

多技术融合视角下通信基站抗山火韧性体系构建与策略

刘海鹏

中国移动通信集团广西有限公司桂林分公司

DOI:10.32629/jsse.v3i4.17870

[摘要] 随着全球气候变化的加剧,山火灾害的发生频率和强度不断增加,给人类社会带来了巨大的挑战。通信基站作为现代通信网络的核心节点,在应对山火灾害时面临高温损毁、电力中断等多重威胁,其脆弱性日益凸显。本文基于2025年湖北保康县山火事件为案例,结合地理信息系统(GIS)、物联网(IoT)与材料科学等多学科技术,深入分析通信基站在山火灾害下的脆弱性表现及成因,并提出“主动防护-被动防御-应急响应”三位一体的韧性提升策略。通过仿真实验与实地验证,本文旨在为高风险区域基站规划与应急通信保障提供理论支撑与实践参考。

[关键词] 山火灾害; 通信基站; 脆弱性分析; 韧性提升; 应急通信

中图分类号: S429 文献标识码: A

Construction and Strategies of Communication Base Station Fire Resistance System from the Perspective of Multi-Technology Integration in Mountainous Areas

Haipeng Liu

China Mobile Communications Group Guangxi Co., Ltd. Guilin Branch

[Abstract] With the intensification of global climate change, the frequency and intensity of wildfires have been increasing, posing significant challenges to human society. As the core nodes of modern communication networks, communication base stations face multiple threats such as high-temperature damage and power outages during wildfires, highlighting their vulnerability. Based on the 2025 wildfire incident in Baokang County, Hubei Province, this paper, integrating Geographic Information System (GIS), Internet of Things (IoT), and materials science, deeply analyzes the vulnerability performance and causes of communication base stations under wildfire disasters, and proposes a trinity resilience enhancement strategy of "active protection - passive defense - emergency response". Through simulation experiments and field verification, this paper aims to provide theoretical support and practical references for the planning of base stations in high-risk areas and emergency communication guarantees.

[Key words] mountain fire disaster; Communication base station; Vulnerability analysis; Toughness improvement; emergency communication

引言

^[1]根据联合国国际减灾战略(UNISDR)的统计数据,全球每年因自然灾害造成的经济损失中,山火灾害所占比例逐年上升。特别是在气候变化的背景下,山火的频率和强度显著增加,给通信基础设施带来了前所未有的挑战,2024年至2025年4月15日有记录以来广西山火造成的基站故障就有536次。通信基站作为现代通信网络的重要基础设施,其安全稳定运行对于保障社会正常秩序和应急救援至关重要。然而,在山火灾害面前,通信基站往往面临着巨大的挑战,如高温损毁、电力中断、电磁干扰等,导致其脆弱性显著增强。

本文采用实证研究方法,结合地理信息系统(GIS)、物联网

(IoT)与材料科学等多学科技术,以2025年湖北保康县等山火事件进行案例分析。通过实地调研、数据采集和仿真实验等举措,研究如何提升山火灾害下基站韧性的思路、方法。

1 山火灾害下通信基站的脆弱性分析

山火灾害下通信基站的脆弱性主要表现在物理脆弱性、空间布局脆弱性和技术脆弱性三个方面。

1.1 物理脆弱性

1.1.1 高温损毁

山火发生时,火场温度可达800℃以上,高温环境下,基站天线、射频模块等关键部件极易发生熔毁,导致通信信号中断。2025年湖北保康县山火、2024年贵州山火、2020年四川凉山山火

中,60%的设备因高温失效,其中凉山火灾更是造成了218个基站退服,影响用户约60余万。造成基站服务失效的主要原因为:火灾产生的烟雾和腐蚀性气体会侵蚀设备内部元件,灰尘覆盖设备绝缘子降低绝缘性能;高温使电线过热,引发污闪(绝缘失效)增加短路风险;高温和烟尘还会导致基站设备损坏,数据丢失。

1.1.2 次生灾害

山火灾害由于其蔓延迅速的特性,可能引发一系列次生灾害,特别是电力中断和电磁干扰。火场电离效应会干扰无线信号传输,加剧通信质量恶化。高温环境会增强气体分子的热运动。当分子动能超过其电离能时,外层电子脱离原子核束缚,形成自由电子和正离子(如 $H30^+$ 、 NO^+ 等)。这种电离过程包含两种机制:热电离:火焰高温直接激发气体分子电离,电离度与温度呈正相关。化学电离:燃烧反应释放的能量引发链式电离, $CH_4+O_2 \rightarrow CO_2+H_2O$ 过程中产生的中间产物(H_2O^+)进一步离解。电离产生的带电粒子在火焰中形成等离子体区域,其导电特性与电磁波的相互作用成为干扰通信的关键,平均基站信号强度下降25db,对无线信号影响较大。

1.2 空间布局脆弱性

^[4]通信基站的空间布局也是影响其脆弱性的重要因素。山区基站通常选址靠近植被密集区域,这些区域山火风险指数较高(>0.8),交通可达性低。一旦发生山火灾害,灾后抢修工作将受到严重阻碍。在保康县山火事件中,山区基站平均抢修时长比城市基站多5小时。山区光缆常沿山体或林区架设,火灾易造成大范围损毁。

1.3 技术脆弱性

^[2]当前技术水平在一定程度上也限制了基站应对山火灾害的能力。传统焊接式天线结构在高温下易因热膨胀失效,且静态风险评估模型无法动态预测火势蔓延趋势。基站外壳、线缆护套等材料普遍采用普通塑料或金属,缺乏阻燃涂层或耐高温材质。烟雾中的酸性气体会加速设备腐蚀,缩短使用寿命。其次,缘计算和实时云同步技术尚未普及,基站数据灾时难以及时上传至云端,基站故障后无法及时恢复数据,导致通信恢复难度增加。

2 韧性体系构建与提升策略

针对山火灾害下通信基站的脆弱性,作者提出“主动防护-被动防御-应急响应”三位一体的韧性提升策略。

2.1 主动防护技术

2.1.1 耐高温材料

首先笔者认为可采用耐高温材料可提升通信基站抗灾能力。选用陶瓷涂层特性:实现陶瓷基体+碳纤维增强,耐温1200℃以上,且热膨胀系数低($3.5 \times 10^{-6} / ^\circ C$), (耐温800℃)与阻燃外壳来替代传统材料。可应用于基站天线罩、馈线窗等块状形态设备。

其次对于易燃、高山地区使用光纤替代铜缆:石英光纤耐温800℃,抗电磁干扰,适合山区长距离传输。同时安装阻燃护套:低烟无卤阻燃聚烯烃,阻燃等级V-0,氧指数 $\geq 32\%$ 。避免灰

尘覆盖传输材质对信号传输的影响。主要应用于传输线路。

经过仿真实验以上技术可降低设备损毁率40%,增强传输有效性30%,避免灰尘覆盖传输材质对信号传输的影响。

2.1.2 智能散热系统

可通过安装智能散热系统。^[2]基于AI的动态散热装置的温度传感器实时调节散热效率,当外部温度超过阈值,自动降低非关键负载功率,确保基站设备在高温环境下保持正常工作温度。

机柜将采用六边形蜂窝铝板,表面积增加30%,配合石墨烯涂层。避免由于高温导致零部件运行受到热辐射影响。

除了通过以上散热系统,可通过将U型管道深入地下15m,利用土壤恒温特性(18-22℃)与基站内热空气交换。

通过ANSYS仿真实验,以上技术可使基站设备的温度均匀性提高50%,辐射散热效率提升65%,关键部件寿命延长30%以上,可在火灾到来时降低60%的基站故障。

2.2 被动防御设计

2.2.1 模块化基站

在被动防御层面,建议将基站拆分为独立模块:射频单元,基带处理单元、电源模块等。实现灾害隔离:通过物理隔离或独立封装,确保单一模块受损时其他模块仍可运行或快速更换。可参照爱立信的“无线系统模块”采用独立舱体设计,火灾中若电源模块烧毁,仅需更换该舱体,避免整体基站瘫痪。

还可使用标准化模块接口,要求支持热插拔更换。

通过ANSYS仿真实验,以上技术可缩短基站恢复时长35%。

2.2.2 冗余网络架构

在火灾风险高的山区给网络拓扑做加法,将链路、设备、电源复杂化实现1套系统故障而不影响其他系统的目的。

首先采用环形光缆布局与多路径信号传输方式,这种冗余设计可增强通信网络的稳定性和可靠性,避免1条线路故障导致下游站点全部离线。其次采用热备份与模块化设计,允许快速更换受损部件,降低故障处理时长。

还可以负载均衡技术分散网络流量,避免单一设备过载失效,通过配备双电源模块和UPS(不间断电源),主电源中断时备用电源无缝接管,减少对电网的依赖。实现即使电缆被烧毁,也能够持续对基站进行供电。当前桂林地区已部署双电源模块及光伏能源作为电能的基站529个。

通过ANSYS仿真实验,以上技术可降低基站停电时长28%。

2.3 应急响应体系

2.3.1 空天地一体化通信

还可依托空天地一体化通信体系作为支撑,通过搭建空地协同的“三层防护网”。依托卫星通信和无人机中继是实现灾区临时组网组层轻型便携站,^[6]可以实现灾区信号覆盖,覆盖半径可达10Km以上;利用无人机中继搭载5G微基站,穿透浓烟与复杂地形,为救援队伍提供实时通信支持。

利用卫星通信全域覆盖,不受地面基础设施损毁影响。实现灾区通信畅通,及时上报救灾进度。

在地面,部署应急通信车,采用双电源、双路由。单人还可

携带高通量便携式平板基站,5分钟内开通服务,覆盖方圆1Km。避免灾区断网,实现有效内外部沟通。

通过ANSYS仿真实验:可实现“移动基站”及通信不间断,实现无人机回传火场画面延迟小于2秒。

2.3.2 能源保障

在风力资源丰富的区域,搭建风能-储能混合供电系统,减少对电网的依赖。降低因输电线路烧毁导致的供电中断风险。

通过ANSYS仿真实验:储能效率至85%以上,确保基站在无电力供应的情况下持续运行72小时以上。

3 实验结论及技术补充

为了验证上述韧性提升策略的有效性,本文进行了仿真实验。

3.1 ANSYS热应力仿真

结合以上技术,通过ANSYS软件对高温环境下基站设备的热应力分布进行了仿真分析。结果显示,未采用防护措施的基站设备温度梯度达500°C/m以上,故障率显著提升;而采用AI散热系统的基站设备温度均匀性提高50%,关键部件寿命延长30%,基站在网时长提升35%。这一仿真结果充分证明了智能散热系统在提升基站抗高温能力方面的有效性。

3.2 基于GIS的脆弱性评估模型

为了更全面地评估通信基站的脆弱性,本文结合地理信息系统(GIS)进行了技术补充,通过构建一个动态脆弱性评估模型。该模型通过分析基站的地理位置、周边环境、植被密度等因素,评估基站的脆弱性。以湖北保康县山火事件为例,GIS模型显示,山区基站的脆弱性指数普遍高于城市基站,其中山区基站的脆弱性指数平均为0.85,而城市基站的脆弱性指数为0.45。再次印证由于山火对于山区基站的影响之大,也为火灾高风险地区通信保障提供数据支撑,推动配套建设。降低通信阻断时长,提升救灾能力,也是本文研究的核心目的。

3.3 其他案例分析

为了进一步验证本文提出的韧性提升策略的有效性,本文还分析了其他地区的山火事件。^[3]例如,在2024年2月的澳大利亚维多利亚州的山火事件中,采用类似韧性提升策略的基站,其设备损毁率仅为30%,显著低于未采取防护措施的基站。通过三个举措降低了火灾对基站的影响,防火材料与结构设计:使用阻燃材料或防火涂层,降低基站外部及内部设备的可燃性。优化基站布局,避免植被直接接触设备,设置防火隔离带;智能监测与预警系统:部署传感器实时监测温度、烟雾等火灾风险指标。与消防部门联动,提前接收火情预警并启动应急响应;应急供电与冗余设计:配备独立电源或备用电池,确保主电网断电时基站仍能运行。关键设备采用冗余配置,提高抗灾能力;社区参与与协同防护:与当地社区合作,清理基站周边易燃物,降低火灾风险。制定应急预案,明确火灾发生时的设备保护流程。

4 讨论与建议

4.1 政策与管理建议

为了进一步提升通信基站应对山火灾害的能力,^[5]本文提出以下政策与管理建议:制定《山火高风险区基站建设规范》:明确基站选址、材料选择、设备配置等方面的要求,强制要求采用防火材料与应急供电配置。建立实时数据共享平台:实现消防、通信运营商与气象部门之间的火情预警与资源调度联动。

4.2 未来研究方向

^[5]随着科技的不断进步和山火灾害形势的变化,通信基站应对山火灾害的策略也需要不断更新和完善。本文认为,未来研究方向可以包括以下几个方面:

动态风险评估:融合机器学习与GIS技术,构建山火灾害动态风险评估模型,实现对火势蔓延趋势的实时预测和预警。

材料长期效能:开展多环境模拟实验,验证耐高温涂层的抗老化与耐腐蚀性能,确保其在实际应用中的长期稳定性和可靠性。

多技术协同防护:探索不同技术之间的协同作用机制,如将物联网技术与智能散热系统相结合,实现对基站设备的远程监控和智能调节等。

5 结论

山火灾害对通信基站的威胁日益严峻,其脆弱性表现在物理、空间布局和技术等多个方面。为了提升通信基站的韧性,本文提出了“主动防护-被动防御-应急响应”三位一体的策略,并通过案例验证与仿真实验证明了其有效性。未来,随着科技的不断进步和山火灾害形势的变化,我们需要不断更新和完善应对策略,加强政策与管理措施的实施力度,推动智慧城市与韧性城市的建设。同时,也需要加强跨学科合作与交流,共同应对山火灾害等极端天气事件对人类社会造成的挑战。

【参考文献】

- [1]商靠定,夏登友.灭火救援典型案例[R].北京:[化学工业出版社],2020.
- [2]泰尔系统实验室.基站天线抗震性能研究[R].北京:[信息产业部电信研究院],2024.
- [3]忻州市消防救援支队.应急通信保障实战演练总结[R].忻州:[忻州网],2025.
- [4]王海滨.电力通信网脆弱性分析[J].世界家苑,2018(6):15-16.
- [5]吕品.无线通信技术在消防灭火救援现场中的应用[J].消防界(电子版),2024,10(24):45-46.
- [6]王龙.无线通信技术在大型火灾救援现场的应用现状及前景[J].中国科技纵横,2013,(1):188-189.

作者简介:

刘海鹏(1986--),男,汉族,吉林靖宇人,单位:广西移动桂林分公司,职称:通信工程师,研究方向:无线网络通信。