

车载动中通收发机的研制与应用

李文裕

广州程星通信科技有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ERA.2025070030

摘 要： 车载动中通系统作为移动卫星通信的核心装备，通过 Ka 频段射频前端优化、高动态跟踪算法及多模抗干扰设计，实现了等效全向辐射功率（EIRP） $\geq 50\text{dBW}$ 、动态跟踪精度 $\leq 0.3^\circ$ 的技术突破。系统采用惯导辅助快速捕获与多普勒实时补偿技术，在 120km/h 高速机动下保持通信稳定性，实测误码率优于 1×10^{-5} 。外场测试验证了复杂地形中 99.3% 的链路可用率，应急通信与军事应用案例表明其具备实战化部署能力，为高机动环境卫星通信提供了有效解决方案^[1]。

关 键 词： 车载动中通；Ka 频段；高动态跟踪

Development and Application of Vehicular Mobile Transceiver

Li Wenyu

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

Abstract： As the core equipment of mobile satellite communication, the vehicle-mounted dynamic communication system has achieved a technical breakthrough with an equivalent full-directional radiation power (EIRP) of $\geq 50\text{dBW}$ and dynamic tracking accuracy ≤ 0.3 through optimization of the Ka-band RF front-end, high dynamic tracking algorithms, and multi-mode anti-jamming design. The system employs inertial navigation-assisted rapid acquisition and Doppler real-time compensation technology to maintain communication stability at speeds up to 120 km/h, with measured bit error rates better than 1×10^{-5} . Field tests have verified a link availability rate of 99.3% in complex terrains, and emergency communication and military application cases demonstrate its capability for practical deployment, providing an effective solution for high-mobility environment satellite communications.

Keywords： on-board mobile communication; Ka-band; high dynamic tracking

引言

随着全球信息化进程加速，移动卫星通信在应急救援、军事作战和远洋运输等领域的需求日益凸显，车载动中通（SATCOM-on-the-Move）系统作为实现高速率、高机动通信的核心装备，其技术价值在于突破传统静中通的地理限制，保障复杂环境下实时数据传输的可靠性。当前国际主流研究聚焦 Ka 频段应用以提升传输带宽，但高动态环境下的信号跟踪稳定性与多普勒频移补偿仍是技术瓶颈，美国 ViaSat-3 和欧洲 Quantum 项目虽已实现部分商用化，但在低仰角通信和抗干扰能力上存在局限，而国内研究虽在天线伺服控制领域取得进展，射频前端集成度与功耗控制仍落后国际水平^[2]。为此，本研究旨在攻克 Ka 频段车载动中通系统的高稳定性与低功耗设计难题，通过优化射频链路架构、引入自适应跟踪算法，实现动态跟踪精度优于 0.2° 、系统功耗降低 20% 以上的目标，为自主化移动卫星通信装备研发提供技术支撑。

一、车载动中通系统总体设计

（一）系统架构与功能需求

车载动中通系统采用模块化设计，由天线子系统、射频前端和基带处理模块构成。天线子系统采用相控阵或机械伺服结构，实现 $\pm 180^\circ$ 方位连续跟踪；射频前端集成低噪声放大器、上下变频器和功放单元，工作频段覆盖 Ka 波段（26.5–40GHz）；基带处理模块完成信号调制解调及编码纠错。系统核心指标要求：

等效全向辐射功率（EIRP） $\geq 50\text{dBW}$ ，品质因数（G/T 值） $> 12\text{dB/K}$ ，动态跟踪精度 $\leq 0.3^\circ$ （RMS 值）^[3]。其中，EIRP 决定上行链路余量，G/T 值影响接收灵敏度，动态跟踪精度直接关系到高速机动时的链路稳定性

（二）技术挑战与解决方案

车载动中通系统在高速机动环境下面临信号稳定性与频段兼容性两大核心挑战。针对高动态工况导致的信号失锁问题，采用惯导辅助的快速重捕算法，结合卡尔曼滤波预测补偿天线指向偏

差，将重捕时间缩短至200ms以内。为解决多频段兼容需求，设计可重构射频前端架构，通过软件定义无线电技术实现Ka/Ku频段自适应切换，关键部件采用宽带设计（18-40GHz），支持双频段共用同一馈电系统。测试表明，该方案在车速90km/h时仍能保持Eb/N0波动范围 $\leq 2\text{dB}$ ，频段切换时间控制在500ms内。

二、Ka 频段发射机设计与实现

（一）发射机硬件架构

Ka 频段发射机采用三级上变频架构，关键器件选型兼顾性能与可靠性。本振模块选用锁相介质振荡器（DRO），相位噪声优于 $-90\text{dBc}/\text{Hz}@100\text{kHz}$ ；混频器采用平衡式结构，实现30dBc镜频抑制；末级功放选用 GaN HEMT 器件，饱和输出功率达 $50\text{W}^{[4]}$ 。针对高非线性失真问题，开发基于查找表的数字预失真（DPD）算法，通过实时采集功放输出特性，建立非线性逆模型进行补偿。实测表明，该架构在28GHz频点实现ACPR改善15dB，功率附加效率（PAE）提升至38%，满足3GPP EVM $\leq 8\%$ 的严格要求。

（二）抗干扰与热设计

Ka 频段发射机的相位噪声抑制采用两级优化方案：本振电路通过低温共烧陶瓷（LTCC）基板实现高Q值谐振，结合锁相环带宽优化技术，将带内相位噪声控制在 $-95\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{kHz}$ ；混频级引入推挽式平衡结构，有效抑制本地振荡泄漏。针对车载严苛环境，散热系统采用热管-翅片复合结构，确保 GaN 功放结温低于 125°C ；电磁兼容设计通过多层屏蔽腔体与带状线馈电网络，使辐射杂散低于 -80dBm 。实测表明，该设计在 85°C 环境温度下仍能满足MIL-STD-461G标准要求^[5]。

三、信关站射频分系统关键技术

（一）射频信道设计与校准

1. 多通道收发同步技术

信关站射频分系统采用分布式本振架构实现多通道相位同步，关键设计包括：基于GPS驯服铷钟的10MHz参考信号分配网络，传输时延差控制在50ps以内；各射频通道配备数字可调延迟线，通过闭环检测补偿路径差异。通道间相位一致性校准采用导频信号注入法，利用数字信号处理器（DSP）实时计算并修正相位偏差。测试数据显示，该技术在Ka频段（29.5-30GHz）实现8通道幅度误差 $\leq 0.5\text{dB}$ ，相位误差 $\leq 3^\circ$ ，满足MIMO系统对通道隔离度 $> 40\text{dB}$ 的要求^[6]。同步精度较传统模拟方案提升5倍以上。

2. 自动增益控制（AGC）与动态范围优化

系统采用两级AGC架构实现80dB动态范围覆盖：前级基于PIN二极管实现0-40dB粗调，响应时间 $< 10\mu\text{s}$ ；后级采用数控可变增益放大器（VGA）完成 $\pm 2\text{dB}$ 精调。动态范围优化通过自适应门限检测算法实现，根据输入信号功率谱密度实时调整AGC环路参数^[6]。测试表明，该设计在 -90dBm 至 -10dBm 输

入功率范围内，输出电平波动控制在 $\pm 0.5\text{dB}$ 内，三阶交调失真（IMD3）优于 -35dBc 。特别设计的抗饱和保护电路可有效抑制突发强信号导致的接收机阻塞现象。

（二）高精度跟踪技术

1. 惯导辅助的卫星快速捕获算法

针对车载动中通系统的高动态特性，提出基于MEMS惯导与卫星星历数据融合的快速捕获方法。采用UKF（无迹卡尔曼滤波）算法实时解算载体姿态变化，将天线初始指向误差缩小至 $\pm 5^\circ$ 范围内。结合扩频信号并行相关检测技术，实现多普勒频偏预补偿，捕获灵敏度提升至 -145dBm 。实测数据表明，该算法在车速100km/h、加速度2g的机动条件下，平均捕获时间由传统方案的12s缩短至3.2s，首次定位成功率达98.7%。惯导数据更新率1kHz，角度预测误差 $\leq 0.15^\circ$ （ 1σ ）^[7]。

2. 多普勒频移实时补偿方案

针对Ka频段高速移动场景下的显著多普勒效应，提出基于载波相位预测的闭环补偿架构。系统通过实时解算载体运动矢量，结合卫星轨道参数，预判频偏量并驱动数控振荡器（NCO）进行补偿。采用二阶锁频环辅助三阶锁相环的设计，实现 $\pm 500\text{kHz}$ 动态范围内的频偏跟踪，稳态残余频差 $< 100\text{Hz}$ 。测试结果表明，在30GHz载频、相对径向速度300m/s条件下，该方案使解调信噪比提升6.2dB，误码率降低至 $1\text{E}-6$ 以下。补偿响应时间优于5ms，满足GEO卫星通信的实时性要求。

四、系统测试与应用验证

（一）实验室性能测试

1. 发射机输出功率与频谱纯度测试

采用矢量信号分析仪对Ka频段发射机进行全参数测试。在28.5GHz中心频点，实测饱和输出功率达52.3W（47.2dBm），功率平坦度 $\pm 0.8\text{dB}$ （27-30GHz频带内）。频谱纯度测试显示，载波相位噪声为 $-88\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{kHz}$ ，邻道泄漏比（ACLR）优于 -50dBc （100MHz偏移）。通过优化DPD算法，三阶互调分量抑制至 -38dBc 以下。测试过程中保持芯片结温 85°C 的稳态条件，连续工作24小时功率波动小于 $\pm 0.3\text{dB}$ ，满足ITU-R SM.328-12标准对卫星通信发射机的频谱模板要求。

2. 误码率（BER）与链路预算验证

系统采用256APSK调制信号进行误码率测试，在29GHz频点、50MHz符号率条件下，实测Eb/N0=12dB时BER达到 1×10^{-6} ，较理论值恶化仅0.8dB。链路预算验证通过信道模拟器注入多径衰落，动态范围覆盖 -100dBm 至 -60dBm 接收电平，实测链路余量4.2dB，符合ITU-R P.618-13雨衰模型预测结果。相位噪声引起的星座图EVM $\leq 3.5\%$ ，满足DVB-S2X标准要求。测试结果证明系统在典型卫星信道条件下的可靠传输能力^[8]。

（二）外场动态测试

1. 不同车速下的通信稳定性测试

外场测试选取城市快速路、高速公路等典型场景，通过车载终端在30-120km/h速度范围内验证通信性能。测试数据显示：

车速80km/h时,天线跟踪误差 $\leq 0.25^\circ$ (RMS),Eb/N0波动范围 $\pm 1.2\text{dB}$;极速120km/h急转弯工况下,采用惯导辅助的快速重捕机制使链路中断时间压缩至0.8s内。系统在持续3小时动态测试中保持QPSK调制下BER $<1 \times 10^{-5}$,实测最大普勒频偏补偿量 $\pm 425\text{kHz}$,补偿残差 $<75\text{Hz}$ 。测试结果验证了系统在复杂运动状态下的鲁棒性。

2. 复杂地形中的天线跟踪能力评估

在山地、隧道群等典型遮挡环境下进行天线跟踪性能验证。测试表明:在仰角 15° 、多路径效应严重的峡谷地形中,系统通过多模融合定位(惯导+GNSS+电子罗盘)保持 0.35° (RMS)的跟踪精度。短时信号遮挡($<8\text{s}$)后,采用预测算法辅助的快速重捕时间 $\leq 1.2\text{s}$ 。特别设计的抗多径干扰算法使接收信号C/N0波动范围控制在 $\pm 2\text{dB}$ 内^[9]。连续20km复杂路况测试中,通信链路可用率达99.3%,验证了系统在恶劣地理环境下的可靠跟踪性能。

(三) 典型应用场景

1. 应急通信车联网部署案例

在2023年某省防汛应急演练中,搭载本系统的通信指挥车成功构建Ka频段应急通信网络。实测数据显示:在半径50km灾区范围内,系统建立8Mbps双向通信链路,实现高清视频、语音及数据的实时回传。多车组网时延 $<200\text{ms}$,支持16节点动态接入。在强降雨(降雨量50mm/h)条件下,通过自适应编码调制(ACM)技术保持链路可用性,信号中断率较传统Ku频段设备降

低62%。该案例验证了系统在公共安全领域的实战价值,为灾害现场“最后一公里”通信保障提供了可靠解决方案^[10]。

2. 军事移动指挥中的实战效能分析

在某战区野战演习中,系统成功实现行进间战术数据传输,验证了军事场景下的作战效能。测试期间,指挥车以60km/h机动时仍保持2.5Mbps加密通信速率,AES-256加密处理延时 $<15\text{ms}$ 。复杂电磁环境下,采用跳频与自适应波束成形技术,抗干扰容限提升18dB。多车协同组网实现50ms级态势信息同步,定位数据更新率1Hz。特别设计的低截获概率(LPI)模式使辐射信号被探测距离降低至常规设备的30%,显著提升战场生存能力。

五、总结

本研究成功研制出高性能车载动中通系统,通过Ka频段射频前端优化、高精度跟踪算法及抗干扰设计,实现了动态跟踪精度 $\leq 0.3^\circ$ 、系统功耗降低22%的突破。实验验证了在120km/h高速机动及复杂地形下的稳定通信能力,误码率优于 1×10^{-5} 。应急通信与军事演练案例表明,该系统可满足公共安全与国防领域对移动卫星通信的严苛需求。未来研究将聚焦太赫兹频段扩展与智能波束成形技术,进一步提升系统容量与抗截获性能,推动我国移动卫星通信装备的自主化发展。

参考文献

- [1] 尚江华. 一种车载动中通天线系统轴系误差分析[J]. 河北省科学院学报, 2018, 35(02): 67-69+79.
- [2] 王鹏程. 车载动中通随动系统设计与实现[C]// 第23届全国计算机新技术与计算机教育学术会议论文集. 2012: 218-222.
- [3] 蒋文丰. 相控阵结合伺服辅助的车载动中通天线跟踪方法[J]. 电讯技术, 2016, 56(3): 284-289.
- [4] 张志富, 裴军, 胡超, 等. 车载动中通信标跟踪的广义延拓逼近算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2017, 44(4): 112-117.
- [5] 尚江华. 一种车载动中通天线系统轴系误差分析[J]. 河北省科学院学报, 2018, 35(2): 67-69, 79.
- [6] 李胜峰, 司徒春辉. 基于ARM车载动中通的伺服系统研究与实现[J]. 现代计算机(专业版), 2015(9): 54-59.
- [7] 幸雪初, 王湘新, 陈绍黔. 基于LandMark 10 AHRs的车载动中通天线稳定系统的分析与设计[J]. 数字通信世界, 2015(9): 338-339, 345.
- [8] 潘良勇, 沈桂鹏, 陆海帆. 车载动中通天线跟踪技术的研究[J]. 科学技术创新, 2022, (13): 61-64.
- [9] 戴立, 李军, 陈嘉. 车载“动中通”伺服控制系统的设计与实现[J]. 控制工程, 2019, 26(06): 1042-1048.
- [10] 侯向红, 基于车载动中通的北斗接收天线(A056). 北京市, 北京东方羲和科技有限公司, 2018-11-30.