

无人机地面站高频电子通信系统关键技术研究

卿 龙 何昱霖 王 立

西安爱生技术集团有限公司 陕西 西安 710065

摘 要：无人机地面站高频电子通信系统涵盖硬件架构、信号处理、链路构建及功耗优化等关键技术。本文详细阐述硬件架构中发射、接收、信号调理及接口适配设计；信号处理包含调制、解调、抗干扰与同步技术；链路构建涉及拓扑、带宽分配、切换容错及距离拓展；功耗优化涵盖模块控制、电源管理、信号传输及硬件功耗平衡。这些技术共同保障系统高效稳定运行。

关键词：无人机地面站；高频通信；硬件架构；信号处理；功耗优化

引言：无人机地面站高频电子通信系统作为无人机系统的关键组成部分，承担着数据传输与指令交互的重要任务。随着无人机应用场景的拓展，对通信系统的性能要求日益严苛，涵盖硬件架构、信号处理、链路构建及功耗优化等多维度。研究高频电子通信系统关键技术，有助于提升无人机通信的可靠性、稳定性与能效比，满足复杂环境下的任务需求，推动无人机技术在民用、工业巡检、应急作业等领域的深入应用与发展。

1 无人机地面站高频电子通信系统硬件架构设计技术

1.1 高频通信发射模块设计

高频通信发射模块作为无人机地面站信号传输的核心单元，需兼顾功率效率与频谱纯净度。功率放大器设计需采用高线性度器件，结合前馈补偿技术抑制交调失真，确保发射信号在目标频段内具备平坦的幅度响应。上变频电路需通过多级混频结构实现基带信号向高频载波的精准搬移，其中本振信号的相位噪声指标直接影响发射信号的频谱纯度，需采用锁相环与直接数字频率合成技术联合优化^[1]。数字预失真模块通过构建发射通道的逆模型，对输入信号进行非线性补偿，可有效扩展功率放大器的工作范围并降低邻道干扰。发射模块的电源管理单元需集成动态偏置控制功能，根据输出功率需求实时调整工作电流，在保证线性度的前提下实现能耗优化。

1.2 高频通信接收模块设计

接收模块的性能指标直接决定地面站对微弱信号的捕获能力。低噪声放大器设计需采用级联结构，首级选用超低噪声系数器件，后续级联通过阻抗匹配网络实现噪声与增益的平衡。下变频电路需采用正交解调架构，通过I/Q两路信号的相位正交性抑制镜像频率干扰，其中混频器的线性度指标对接收动态范围具有决定性影响。自动增益控制环路需结合数字步进与模拟调节技术，在

保证信号不失真的前提下实现输入功率的大范围覆盖。接收模块的时钟恢复电路需采用全数字锁相环结构，通过过采样与数字滤波技术提升时钟同步精度，为后续数字信号处理提供稳定的时间基准。

1.3 信号调理与滤波模块设计

信号调理单元需构建从射频到基带的完整信号处理链。射频带通滤波器采用微带线结构，通过优化耦合系数实现陡峭的滚降特性，有效抑制带外干扰信号。中频滤波器组需根据调制方式选择不同窗函数设计FIR滤波器，在满足通带平坦度要求的同时实现阻带高衰减。模拟信号调理电路需集成可编程增益放大器，通过数字接口实现增益步进调节，适应不同输入电平的信号处理需求。抗混叠滤波器需采用椭圆函数或切比雪夫型结构，在保证截止频率特性的前提下最小化通带波纹，为模数转换器提供干净的模拟输入信号。

1.4 硬件接口适配设计

接口适配层需构建地面站各功能模块间的数据传输桥梁。高速数据接口采用LVDS差分标准，通过源同步时钟技术实现千兆级数据传输，满足多通道采样数据的实时传输需求。控制接口采用SPI与I2C混合架构，分别实现高速配置与低速监控功能，其中SPI接口需支持多从设备级联模式以扩展控制通道。电源接口设计需集成过压保护与电磁兼容滤波电路，通过分布式供电架构降低系统噪声耦合。机械接口需采用标准化导轨安装结构，配合盲插连接器实现模块化快速部署，同时通过金属屏蔽罩实现电磁屏蔽与热设计一体化。

2 无人机地面站高频通信信号处理技术

2.1 高频信号调制技术

高频信号调制需兼顾频谱效率与抗噪声性能。正交幅度调制通过独立调控载波的幅度与相位，在有限带宽内实现多比特符号传输，其星座图设计需优化最小欧氏

距离以提升抗干扰能力。多载波调制采用正交频分复用架构,将高速数据流分解为并行低速子流,通过子载波间的正交性消除符号间干扰,特别适用于多径衰落信道环境。差分调制技术通过符号间相位差传递信息,无需载波恢复即可实现解调,在相位噪声显著的场景中具有显著优势。调制器实现需采用数字上变频结构,将基带信号经数控振荡器搬移至高频载波,其中数控振荡器的相位累积精度直接影响调制信号的频谱纯度。

2.2 高频信号解调技术

解调模块需针对不同调制方式构建专用处理链。相干解调通过恢复载波相位实现最佳检测,其核心在于载波同步环路的收敛速度与稳态精度,需采用锁相环与科斯塔斯环联合优化架构^[2]。非相干解调通过差分检测或包络检波提取信息,虽牺牲部分性能但显著降低实现复杂度,适用于资源受限的嵌入式平台。多载波解调需通过快速傅里叶变换实现子载波分离,其中频偏估计误差会导致子载波间干扰,需集成频偏补偿算法提升解调鲁棒性。解调器输出需经过判决反馈均衡器进一步消除残余码间干扰,均衡器系数通过最小均方误差准则动态调整以适应信道变化。

2.3 信号抗干扰处理技术

抗干扰模块需构建多层次防护体系。扩频技术通过伪随机序列扩展信号带宽,在接收端通过相关解扩实现干扰抑制,直接序列扩频与跳频扩频可单独或联合使用以增强抗截获能力。自适应滤波采用最小均方算法动态调整抽头系数,对窄带干扰具有显著抑制效果,其收敛速度与稳态误差需通过变步长策略优化。智能天线技术通过波束成形将零陷对准干扰方向,数字波束形成需结合空间谱估计算法实现干扰方位精准定位,特别适用于存在多干扰源的复杂电磁环境。编码调制联合设计通过交织器与信道编码的级联,将突发错误分散为随机错误,提升前向纠错码的纠错能力。

2.4 信号同步技术

同步模块需实现载波、符号与帧的多层级同步。载波同步通过插入导频或非数据辅助算法估计频偏,锁相环需采用比例积分控制器提升跟踪带宽与稳态精度,应对多普勒频移动态变化。符号同步通过Gardner算法或Mueller-Muller算法提取定时误差,环路滤波器设计需平衡跟踪速度与抖动性能,避免定时抖动导致解调性能恶化。帧同步通过检测前导序列实现数据帧边界定位,相关器设计需优化自相关特性以提升虚警概率与漏检概率的折中性能。联合同步架构通过信息交互实现载波、符号同步的协同收敛,显著缩短系统启动时间并提升动态

场景下的同步稳定性。

3 无人机地面站高频通信链路构建技术

3.1 高频通信链路拓扑设计

高频通信链路拓扑需兼顾传输效率与系统鲁棒性。常见组网形式包含星型、网状及混合拓扑三类,不同架构的连接方式、运行机制存在明显差异,适配的无人机作业场景也各不相同。各类拓扑在可靠性、管控难度与拓展能力上表现差异化,具体参数与性能对比如表1所示。

表1

拓扑类型	结构特点	核心优势	存在短板	适用场景
星型拓扑	地面站为核心节点,点对点连接各无人机	管理集中、链路独立、部署简单	中心节点单点故障风险高	常规单机/小规模无人机编队
网状拓扑	节点间互联互通,支持多跳中继传输	容错性强、覆盖范围广	路由算法复杂、资源开销大	大范围集群、复杂野外电磁环境
混合拓扑	核心星型组网+边缘网状互联	兼顾传输效率与网络鲁棒性	架构设计与调度逻辑复杂	大中型无人机集群、多任务协同作业

3.2 链路带宽分配技术

带宽分配需实现多业务流的公平与效率协同。静态分配通过预配置固定带宽满足确定性业务需求,适用于视频传输等恒定速率场景,但无法适应突发业务变化。动态分配采用加权公平队列算法,根据业务优先级与实时需求调整带宽配额,高优先级控制指令可获得即时传输保障,低优先级数据流则利用空闲带宽^[3]。自适应带宽调整机制通过监测信道质量与业务队列长度,动态优化分配策略,在信道衰落时压缩非关键业务带宽以维持核心链路稳定性。频谱感知技术可实时检测未占用频段,通过认知无线电技术实现带宽扩展,进一步提升系统吞吐量。

3.3 链路切换与容错技术

链路切换需确保业务连续性不受信道质量波动影响。硬切换通过先断后连方式实现链路转移,实现简单但存在短暂通信中断,适用于对时延不敏感的场景。软切换维持新旧链路并行传输,通过信号强度比较实现平滑过渡,可消除切换盲区但增加系统复杂度。基于多路径传输的容错机制同时建立主备链路,主链路故障时自动切换至备用路径,切换延迟可控制在毫秒级。前向纠错编码与自动重传请求的联合应用可显著提升链路抗干扰能力,卷积码与交织技术的结合能有效对抗突发错误,而选择性重传机制则避免全数据重发的资源浪费。

3.4 高频通信距离拓展技术

距离拓展需突破高频信号的路径损耗限制。功率放大技术通过提升发射功率增加信号覆盖范围,但需解决

线性度与效率的矛盾, Doherty架构可实现高功率下的高效率工作。高方向性天线通过波束赋形集中能量传输, 相控阵天线可实现波束电子扫描, 在保持高增益的同时支持多目标跟踪。中继转发技术通过部署地面或空中中继节点延长通信距离, 异频中继可避免上下行链路干扰, 同频中继则需解决自干扰抑制问题。协作通信技术利用无人机间空间分集增益, 通过分布式空时编码实现虚拟MIMO传输, 在保持单节点复杂度不变的前提下显著提升系统覆盖性能。

4 无人机地面站高频通信系统功耗优化技术

4.1 高频通信模块功耗控制技术

高频通信模块的功耗优化需从核心器件与电路设计双重维度展开。射频前端采用集成化设计可显著降低分立器件间的互连损耗, 例如将功率放大器、低噪声放大器与滤波器集成于单芯片, 通过减少外部匹配网络降低寄生参数影响^[4]。数字基带部分通过动态电压频率调整技术, 根据业务负载实时调节处理器工作状态, 在空闲时段降低供电电压与时钟频率以减少漏电流与开关损耗。发射链路中, 包络跟踪技术通过实时调整功率放大器供电电压, 使其跟随信号包络变化, 在保持线性度的前提下提升效率, 尤其适用于高峰均比调制信号场景。接收链路采用低功耗唤醒接收机设计, 通过周期性检测信道能量触发主接收机工作, 避免持续监听带来的能量消耗。

4.2 电源管理与节能设计

电源管理架构需实现能量分配的精细化控制。多级电源转换结构通过分布式DC-DC转换器将高压总线电压逐步降至各模块所需电压, 减少长距离传输的压降损耗。自适应电源门控技术根据模块工作状态动态启闭供电通路, 对处于休眠模式的电路完全切断电源, 消除静态功耗。能量收集技术通过整合太阳能、振动能等环境能量源, 为地面站辅助系统供电, 延长主电池续航时间。电池管理系统采用动态均衡技术, 通过主动转移电荷消除单体电池间的容量差异, 提升电池组整体利用率并延长循环寿命。

4.3 低功耗信号传输优化技术

信号传输优化需兼顾频谱效率与能量效率。调制方式选择需权衡性能与功耗, 例如BPSK调制虽数据速率较低但解调复杂度低, 适合远距离低功耗场景; 而QAM调制通过提高频谱利用率减少传输时间, 但需更高线性度

的功率放大器增加功耗。链路自适应技术通过动态调整发射功率与调制阶数, 在信道质量较好时降低发射功率或采用高阶调制, 在衰落环境下提升功率或切换低阶调制, 实现能耗与误码率的折中。协作传输技术利用无人机间空间分集增益, 通过分布式空时编码实现虚拟MIMO传输, 在保持单节点发射功率不变的前提下提升系统容量, 间接降低单位比特能耗。

4.4 硬件功耗与通信性能平衡技术

硬件设计需建立功耗与性能的量化评估模型。芯片选型优先选择采用先进制程工艺的器件, 例如28nm以下工艺节点可显著降低晶体管漏电流, 同时通过优化电路布局减少互连长度降低寄生电容。模拟电路设计采用电流复用技术, 例如在混频器中共享偏置电流, 通过时分复用实现多个功能模块的供电共享。数字电路通过门控时钟技术关闭未使用模块的时钟信号, 消除动态功耗^[5]。性能评估需引入能效比指标, 例如单位比特能耗或每赫兹功耗, 通过仿真与实测结合的方式验证设计参数对系统性能的影响, 在满足通信质量要求的前提下确定最优功耗配置。

结束语

无人机地面站高频电子通信系统关键技术的研究, 为提升无人机通信性能提供了全面解决方案。从硬件架构的精细化设计到信号处理的高效算法, 从链路构建的鲁棒性优化到功耗控制的节能策略, 各技术环节相互协同, 共同构建了高性能、低功耗的通信系统。实际应用中, 需根据具体场景需求, 灵活调整技术参数与配置, 以实现系统性能的最优化, 为无人机在复杂环境下的稳定运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]牛文明,刘子雄,张赫.多无人机协作中继网络通信信道频间干扰抑制技术[J].长江信息通信,2025,38(8):38-40.
- [2]田园,吴峰,欧阳俊,等.面向低空经济的无人机通信及标准进展分析[J].信息通信技术,2023,17(5):38-44.
- [3]马媛,房林.无人机通信安全需求与措施[J].网络安全技术与应用,2026(1):101-103.
- [4]郎为民,李宇鸽,王振义,等.系留无人机通信问题研究[J].电信快报,2023(1):1-4,13.
- [5]张仕明,陈蓓,岳俊,等.无人机通信系统加密技术综述[J].现代信息科技,2025,9(4):6-10.