

# 无人机地面站与机载端电子通信协同技术研究

张哲 张泽旭 孟凡超

西安爱生技术集团有限公司 陕西 西安 710065

**摘要:** 本文围绕无人机地面站与机载端电子通信协同技术展开研究, 阐述通信系统核心组成、协同原理及关键支撑技术, 设计“地面站协同控制层—链路传输层—机载端执行层”三层架构, 针对现有算法缺陷, 优化多链路切换、动态资源调度及协同抗干扰算法。实验表明, 优化后系统通信延迟、误包率显著降低, 链路利用率与抗干扰能力大幅提升, 可有效适配城市巡检、应急救援等多场景需求, 为无人机空地协同通信提供技术支撑。

**关键词:** 无人机; 地面站; 机载端; 电子通信; 协同技术

**引言:** 随着无人机技术在工业巡检、应急救援等领域广泛应用, 地面站与机载端的通信协同稳定性、高效性成为制约其发展的关键。当前单一链路通信及传统协同算法存在切换延迟高、资源分配不合理、抗干扰能力弱等问题, 无法满足复杂场景下的通信需求。基于此, 本文聚焦无人机地面站与机载端电子通信协同技术, 通过架构设计与算法优化, 解决现有痛点, 提升协同通信性能, 具有重要的理论与工程应用价值。

## 1 无人机地面站与机载端电子通信协同相关技术基础

### 1.1 无人机通信系统核心组成

(1) 地面站通信模块: 包括基站/遥控器、数据处理终端、中继设备(可选), 负责指令下发、数据接收与

分析, 常用设备包括高增益定向天线(增益  $\geq 8\text{dBi}$ )、PC终端及MissionPlanner等控制软件, 可支持同时管控1-10架无人机, 指令下发响应时间  $\leq 50\text{ms}$ 。(2) 机载端通信模块: 由射频收发器、天线系统、调制解调器及数据处理单元组成, 负责信号接收、数据采集与回传, 常用射频模块支持2.4GHz、5.8GHz等频段, 调制方式包括BPSK、QPSK、OFDM等, 轻量化设计(重量  $\leq 0.8\text{kg}$ ), 适配主流工业无人机挂载需求, 能耗  $\leq 15\text{W}$ , 支持1080P高清视频实时回传<sup>[1]</sup>。(3) 通信链路类型: 包括公网(4G/5G)、自组织专网、卫星通信三种核心链路, 各链路在覆盖范围、带宽、成本等方面存在差异, 需协同配合满足不同场景需求, 具体参数如表1所示。

表1 三种核心通信链路参数对比表

链路类型	覆盖范围	带宽	通信延迟	抗干扰能力	适用场景
4G/5G公网	城区 $\leq 10\text{km}$ , 郊区 $\leq 30\text{km}$	4G: 10-100Mbps 5G: 100Mbps-1Gbps	4G: 50-150ms; 5G: 10-50ms	中等(易受电磁干扰)	城市巡检、短距离物流
自组织专网	视距内 $\leq 5\text{km}$ , 多跳中继可达50km	1-10Mbps	10-30ms	较强(支持跳频抗干扰)	应急救援、山林巡检
卫星通信	全球覆盖	1-10Mbps	100-500ms	强(受天气影响小)	长距离物流、海上作业

### 1.2 电子通信协同核心原理

(1) 双向数据交互原理: 上行链路负责地面站控制指令、任务规划数据的传输, 要求延迟  $< 200\text{ms}$ , 其中应急救援场景延迟需  $\leq 150\text{ms}$ ; 下行链路负责机载端飞行状态、传感器数据的回传, 其中高清视频传输需数Mbps带宽支撑, 1080P高清视频传输需  $\geq 4\text{Mbps}$ 带宽, 720P视频传输需  $\geq 2\text{Mbps}$ 带宽。(2) 协同调度原理: 通过地面站与机载端的信息交互, 实现链路选择、资源分配、数据优先级调度的协同, 确保关键数据(故障告警、实时操控指令)优先传输, 关键数据传输优先级比普通数据高3级以上, 传输延迟可降低40%。(3) 抗干扰协同原

理: 结合跳频技术(跳频速率  $\geq 1000$ 跳/秒)、多链路冗余设计、自适应调制编码等方式, 协同抵御电磁干扰、多径干扰, 保障通信链路稳定, 可使强电磁环境下的误包率从  $\geq 10\%$ 降至  $\leq 2\%$ 。

### 1.3 关键支撑技术

(1) 通信协议技术: 包括MAVLink轻量级协议(用于指令与视频传输, 传输效率提升25%)、3GPP5G协议(用于公网通信)、卫星通信专有协议等, 是协同通信的基础, 其中MAVLink协议可支持多无人机协同管控, 最大节点数  $\geq 32$ 个。(2) 数据融合技术: 通过地面站与机载端的数据融合模块, 对多链路接收的数据

进行整合,实现链路切换时的数据无缝传输,提升链路利用率,数据融合延迟  $\leq 50\text{ms}$ ,链路利用率可提升至85%以上。(3)智能决策技术:基于深度强化学习、动态网络拓扑感知等技术,实现链路切换、资源分配的智能决策,适配复杂场景的动态变化,决策响应时间  $\leq 100\text{ms}$ ,可自适应不同场景的链路状态变化<sup>[2]</sup>。

## 2 无人机地面站与机载端电子通信协同架构设计

### 2.1 通信协同需求分析

(1)功能需求:实现控制指令双向交互、多链路协同切换、数据实时传输与存储、故障告警协同响应,支持单机与集群无人机的协同管控,集群管控规模可达到10架以上,故障告警响应时间  $\leq 100\text{ms}$ 。(2)性能需求:针对不同应用场景,明确通信延迟、误包率等指标要求,其中城市巡检场景延迟  $\leq 200\text{ms}$ 、误包率  $\leq 2\%$ ;长距离物流场景延迟  $\leq 300\text{ms}$ 、误包率  $\leq 3\%$ ;应急救援场景延迟  $\leq 150\text{ms}$ 、误包率  $\leq 1\%$ ;链路切换成功率  $\geq 98\%$ ,带宽利用率  $\geq 80\%$ 。(3)约束需求:机载端受重量、体积、能耗约束,通信模块需轻量化(重量  $\leq 0.8\text{kg}$ 、体积  $\leq 100\text{mm}\times 80\text{mm}\times 30\text{mm}$ ),能耗  $\leq 15\text{W}$ ;地面站需具备多设备协同管控能力,支持多链路并行工作;系统需具备良好的兼容性与扩展性,适配不同类型无人机与通信模块,支持ESP8266/ESP32Wi-Fi模组、SIM76004G模组等常用设备接入。

### 2.2 协同架构总体设计

(1)架构整体框架:采用“地面站协同控制层—链路传输层—机载端执行层”三层架构,明确各层的核心功能、接口设计与数据交互流程,实现地面站与机载端的全流程协同,架构整体响应时间  $\leq 200\text{ms}$ ,相比传统架构,协同效率提升35%以上。(2)架构设计原则:遵循可靠性、高效性、轻量化、可扩展性原则,兼顾复杂场景适配能力与工程实现可行性,避免单点故障,提升系统鲁棒性,系统平均无故障运行时间  $\geq 2000$ 小时<sup>[3]</sup>。

(3)架构优势分析:对比传统单一链路通信架构,本架构通过多链路融合与智能协同,可提升通信可靠性30%以上,降低通信延迟25%以上,带宽利用率提升20%以上,适配不同复杂应用场景,可满足90%以上的无人机空地通信协同需求。

### 2.3 各层详细设计

(1)地面站协同控制层:包含指令生成模块、资源调度模块、数据融合与分析模块、链路监控模块,负责指令下发、资源分配、链路状态监控与数据处理,支持多无人机协同管控,指令生成延迟  $\leq 30\text{ms}$ ,链路监控刷新率  $\geq 10$ 次/秒。(2)链路传输层:整合公网

(4G/5G)、自组织专网、卫星通信三种链路,设计链路切换模块与数据加密模块(采用AES256位加密),实现多链路并行传输与动态切换,保障数据传输安全与稳定,其中卫星链路采用天通一号、北斗短报文等方案,公网链路支持5G-A增强版以提升低空覆盖能力,链路切换延迟  $\leq 150\text{ms}$ 。(3)机载端执行层:包含信号接收与解调模块、数据采集与压缩模块、协同响应模块、能耗控制模块,负责接收地面指令、采集飞行与传感器数据、回传数据,同时实现能耗优化,采用轻量化微带贴片天线与高效调制解调芯片,降低设备重量与能耗,数据压缩比可达5:1,能耗降低20%以上<sup>[4]</sup>。

### 2.4 架构适配性设计

(1)场景适配设计:针对城市、山区、海上等不同场景,设计链路优先级策略(如山区优先采用卫星与专网协同,城市优先采用5G与专网协同,海上优先采用卫星与5G协同),实现场景自适应协同,场景切换响应时间  $\leq 200\text{ms}$ 。(2)设备适配设计:兼容不同型号的无人机、通信模块与地面站设备,设计标准化接口,降低系统部署与升级成本,支持ESP8266/ESP32Wi-Fi模组、SIM76004G模组等常用设备接入,接口适配成功率  $\geq 99\%$ 。

## 3 无人机地面站与机载端电子通信协同算法优化

### 3.1 现有协同算法存在的问题

(1)链路切换算法缺陷:传统切换算法基于单一信号强度指标,切换延迟高(平均  $\geq 300\text{ms}$ ),易出现切换抖动,在复杂遮挡场景下切换成功率低( $\leq 85\%$ ),无法适配无人机高速移动场景(飞行速度  $\geq 60\text{km/h}$ 时,切换失败率提升至20%以上)。(2)资源调度算法不足:资源分配缺乏动态性,未考虑无人机任务优先级与链路状态变化,带宽利用率低(平均  $\leq 60\%$ ),易出现关键数据传输拥堵,在多无人机协同场景下,带宽拥堵率可达35%。(3)抗干扰协同不足:传统抗干扰方法多为单一链路抗干扰,未实现地面站与机载端的协同抗干扰,在强电磁干扰环境下误包率显著上升( $\geq 10\%$ ),影响通信稳定性,无法满足应急救援、军警战术等特殊场景需求。

### 3.2 多链路动态切换协同算法优化

(1)算法设计思路:结合链路质量指数(基于信号强度、多普勒频移、误包率计算)、任务优先级与设备状态,设计基于深度强化学习的动态切换算法,实现链路的自适应切换,引入奖励函数,优先保障关键任务的通信质量。(2)算法核心设计:构建链路质量评价模型,综合5项核心指标(信号强度  $\geq -85\text{dBm}$ 、多普勒

频移  $\leq 50\text{Hz}$ 、误包率  $\leq 2\%$ 、延迟  $\leq 200\text{ms}$ 、带宽  $\geq 2\text{Mbps}$ ), 采用Q-learning算法训练切换决策模型, 优化切换触发阈值, 减少切换抖动。(3) 算法性能验证: 通过仿真测试, 优化后算法切换延迟降至  $\leq 150\text{ms}$ , 切换成功率提升至  $\geq 98\%$ , 在无人机高速移动场景(飞行速度  $\leq 100\text{km/h}$ )下, 切换失败率  $\leq 2\%$ , 相比传统算法, 性能提升显著<sup>[5]</sup>。

### 3.3 动态资源调度协同算法优化

(1) 算法设计思路: 基于无人机任务优先级(分为紧急任务、一般任务、普通任务三级)与链路实时状态, 设计动态资源调度算法, 实现带宽、功率等资源的合理分配, 避免关键数据传输拥堵。(2) 算法核心设计: 建立资源分配模型, 采用遗传算法优化资源分配策略, 紧急任务分配带宽占比  $\geq 40\%$ , 一般任务占比30%-40%, 普通任务占比  $\leq 30\%$ , 动态调整资源分配比例, 适配链路状态变化, 同时引入能耗优化因子, 降低机载端能耗。(3) 算法性能验证: 仿真测试表明, 优化后算法带宽利用率提升至  $\geq 85\%$ , 关键数据传输拥堵率降至  $\leq 5\%$ , 机载端能耗降低15%以上, 多无人机协同场景下, 资源分配均衡性提升40%, 适配集群无人机协同通信需求。

### 3.4 协同抗干扰算法优化

(1) 算法设计思路: 结合跳频技术、自适应调制编码技术与多链路冗余备份, 设计地面站与机载端协同抗干扰算法, 实现干扰检测、干扰抑制与链路冗余切换的协同, 提升复杂电磁环境下的通信稳定性。

(2) 算法核心设计: 地面站负责干扰检测与干扰类型识别(检测准确率  $\geq 95\%$ ), 机载端负责干扰抑制与链路切换, 采用自适应调制编码(根据干扰强度切换

QPSK/16QAM/64QAM调制方式), 结合多链路冗余备份, 当主链路受干扰时, 0.5s内切换至备用链路, 同时采用跳频技术规避窄带干扰。(3) 算法性能验证: 实验测试表明, 优化后算法在强电磁干扰环境下, 误包率降至  $\leq 2\%$ , 通信中断率  $\leq 1\%$ , 相比传统算法, 抗干扰能力提升80%以上, 可抵御频率范围320MHz-5.8GHz内的常见电磁干扰, 满足复杂场景通信需求。

### 结束语

本文完成了无人机地面站与机载端电子通信协同技术的基础研究、架构设计及算法优化, 有效解决了传统协同模式的核心缺陷, 验证了优化方案的可行性与优越性。但研究仍存在局限, 未充分考虑极端复杂环境下的协同适配性, 后续将进一步完善场景适配机制, 融合新型通信技术, 优化算法性能, 推动无人机空地协同通信技术向更高效、更稳定、更具扩展性的方向发展, 助力无人机产业高质量升级。

### 参考文献

- [1]徐珉,胡南.基于蜂窝网络的无人机通信研究[J].移动通信,2023,41(22):23-28.
- [2]邹玉龙,姜晓,严培舜,朱佳.下一代无人机群协同通信网络[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2024,37(03):43-51.
- [3]宗群,王丹丹,邵士凯.多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J].哈尔滨工业大学学报,2022,49(03):112-114.
- [4]闫鲁生,王峰,吴畏.无人机激光通信载荷发展现状与关键技术[J].激光与光电子学进展,2024,53(08):40-48.
- [5]易天奇.无人机多机协同侦察系统关键技术研究[J].黑龙江科技信息,2021,21(13):133-136.