 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i7.11400

Analysis of Performance Enhancement in Ultra-short Wave Communication Transmission in Mountain Field Battle Scenarios

Jiangtai Xiang Mingzhe Li Yu Wang

31619 Unit, Jurong, Jiangsu, 212400, China

Abstract

In response to the problems such as limited line-of-sight for ultra-short wave communication, significant multipath effects, and forest canopy obstruction in a mountainous and canyon environment, a collaborative solution combining terrain-adaptive antenna configuration, RAKE receiving with sequential adaptive equalization, closed-loop power control, and hybrid resource scheduling was proposed. An exercise was conducted from Jiuhua Tea Field to Yaowan Reservoir. The results showed that compared with the current system, the payload rate increased from 9.6 to 13.0 kbps, the bit error rate dropped to 4.2%, the coverage radius expanded to 4.0 km, the average received signal-to-noise ratio increased by 3 dB, the link availability rate increased to 88%, and the available rate under adjacent frequency interference increased to 10.6 kbps. The solution significantly enhanced throughput, coverage, and robustness without changing the spectrum planning and power supply system, and has good feasibility and promotion value.

Keywords

mountain communication; ultra-short wave; multipath suppression; terrain-adaptive antenna; power control and resource scheduling

山地野战场景超短波通信传输性能提升探析

向江太 李明哲 王羽

31619 部队，中国 · 江苏 句容 212400

摘 要

针对某高山峡谷环境中超短波通信视距受限、多径显著、林冠遮蔽等问题，提出地形适配天线配置、RAKE接收串联自适应均衡、闭环功率控制与混合资源调度的协同方案，并在九华茶场至窑湾水库开展演练。结果显示，相比现用体制，净荷速率由9.6提升至13.0 kbps，误码率降至4.2%，覆盖半径扩大至4.0 km，平均接收信噪比提升3 dB，链路可用率提升至88%，邻频干扰下可用速率提高至10.6 kbps。方案在不改变频谱规划与供电体系的前提下显著增强吞吐、覆盖与稳健性，具有良好落地性与推广价值。

关键词

山地通信；超短波；多径抑制；地形适配天线；功率控制与资源调度

1 引言

超短波在山地野战中承担指挥控制与机动协同任务，常工作于三十至三百兆赫频段，传播以视距为主 [1]。峡谷与山脊导致直射通道频繁中断，绕射损耗增大，林冠含水率高使第一菲涅尔区受阻，多径与时变遮挡使链路门限难以维持。现用系统多采用固定带宽与恒定编码，缺少自适应机制与柔性跳频，导致在窄带与同频干扰并存场景下，吞吐与可用性显著受限。为面向营连级在某高山地带的持续通联需求，亟须在天线构型、信号处理与资源调度层面形成协同优化思路，使能量有效耦合至通视窗口，抑制符号间干扰与多径起伏，并在受限频谱内提升抗干扰与接入效率。本研究针对上述痛点提出一套可工程化的综合方案，并在真实机动通联中开展验证，以为山地保障体系提供可推广路径。

2 山地野战场景超短波通信现状与问题分析

2.1 山地野战场景超短波通信的环境特性与挑战

在山地野战通信任务中，超短波常选用 30–300 MHz 频段，传播方式以视距为主，这一物理特性把地形起伏与地物分布的影响放大为传输瓶颈。沿高程 2000–3200 m、坡度 25–40° 的某峡谷样区，山脊把波束截断，近地绕射受限，能量转而依赖山脊绕射及山谷反射，随之出现多径效应，即不同路径分量叠加导致的频率选择性衰落。针叶林与灌丛构成高含水率介质层，压缩有效视距，同时对第一菲涅尔区造成遮挡，第一菲涅尔区指发射与接收之间能量耦合的椭圆形空间体积，由此链路裕度长期偏低。

【作者简介】向江太（1986–），男，中国江苏句容人，本科，从事无线电通信研究。

2.2 现有传输方案的性能瓶颈分析

鉴于某高山训练场的复杂地形与密集电磁源分布，本研究把某合成旅现用超短波系统在典型机动通联中的实测表现作为分析对象，围绕抗干扰能力、覆盖范围以及数据传输速率三个维度展开分析。见表 1，可见在非视距与强多径叠加的链路环境中，平均速率仅约为平原条件的 60%，误码率显著攀升至高位，这一现象与接收端信噪比下降以及邻频干扰门限被提前触发密切相关。从链路几何与能量分布角度来看，山脊遮挡把直射通道切断并且放大了绕射损耗，导致覆盖半径明显收缩，进而造成链路可用率不稳定。需重点关注的是，现用制式采用固定带宽与恒定编码，缺乏自适应编码调制以及柔性跳频配置，使得在窄带与同频干扰并存的场景下，吞吐能力与有效负载率被进一步压缩，语音与数据并发调度出现相互挤占，从系统层面加剧了性能瓶颈的外显化。

表 1 某部队现有超短波通信系统山地场景性能测试表

指标	山地场景测得值	平原参考值	测试说明
数据传输速率	9.6 kbps	16.0 kbps	带宽 25 kHz，FSK 数据体制，双向小包业务连续发送测得
误码率	15.0%	4.0%	采用随机比特序列，基于帧校验统计得到，接收端前向纠错关闭
覆盖半径	3.2 km	5.6 km	发射功率 25 W，车载鞭状天线高度 1.5 m，端到端可用链路定义为丢包率低于 20%
平均接收信噪比	8 dB	14 dB	接收带宽 25 kHz，积分时间 1 s，统计 10 min 的均值
链路可用率	71%	93%	以 10 min 窗口统计 ACK 成功率，移动台速率 20 km/h 的连续通联场景
干扰下可用速率	7.2 kbps	13.8 kbps	人为引入邻频干扰源，相对电平 -6 dB，固定频点工作，无跳频
邻频干扰触发门限	-88 dBm	-94 dBm	前端过载条件下评估门限，以下一帧解调失败率超过 30% 作为触发判据

3 山地野战超短波通信传输性能提升关键技术方案

3.1 基于地形适配的天线优化配置方案

面向该山地演训走廊的脊梁山脊与狭窄沟谷交织的传播环境，本研究把地形适配作为超短波 VHF 天线配置的首要约束，围绕海拔差、坡度分布与坡向主轴开展路径判定与点位筛选，从而把天线类型与安装参数与通视链路和绕射链路进行匹配。指挥所至脊线中继环节选用高增益定向天线作为主用方案，优先在脊线风口或鞍部设置 10 m 碳纤维桅杆，采用 9 单元八木或中等孔径对数周期天线，极化方式保持垂直，方位指向沿谷向主轴修正，以把主瓣能量集中在通视窗口并压低旁瓣耦合。进谷班组侧重机动性，选用便携短鞭或分体式折叠垂直天线，配合可调仰角支座，使辐射中心抬升至地物上沿的等高线位置；当穿越密林与碎石坡时，叠加轻质反射地网的四分之一波长垂直天线，以提升地面波耦合并减小近地遮蔽。针对多径主导的弯折沟谷，脊线侧采用较窄波束宽度的定向天线并进行方位与仰角的联合微调，必要时在二级山脊布设低功率有源中继以打通弯折段，天线部署流程设置为六个环节：数据采集与地形剖面构建、通视与绕射路径判定、天线库匹配与波束参数选取、候选点位筛选与安装高度求解、现场方位与仰角微调以及部署清单固化与标识编码。

3.2 抗多径干扰的信号处理技术应用

鉴于山地超短波链路在起伏地形与树冠遮蔽条件下呈现明显延迟扩展与相位起伏，本研究把抗多径的两类关键机制进行协同设计，即在接收端构建 RAKE 接收与自适应均衡的串联架构。RAKE 接收把可分辨路径在指状支路内完成延迟对齐与幅相加权，并以最大比合并策略提升等效信噪比，由此把能量从离散回波中重新聚集。等效单径化之后，再把分数间隔线性均衡器置于解调前级，用以抑制残余符号间干扰，同时兼顾定时漂移与窄带干扰的抑制需求。权值更新遵循最小均方准则的梯度下降形式，为保证在时变信道下保持收敛稳定，先以训练序列完成初始化与粗估计，随后转入决策导向更新，并结合信道质量指示实施步长自调整。

$$w_{k+1}=w_k+\mu_k x_k e_k^*$$

其中，w_k 表示第 k 次迭代的均衡器权值向量，μ_k 为自适应步长，x_k 为接收端输入向量，e_k 为误差信号且由期望符号与均衡输出之差得到，$*$ 表示共轭运算。

从工程落地角度来看，可把 RAKE 的指状数量依据实测功率时延分布进行裁剪，常见山谷通道路段的有效时延扩展处于数微秒量级，选用选收式合并即可避免噪声放大。等效信道估计可借助短导频块完成初始获取，并在机动行进中依靠卡尔曼滤波对路径增益与延迟进行跟踪，从而把均衡级的阶数与更新频率控制在无线电台可承受的算力范围内。由此形成能量合并与干扰抑制互补的处理链路，在山地复杂多径背景下实现链路稳健传输，预期把误码率压低至 5% 以下 [2]。

3.3 动态功率控制与信道资源调度策略

鉴于山地信道时变性与遮挡交替出现，构建以实时信道质量为核心的闭环功率控制机制，把接收端测得的信号强度、信噪比以及链路质量指示三类指标作为触发量，经中继或网控节点回传，发射端按内外环双层策略进行功率调整。外环依据业务类型设置门限与目标误块率，对指挥语音设定更高目标，内环采用小步进与滞回控制，限定单次调整幅度与最小保持时长，抑制因地形阴影快速变化造成的震荡。为适配山脊与峡谷的路径损耗差异，引入数字高程模型驱动的初始功率估计，把地形衰落先验纳入链路预算并与在线测量融合。链路质量低于门限且功率触顶时，调度模块触发邻近

节点接力转发，维持命令链路的可用性。

在信道资源调度层面，结合该高山训练带的营连协同通信任务构型，构建频率划分加时隙编排的混合体制，把 12.5 kHz 窄带载频用于跨单元覆盖，把时隙化短突发用于高优先级指挥控制。调度规则选用按业务级别加权的公平排队，配合监听后发与预约握手信令，降低同频竞争概率。进一步依据探测信标构建干扰图，把地形遮蔽作为可复用边界，进行地理复用与动态借频，营级网控节点在北斗授时下发统一帧结构与优先级重排策略，使跨坡面链路的同步与接入保持稳定 [3]。

4 山地野战超短波通信优化方案效果评估

4.1 实验场景设计与数据采集

对照组沿用现役体制，带宽 25 kHz 与恒定编码，车载台配 1.5 m 鞭状天线，功率 25 W；实验组在相同资源下启用地形适配天线布设、RAKE 串联自适应均衡以及功率控制与混合调度。编组设营指挥所 1 处、脊线中继 2 处、机动分队 4 个，路线覆盖九华山茶场北侧独立房延九华山山脊线经 283 高地、铜矿至窑湾水库山谷和丛林地段。

采集体系围绕链路层与业务层双线展开，把时间与空间基准对齐作为前置约束。链路层记录接收信号强度、信噪比、瞬时频偏、误块率与邻频触发标识，采样周期 1 s；业务层记录有效吞吐、端到端丢包率、语音帧到达率与时延，吞吐定义为净荷比特率。覆盖判定采用 60 s 滑动窗口丢包率不高于 20% 的口径，非视距段依靠脊线中继维持控制信令连通。干扰工况在正负 12.5 kHz 邻频布置窄带源，相对电平设定为 −6 dB，以 15 min 开关周期交替注入 [4]。

4.2 传输性能指标的量化分析

本节把实验组与对照组在相同路段与相同业务负载下的关键传输指标进行量化对比，围绕净荷速率、误码率、覆盖半径、平均接收信噪比、链路可用率以及干扰下可用速率六个维度展开，以刻画地形适配天线、RAKE 串联自适应均衡与功率控制加混合调度协同后的链路表现分布与结构性变化特征。进一步观察发现，指标对比呈现以带宽利用与稳健性协同提升为主导的改观：净荷速率相对提升 35% 并稳定在 13.0 kbps 量级，误码率收敛至 4.2%，覆盖半径扩大至 4.0 km，同时在邻频干扰加载场景下仍维持 10.6 kbps 的有效吞吐；平均接收信噪比从 8 dB 提升至 11 dB，链路可用率由 71% 提升至 88%，体现对时变遮挡与多径起伏的更强适配性。为便于横向审视，下表汇总两组配置在统一统计口径下的指标量化结果与相对变化幅度，用以支撑对各技术环节协同收益的综合判读 [5]。

4.3 方案落地性与实际应用价值总结

基于该通信保障链条与既有台站配置，本研究从改造成本、操作负载与保障配套三个维度评估方案落地性。天线优化部分把 9 单元八木、中等孔径对数周期与折叠垂直天线做成模块化套件，配套快装卡具和预调馈线，直接兼容 25 W 车载或背负式 VHF 电台，改造以软件升级加外设配套为主，单台电台的新增投入较原型链路配置下降约 10%，备件通用比率超过 80%，便于营连级器材保障进行周转配置。RAKE 串联自适应均衡在具备 DSP 或 FPGA 余量的现役基带上以固件方式下发，节点侧无需更换前端部件，现场升级时间控制在单节点 30 min 以内；功率控制与混合调度集成到营级网控软件的模板化参数页，保持 12.5 kHz 信道划分与北斗授时体系不变，从操作界面到信令流程维持一致性。

5 结语

研究构建了地形适配天线、RAKE 接收串联自适应均衡以及闭环功率控制与混合调度的协同框架，并在典型峡谷路段完成外场验证，体现出在吞吐、覆盖、稳定性与抗干扰方面的显著综合收益。方案以模块化外设与固件升级为主，改造轻量，训练周期短，适配现有供电与授时体系，具备营连级快速铺开的可行性。后续将结合地形先验与联机测量开展更细粒度的链路预测，引入自适应编码调制与地理复用优化，并扩展至复杂天气与更大范围地形。

参考文献

[1] 孙俊,盛伟,屈家安,颜坤,周北平.面向6G无人机通信网络的信号传输机理研究与分析[J].无线电通信技术,2025,51(01):86-95.

[2] 孙润智.灾害场景下单兵应急救援通信装备中可穿戴柔性天线的研究[D].导师：于臻;盛强.华北科技学院,2025.

[3] 周彦涛,张力鹏.超短波无线电通信抗干扰技术及其发展趋势研究[A].天津市电子工业协会,天津市电子工业协会2025年年会论文集[C].天津七一二通信广播股份有限公司;:天津市电子工业协会,2025:68-71

[4] 卫晨瑶,施丽琴,宋曦,叶迎晖,卢光跃.无源RIS与有源中继辅助的短包通信系统性能研究[J].信号处理,2025,41(10):1681-1692.

[5] 李洪敏.浅议超短波无线电通信抗干扰技术的发展趋势[J].中国宽带,2024,20(10):100-102.