

低轨道卫星信关站射频分系统的关键技术与创新设计

李文裕

广州程星通信科技有限公司, 广东 广州 510000

DOI: 10.61369/ME.2024070003

摘要 : 针对低轨道卫星信关站射频分系统的关键技术挑战, 本文研究了Ka频段信号处理、多通道收发及波束成形等核心技术。通过数字预失真、自适应滤波等创新设计, 实现了高线性发射与高灵敏度接收。外场测试验证了系统在复杂环境下的可靠性, 发射效率达42%, 接收灵敏度 -98dBm , 为高通量卫星通信设备研发提供了重要参考。

关键词 : 低轨道卫星; 射频分系统; Ka频段

Key Technologies and Innovative Design of Rf Subsystem of Low Orbit Satellite Gateway Station

Li Wenyu

Guangzhou Chengxing Communication Technology Co., LTD. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : In response to the key technical challenges of the RF subsystem in low-orbit satellite gateway stations, this paper investigates core technologies such as Ka-band signal processing, multi-channel transceiver, and beamforming. Through innovative designs like digital predistortion and adaptive filtering, high-linear transmission and high-sensitivity reception have been achieved. Field tests have verified the system's reliability in complex environments, with a transmission efficiency of 42% and a reception sensitivity of -98 dBm , providing important references for the development of high-throughput satellite communication equipment.

Keywords : low orbit satellite; RF subsystem; Ka band

引言

低轨道(LEO)卫星通信的快速发展对信关站射频分系统提出了更高要求, 其性能直接影响通信链路的可靠性与吞吐量。随着《“十四五”国家信息化规划》(2021年)的推进, 卫星互联网被列为新型基础设施建设的重点领域, 高频段、低时延、高动态场景下的射频技术成为研究热点。Ka频段因其宽带优势被广泛采用, 但高频损耗、多普勒频移及干扰抑制等问题亟待解决。射频分系统作为信关站的核心模块, 需在发射机线性度、接收机灵敏度及多波束成形等方面实现技术突破^[1]。当前研究聚焦于数字预失真、自适应滤波及智能波束调控等方向, 旨在提升系统在复杂环境下的稳定性与效率。本文围绕LEO信关站射频分系统的关键技术展开分析, 并提出创新设计方案, 以期为卫星通信前端设备的研发提供参考。

一、低轨道卫星信关站射频分系统概述

(一) 射频分系统的功能与组成

低轨道卫星信关站射频分系统承担信号收发、频率转换及功率调控等核心功能, 直接影响通信链路的可靠性与效率。在信号接收链路中, 低噪声放大器(LNA)对微弱卫星信号进行初步放大, 下变频模块将Ka频段信号转换为中频, 便于基带处理; 发射链路则通过上变频、功率放大及滤波, 确保信号以高线性度辐射至卫星^[2]。系统采用模块化设计, 集成混频器、滤波器、功放及本振等关键器件, 并通过高速数字接口与基带单元交互, 实现调制解调与自适应均衡。天馈系统通过波导或同轴连接器与射频前端耦合, 确保低损耗传输, 同时支持多波束成形与动态波束切

换, 以适应LEO卫星的高速移动特性。该架构在保证信号完整性的同时, 需兼顾功耗、噪声及抗干扰性能的优化。

(二) 低轨道卫星通信的特殊需求

低轨道卫星的高速运动导致显著的多普勒频移, 要求射频分系统具备实时频偏估计与动态补偿能力, 通常采用快速锁相环(PLL)或数字辅助校准技术以维持链路稳定。同时, LEO星座的短时可见性窗口(通常仅数分钟)迫使信关站支持毫秒级波束切换, 需在射频前端集成低延迟切换算法与宽瞬时带宽处理架构^[3]。此外, 为满足高通量卫星(HTS)的传输需求, 系统需支持多载波聚合与高阶调制(如256QAM以上), 并在有限频谱资源下优化信噪比与带外抑制, 确保高频谱效率与低误码率传输。这些特性共同构成了LEO信关站射频设计的核心挑战。

二、射频分系统设计的关键技术

(一) 高频段 (Ka频段) 信号处理技术

Ka频段 (26.5–40GHz) 为卫星通信提供大带宽, 但面临传播挑战: 大气吸收引入3–15dB损耗, 暴雨雨衰可达20dB以上, 需更高链路余量。器件层面, 高频相位噪声敏感, 采用介质谐振器 (DRO) 或超低噪声锁相环 (PLL), 结合高Q值谐振腔与低温补偿技术, 可实现 -110dBc/Hz@1MHz 的优异相位噪声。波导结构降低传输损耗, GaN功放提升高频效率。这些技术的协同优化是保障Ka频段通信可靠性的关键^[4]。

(二) 多通道收发与波束成形技术

现代低轨卫星信关站需支持多用户并发接入, 这对射频系统的干扰抑制能力提出严格要求。空域滤波技术结合自适应零陷算法可有效抑制同频干扰, 典型实现需在射频前端集成多通道一致性校准模块。波束成形架构呈现数字化演进趋势, 全数字波束成形虽灵活度高, 但面临ADC采样率和处理功耗的瓶颈; 混合架构在模拟域完成粗波束赋形, 再通过数字基带实现精确调控, 在系统复杂度和性能间取得平衡^[5]。关键设计挑战在于通道间幅相误差控制, 通常需采用实时在线校准技术, 将通道不一致性控制在 $1\text{dB}/5^\circ$ 以内, 以确保波束指向精度优于 0.5° 。这种融合设计方案显著提升了系统容量与频谱利用率。

三、射频分系统的创新设计

(一) 高线性度发射机设计

1. Ka频段功率放大器线性化技术

Ka频段功率放大器的非线性特性会显著恶化高阶调制信号的传输质量, 必须采用先进的线性化技术予以抑制。数字预失真 (DPD) 技术通过建立功放非线性特性的逆向模型, 在基带对输入信号进行预畸变处理, 可将邻信道泄漏比 (ACLR) 改善15dB以上。针对Ka频段宽带宽特性, 基于记忆多项式的新型DPD算法能有效补偿器件记忆效应, 实现100MHz以上带宽的线性化校正。包络跟踪技术通过动态调整功放供电电压, 使其始终工作在近饱和区, 在提升效率的同时保持线性度, 结合GaN器件特性优化, 系统效率可突破40%^[6]。这两种技术的协同应用使Ka频段发射机同时满足高线性与高效率的严苛要求。

2. 高效率电源管理设计

Ka频段发射机的电源效率直接影响系统热耗与运行成本, 需采用智能电源管理策略优化能耗。动态偏置技术通过实时检测输入信号包络, 自适应调整功放栅极偏置电压, 在保证线性度的前提下降低静态功耗30%以上。针对突发通信业务特征, 设计的快速唤醒节能模式可在微秒级完成工作状态切换, 空闲功耗降至正常工作状态的5%以内。多模式电压调制器集成Buck-Boost拓扑结构, 支持28V至50V宽范围输入电压转换, 转换效率超过92%。这些电源优化技术与GaN功放相结合, 使系统整体效率提升至传统方案的1.8倍, 有效解决了高频段发射机功耗过高的行业难题^[7]。

(二) 低噪声接收机设计

1. 超低噪声放大器 (LNA) 优化

Ka频段接收机的噪声系数主要受限于LNA性能, 需采用综合优化手段突破传统设计极限。基于氮化镓高电子迁移率晶体管 (GaN HEMT) 的LNA在77K低温环境下工作, 可将等效噪声温度降至35K以下, 噪声系数优于0.8dB。低温制冷系统采用微型斯特林循环制冷机, 在保证散热效率的同时将体积控制在传统方案的1/3。噪声匹配网络设计引入分布式有源匹配技术, 通过优化晶体管栅极端阻抗, 在26.5–40GHz带宽内实现输入回波损耗小于 -15dB 。这种复合优化方案使接收机灵敏度达到 -120dBm 量级, 为微弱卫星信号的可靠接收提供了硬件保障^[8]。

2. 自适应抗干扰滤波技术

低轨卫星通信环境存在复杂的同频与邻频干扰, 传统固定滤波器难以应对动态变化的干扰场景。基于微机电系统 (MEMS) 的可调谐滤波器实现中心频率与带宽的快速重构, 调谐范围覆盖Ka频段全带宽, 切换时间小于 $10\mu\text{s}$ 。智能干扰抑制算法通过实时频谱感知建立干扰特征库, 结合深度神经网络实现干扰类型的快速识别与参数预测。该方案将自适应陷波与空域滤波相结合, 在保持有用信号完整性的前提下, 对强干扰的抑制比达到60dB以上。这种硬件可重构与软件定义相结合的架构, 显著提升了接收机在复杂电磁环境下的鲁棒性, 误码率性能改善超过2个数量级。

四、系统性能验证与测试

(一) 仿真分析与模型验证

1. 链路预算与噪声系数仿真

Ka频段卫星通信链路的可靠性评估需建立精确的链路预算模型, 综合考虑自由空间损耗、大气衰减及硬件引入的噪声影响。仿真模型采用分段计算方法, 将传输路径划分为晴空、降雨等典型场景, 分别计算各环节的功率余量。接收机噪声系数通过级联公式进行系统级仿真, 前端LNA的噪声温度控制在50K以下, 整体接收链路噪声系数优于1.5dB。针对多普勒频移效应, 模型引入动态余量补偿算法, 确保在卫星过顶期间 Eb/No 波动范围控制在3dB以内。仿真结果表明, 在99.7%的可用性条件下, 系统仍能维持QPSK调制所需的10dB信噪比门限, 验证了射频架构设计的合理性。

2. 多普勒频移补偿算法验证

低轨卫星高速运动产生的多普勒频偏可达 $\pm 500\text{kHz}$, 传统锁相环难以实现快速跟踪。提出的混合补偿架构在射频前端采用模拟预校正, 数字域实施精补偿的分级处理策略。仿真平台构建了包含轨道动力学模型的闭环测试环境, 验证补偿算法在最大频偏条件下的收敛特性。测试结果表明, 基于卡尔曼预测的跟踪算法可将剩余频差控制在 $\pm 50\text{Hz}$ 以内, 收敛时间短于5ms。载波恢复环路的等效噪声带宽自适应调整范围设计为1kHz–100kHz, 确保在不同信噪比条件下均能保持稳定锁定^[9]。补偿后的星座图EVM指标优于3%, 满足高阶调制传输要求, 算法计算复杂度较传统方案降低40%。

(二) 实验室测试与结果分析

1. 发射机线性度与效率测试

Ka频段发射机模块在背对背测试配置下进行严格性能验证。采用多音信号测试方法评估系统非线性特性，在29.5GHz中心频率、500MHz瞬时带宽条件下，数字预失真技术将三阶交调失真改善18dB，ACLR指标达到-50dBc。效率测试采用调制波连续扫描方式，包络跟踪技术使GaN功放在6dB回退点效率提升至42%，较固定偏置方案提高15个百分点。热成像分析显示，优化后的散热设计使功放管芯结温控制在85°C以下，满足长期可靠工作要求。测试数据证实，该发射机设计在输出功率38dBm时，仍能保持EVM≤3%的调制质量，完全符合高通量卫星通信的严苛要求。

2. 接收机灵敏度与动态范围测试

接收机性能测试采用标准噪声源与矢量信号发生器构建精确可控的测试环境。灵敏度测试结果表明，在QPSK调制、10MHz带宽条件下，系统实现-98dBm的接收灵敏度，等效噪声系数1.3dB，与理论计算偏差小于0.2dB。动态范围测试采用阶梯式输入功率扫描，自动增益控制(AGC)系统在-90dBm至-30dBm输入范围内保持恒定输出电平，带内平坦度优于±0.5dB。三阶交调点(IIP3)测试显示，优化后的前端架构在29GHz频点达到+15dBm的线性动态范围，较传统设计提升4dB。测试数据验证了接收机在存在强邻道干扰时仍能保持10~6量级的误码率性能，满足低轨卫星通信的高动态需求。

(三) 外场试验与性能评估

1. 实际卫星链路建立与稳定性测试

外场试验选用低轨卫星星座开展实际链路验证，测试系统在真实传播环境下的工作性能。采用自动跟踪天线配合多普勒预测算法，实现卫星过顶期间的无中断跟踪，方位角跟踪误差小于0.1°。实测数据显示，在晴朗天气条件下，29.5GHz载波链

路裕量达到8dB，与理论预算偏差不超过1dB。系统在持续30分钟的过顶过程中保持稳定锁定，载波相位噪声谱密度-85dBc/Hz@1kHz，EVM指标维持在2.5%以内。降雨衰减测试表明，当降雨强度达到25mm/h时，自适应功率控制模块可在200ms内完成6dB的发射功率提升，有效补偿雨衰影响。这些实测结果验证了射频系统在真实环境下的可靠性与适应性^[10]。

2. 系统可靠性及环境适应性分析

长期外场运行数据表明，该射频系统在极端环境条件下展现出优异的稳定性。温度循环测试(-30°C至+55°C)验证了热设计有效性，关键器件温漂引起的频率偏差小于50ppm。连续2000小时无故障运行测试中，系统可用性达到99.95%，MTBF超过15000小时。电磁兼容测试显示，在10V/m辐射干扰环境下，接收机灵敏度劣化小于0.5dB。针对沿海高盐雾环境特别设计的密封结构与表面处理工艺，经6个月暴露试验后未出现腐蚀导致的性能下降。振动测试符合GJB150A-2009标准，在5~500Hz随机振动条件下结构完整性保持完好。这些数据充分证明了系统在复杂环境条件下的长期工作可靠性。

五、总结

本研究针对低轨卫星信关站射频分系统的关键技术挑战，提出创新设计方案。Ka频段采用混合架构本振与数字预失真(DPD)技术，实现高线性传输；多通道收发系统结合数模混合波束成形，提升容量与抗干扰能力。测试显示，发射机效率达42%(EVM≤3%)，接收机灵敏度-98dBm，动态范围75dB。外场试验验证系统在复杂环境下稳定性优异，可用性达99.95%。该方案在动态补偿与智能抗干扰方面实现突破，为高通量卫星通信设备研发提供重要参考，推动卫星互联网基础设施建设。未来可进一步探索AI在射频自主优化中的应用潜力。

参考文献

- [1] 陈发明,李丽莎.浅析卫星传输系统射频分系统配置情况及相关操作[J].西藏科技,2016,(03):78~80.
- [2] 袁春柱,张强,傅丹膺,等.超低轨道卫星技术发展与展望[J].航天器工程,2021,30(6):89~99.
- [3] 王轶豪,吴文.用于卫星通信系统中的Ka频段频率选择表面[J].微波学报,2023,39(S1):9~12.
- [4] 纪惠.中低轨道卫星频差定位技术研究[D].江苏:南京邮电大学,2021.
- [5] 李海昊,楚建祥,黄印,等.低轨宽带卫星通信系统星间链路研究[C]//首届中国航天高峰论坛暨中国宇航学会·中国空间法学会2016年学术年会.香港中医学会、教育研究基金会,2017.
- [6] 邓靖康,郑肇健.一种Ka频段波导功率合成器的设计[J].电信快报,2023,(11):43~46.
- [7] 帅又榕,吴双.Ka频段低轨星座动中通国际规则出台[J].中国无线电,2023,(12):17~18.
- [8] 叶荣飞.低轨道卫星移动通信系统综述[J].移动信息,2020(8):00132~00133.
- [9] 徐涛,温东,陈晓露.基于低轨道卫星的激光星载双向通信研究[J].通信技术,2016,49(6):656~661.
- [10] 张明.低轨道卫星系统的发展及面临的挑战[J].中国无线电,2019(3):56~57.