难以应对渐变故障,例如信号强度缓慢衰减或噪声水平渐进升高,此类故障初期特征不明显,易被误判为环境干扰。机器学习算法虽能提升检测灵敏度,却需大量训练数据支撑,且模型更新滞后可能影响实时性。切换决策机制同样面临挑战,若切换条件设置过于宽松,可能导致频繁误切换;若条件过于严格,则无法及时隔离故障。为优化这一过程,需融合多源信息,将物理层信号质量、链路层协议状态与应用层业务连续性纳入综合评估体系,通过加权评分机制实现故障分级响应。切换执行层面,预配置切换路径与动态路径规划需协同工作,前者可缩短决策时间,后者能应对突发拓扑变化,二者结合可显著提升切换成功率。

### 3.3 极端飞行环境下的通信稳定性保障问题

航空器执行任务时可能遭遇高温、低温、强振动、高湿度等极端环境,对通信设备稳定性构成严峻考验。高温环境会加速电子元件老化,导致晶振频率偏移或电容参数变化,进而引发信号相位噪声增加或调制失真;低温则可能使润滑剂凝固,造成机械连接部件卡滞,影响天线指向精度。强振动环境下,焊点疲劳断裂或电缆微动磨损是常见故障模式,此类故障具有间歇性特征,传统检测方法难以定位。高湿度条件会降低绝缘材料电阻值,增加漏电流风险,尤其在高压差场景下可能引发电弧放电。为应对这些挑战,需从材料选型、结构与防护工艺三方面综合施策,例如采用耐高温基板材

料、优化天线辐射单元固定方式、增加设备密封等级等。此外,环境自适应算法可动态调整通信参数,如根据温度变化修正调制方式,或通过振动传感器触发保护机制,从而在极端条件下维持通信链路稳定。

#### 4 航空电子通信系统关键技术问题的解决对策与落地路径

##### 4.1 针对信号传输与抗干扰问题的技术优化对策

航空电子通信系统对信号传输的稳定性与抗干扰能力要求严苛,需从信号调制、频谱管理及硬件防护三方面协同突破<sup>[4]</sup>。在信号调制层面,采用高阶调制技术如256QAM可提升频谱效率,但需结合自适应均衡算法补偿信道失真,确保信号在复杂电磁环境下的解调准确性。针对频谱资源紧张问题,认知无线电技术可动态感知空闲频段,通过智能频谱切换避开干扰频段,同时结合扩频技术将信号能量分散至更宽频带,降低特定频段受干扰概率。硬件防护方面,选用低损耗介质材料构建传输线,减少信号衰减;在关键节点部署电磁屏蔽结构,抑制外部干扰耦合;通过优化天线辐射方向图,增强目标方向增益并抑制旁瓣干扰,形成空间滤波效应。此外,引入前向纠错编码技术,在数据传输中嵌入冗余校验位,可自动修正部分误码,提升信号传输鲁棒性。

##### 4.2 面向网络架构与互联问题的架构重构与适配策略

网络架构的灵活性与互联适配性是系统扩展的关键,需通过分层解耦与协议标准化实现架构优化。分布式架构重构中,采用软件定义网络(SDN)技术将控制平面与数据平面分离,核心控制器统一管理全网资源,实现流量动态调度与路径优化,避免传统分布式协议因局部决策导致的全局拥塞。针对异构网络互联,设计中引入中间件适配层,将不同协议的数据封装、传输机制抽象为统一接口,通过协议转换网关实现ARINC429、AFDX、以太网等协议的无缝对接。时间同步方面,部署高精度时钟分发网络,结合IEEE1588协议实现微秒级同步精度,确保多节点协同任务的时间一致性。为提升网络可扩展性,采用模块化设计思想,将功能划分为独立模块,通过标准化接口实现快速插拔与动态加载,支持根

据任务需求灵活配置网络拓扑。

##### 4.3 提升系统可靠性与保障处理效能的综合解决方案

系统可靠性需通过冗余设计与故障自愈技术双重保障,而处理效能提升则依赖资源动态调度与算法优化。冗余设计层面,在关键链路部署双物理通道,结合心跳检测机制实时监测链路状态,故障发生时自动切换至备用通道,切换延迟控制在毫秒级。故障自愈技术中,引入基于机器学习的健康管理系统,通过分析设备运行数据预测潜在故障,提前触发保护机制或隔离故障单元,减少非计划停机。处理效能优化方面,采用边缘计算架构将部分数据处理任务下沉至终端节点,降低核心网络负载;通过动态带宽分配算法按任务优先级调整资源分配比例,确保导航、控制等高实时性业务优先传输。此外,优化加密算法选择,在保障安全性的前提下采用轻量级加密方案,减少数据加解密对处理资源的占用,提升系统整体吞吐量。

#### 结束语

航空电子通信系统关键技术问题的解决是保障航空任务顺利开展的关键。通过信号调制优化、频谱管理改进、硬件防护加强等措施,可提升信号传输与抗干扰能力;借助分层解耦、协议标准化等架构重构与适配策略,能增强网络架构灵活性与互联适配性;采用冗余设计、故障自愈、资源动态调度等综合方案,可提升系统可靠性与保障处理效能。落实这些对策,有助于推动航空电子通信系统持续发展,满足日益复杂的航空任务需求。

#### 参考文献

- [1]游蕊,白雪琪.航空电子通信系统关键技术问题的浅析[J].科技风,2024(22):65-67.
- [2]孙源浩.航空电子通信系统中的关键技术研究[J].消费电子,2025(21):248-250.
- [3]朱衍波,王志鹏,郭凯,等.L波段数字航空通信系统技术发展现状与挑战[J].航空学报,2024,45(10):1-15.
- [4]郭玉洁.航空电子通信系统中的关键技术研究[J].电脑校园,2023(43):1-3.