 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i4.10051

Application of New Communication Technology in Fire Fighting Command Decision-making under Extreme Conditions

Ronghui Yan

Emergency Communication and Vehicle Service Brigade, Hainan Fire and Rescue Corps, Haikou, Hainan, 571100, China

Abstract

Addressing extreme firefighting scenarios involving base station failures, terrain obstructions, and intense interference, this study proposes a command communication system integrating airborne-ground Mesh access, portable satellite backhaul, and edge computing. Methodologically, a comprehensive platform constructed within combustion chambers, smoke corridors, and shielded darkrooms replicates forest terrain undulations and high-rise building response protocols. Key metrics including coverage, connectivity, and service capacity are collected to validate dual-path adaptive switching between public networks and satellite communications. Results demonstrate: end-to-end video transmission latency within buildings remains below 500ms via single-channel links, satellite backhaul latency stays under 2 seconds, and command transmission success rate reaches 98%. Comparative analysis shows response time reduced from 15 minutes to 3 minutes, resource allocation accuracy improved from 70% to 92%, and rescue time shortened by 25%. The system maintains continuous command linkages during public network failures, significantly enhances decision-making efficiency, and provides reliable communication infrastructure for cross-regional coordination.

Keywords

Mesh ad hoc network; satellite communication; edge computing; firefighting under extreme conditions; command and dispatch efficiency

新型通信技术在极端条件灭火指挥决策中的应用

严荣辉

海南消防救援总队应急通信和车辆勤务大队，中国 · 海南 海口 571100

摘　要

面向基站失效、地形遮蔽与强干扰交织的极端灭火场景，提出由空地一体Mesh接入、便携式卫星回传与边缘计算组成的指挥通信体系。方法上，在燃烧舱、烟雾走廊与屏蔽暗室构建的综合平台内，复现林带起伏与高层建筑处置脚本，采集覆盖、连通与业务承载等指标，并验证公网与卫星双路径自适应切换。结果表明：楼内单路视频端到端时延不超过500 ms，卫星回传端到端时延控制在2 s以内，指令传输成功率达到98%；在统一口径对比中，指令响应时间由15 min压缩至3 min，资源调度准确率由70%提升至92%，救援时间缩短比例达25%。结论认为，该体系可在公网瘫痪条件下保持连续可用的指挥链路，显著提升决策效率，并为跨区域协同提供可靠通信底座。

关键词

Mesh自组网；卫星通信；边缘计算；极端条件灭火；指挥调度效率

1 引言

极端条件下的灭火行动常伴随地形遮蔽、设施损毁与强电磁噪声，传统公网与常规对讲机在覆盖、抗扰与带宽上暴露短板：林区有效覆盖长期约 30%，震后基站退服与同频拥塞使中断率逼近 45%。面对需要稳定承载语音、视频与多传感的指挥闭环，通信体系必须具备自组网、抗毁性、低时延与多模态承载能力。本研究以空地一体 Mesh 为现场接入域，以便携式卫星回传为跨域骨干，叠加边缘计算与 QoS 控制，并辅以身份鉴权与加密，形成一个在基站失效与拥塞条件下仍可持续运行的指挥通信方案 [1]。研究意义在于用可落地的系统工程把前线作战单元联成一体，缩短指挥链路，提升资源配置的准确性，为跨区域协同与常态化演训提供可复用技术底座。

【作者简介】严荣辉（1986—），男，中国福建漳州人，本科，中级，从事通信技术应用研究。

2 极端条件灭火指挥通信的现状与需求分析

2.1 极端条件下灭火指挥通信的现存问题

在极端灭火场景中，传统公网蜂窝与常规对讲机暴露出覆盖、抗干扰以及带宽三类共性短板。鉴于森林火灾地形起伏与植被遮蔽，山区公网有效覆盖常年维持在约 30%，高层建筑核心筒与地下空间同样形成深度盲区；地震次生火灾叠加基站退服与强电磁噪声，进一步放大链路脆弱性，现场统计显示电磁干扰触发的通信中断率接近 45%。需重点

关注的是，视频侦察与多传感信息上报对上行带宽与时延稳定提出更高要求，而公网在拥塞条件下难以持续承载实时视频，对讲机受限于 12.5 kHz 窄带仅能进行语音与极低速数传。以 2022 年四川省西部林区一场森林火灾为例，公网瘫痪造成前线与指挥中心失联约 2 h，战术指令与物资调度出现滞后，直接把处置时机拖入被动窗口。综合上述脆弱环节，见表 1 对关键性能缺陷进行归纳，用以指向后续技术适配需求的边界条件 [2]。

表 1 极端条件下传统通信方式的性能缺陷对比表

性能维度	公网蜂窝通信	常规对讲机
覆盖能力	山区森林火灾覆盖率约 30%，高层建筑核心筒与地下空间盲区显著，震后基站退服比例可达 40%	近距直视条件可覆盖，越岭遮挡与楼层隔断显著，跨楼层与跨山谷覆盖不连续
抗干扰能力	强电磁噪声与同频拥塞下中断率约 45%，邻区切换频繁导致链路抖动	对同频互扰较敏感，强噪声环境下语音可理解度下降至约 70%
数据带宽	灾时上行可用速率小于 1 Mbps，难以稳定传输实时视频与多路传感数据	信道带宽 12.5 kHz，仅支持语音与极低速数传，不具备视频承载能力
时延稳定性	拥塞条件端到端时延大于 1 s，抖动明显导致控制指令到达时间不确定	语音路径时延约 100–200 ms，稳定性较好但不支持大包数据
组网与弹性	依赖地面基站与回传链路，缺乏自组网能力，单点故障易引发大片盲区	点对点或单中继组网，跨区域需要多级中继，链路一处损毁即产生网络分裂
能源与保障	基站市电依赖强，油机接入与维护复杂，恢复周期长	终端续航相对充足，但中继与临时转发站需要持续供电与现场维护
典型失效模式	基站退服与信道拥塞叠加导致接入失败率升高与业务抢占失灵	中继损毁或遮挡导致语音覆盖碎片化与通信窗口不稳定

2.2 新型通信技术的适配需求与应用潜力

面向极端条件灭火指挥，通信体系需在基站失效、地形遮蔽与多源干扰并存的情境下仍能把作战单元联成一体。结合指挥链路的连续性要求，关键能力落在自组网能力、抗毁性、低时延以及多模态数据传输与计算卸载四个方面。自组网指节点可自动发现邻居并进行多跳路由重构，抗毁性指在节点损毁和链路衰落时维持网络拓扑稳定，低时延指挥控闭环需要把语音指令与传感遥测快速送达，多模态传输与计算卸载要求把视频、环境参数和位置信息同步上传并在近端完成压缩与筛选。围绕上述需求，Mesh 自组网选用分布式拓扑与链路质量驱动的动态选路，把无人机、车载平台与手持终端组织为多跳通道，得以覆盖无基站区域并容纳节点移动；卫星通信把前线汇聚节点与省级或国家级指挥中心连成远距通道，弥补超长链路与跨区域调度；边缘计算把视频编码、事件检测与业务优先级划分前移到现场网关，凭借本地处理降低回传负荷并提升关键业务的可达性 [3]。

3 新型通信技术在灭火指挥决策中的关键应用场景与实现方法

3.1 基于 Mesh 自组网的现场多节点通信协同机制

鉴于极端火场中基础设施易受损且电磁环境复杂，Mesh 自组网把接入与转发职能分散到每个节点。网络采取分布式拓扑，节点在发现邻居后依据链路质量与跳数等度量开展自动路由选择，并在链路衰退时进行旁路切换，把单点失效的影响降低。面向灭火场景，可把节点按空地一体进行配置。

围绕数据交互机制，本研究把位置、视频与环境监测划入分级业务队列，节点依靠链路状态信息传播与更新路由度量，边缘侧在拥塞时触发速率自适应与队列整形，把高优先级业务优先送上低时延路径；汇聚节点开展时间同步、身份认证与端到端加密，指挥端再把调度指令定向下发至指定小组。

3.2 融合卫星通信的跨区域指挥指令传输方案

在山地森林火灾、城市高层外墙火势扩散以及地震后大范围停电断网的情境中，地面蜂窝与地面中继常被地形遮挡或设施损毁所影响，指挥链路出现空窗。卫星通信作为独立于地面基础设施的广域链路，能够把地面覆盖盲区补齐，尤其在跨行政区域调度与长距离回传上发挥门到门连接作用。考虑卫星链路受限于回波时延与带宽，方案把控制指令与态势数据进行分层承载，采用低地轨道 LEO 作为主干承载以压缩时延，地球同步轨道 GEO 作为冗余备份来维持连续性，并对窄带上行配置强纠错与自适应编码以提高抗干扰能力 [4]。

3.3 AI 辅助的通信数据实时分析与决策支持模块

面向高温与结构遮挡叠加的通信场景，AI 辅助模块部署在边缘计算节点与指挥端之间，承担把链路数据转化为可用情报的工作。模块把汇聚的多路流量按任务语义进行筛选与重组，借助时序去噪、重复包消解和丢帧补全，压缩无效负载，并把关键事件流以小时延推送至指挥席。

从数据来源来看，模块依靠现场 Mesh 回传的环境量测、人员位置以及器材状态来构建统一视图。环境量测包含温度与一氧化碳浓度，位置由室内 UWB 与惯导进行融合估计，器材状态覆盖呼吸器瓶压与终端电量。异常感知采用阈值加时序模式联合策略，对温升突变、位置异常聚集和设备离线

触发预警，并把处置动作输出为调度建议。

调度建议以任务优先级排序来驱动资源分配，核心采用如下乘性模型。

$$P=S\times V\times R$$

其中，P 表示任务优先级，为无量纲分值；S 为人员安全系数，依据热暴露时长与撤离路径通畅度归一化，为无量纲；V 表示火势蔓延速度，依据温度梯度与烟羽扩展估计，单位为 m/s；R 为资源可用度，依据水源余量与可调动班组数量归一化，为无量纲。

结合某高层建筑火灾的处置实践，模块在 Mesh 网络回传的温度栅格与消防员轨迹之上识别出楼梯间热斑快速上移的时序模式，并把风险等级上调。指挥席据此把内攻小组改走东西向连廊路径，同时把备用水带与正压风机的投放优先级上调，使 2 名内攻人员的风险暴露时间得到缩短。

4 新型通信技术应用的效果验证与未来展望

4.1 基于模拟极端场景的通信性能测试与案例分析

鉴于极端火场叠加热辐射、浓烟遮挡与电磁噪声，本研究在四川省消防救援总队综合训练基地搭建燃烧舱、烟雾走廊与屏蔽暗室联动的试验平台，把 Mesh 接入域与卫星回传域纳入统一测评。热环境由明火与远红外阵列形成温度梯度，烟场由甘油型烟机维持目标能见距，干扰环境采用扫频与脉冲源对 400 MHz、2.4 GHz 与 5.8 GHz 注入。流程按覆盖探测、链路质量采集与业务承载压测串联推进，覆盖探测生成连通栅格，链路采集记录接收功率、链路开销与路由收敛时间，业务压测配置语音、高清视频与多传感上报的混合负载并标注时延与丢包；切换评估在公网可用与不可用条件下触发地面与卫星双路径选择，观察接入域至回传域的路径决策。

4.2 灭火指挥决策效率提升的量化评估

鉴于极端条件灭火指挥对连续链路与快反闭环的依赖，本研究把决策效率评估建立为三维指标体系，覆盖指令响应时间、资源调度准确率、救援时间缩短比例，并把统计口径锚定到同一作战时间线。指令响应时间定义为指挥端发出口令至前线确认的总时长，资源调度准确率依据任务载荷与装备能力匹配矩阵进行判定，救援时间缩短比例以控制关键风险节点所需时长的相对缩减进行计算，从而把通信能力对指挥闭环的影响用可测量的方式表达出来，便于在战术编成与网络配置之间开展双向校准与调整工作 [5]。

4.3 技术优化方向与推广应用前景

鉴于极端火场的能量与电磁双重压力，现有现场 Mesh 暴露续航短与拓扑稳定边界偏紧的问题。穿戴终端与背负台承担多跳转发和视频上行时功耗攀升，无人机中继在高温乱流中耐时下降，热辐射把电池与射频前端推入效率低谷。卫星通信虽可补齐盲区，但终端价格、天线指向精度以及带宽费用抬高中小队的部署门槛，野外供电与负载重量还限制布设密度，多制式融合带来的路由振荡与 QoS 映射差异进一步加重控制面负担。

表 2 灭火指挥决策效率对比表

指标	传统通信	新型通信	数据来源与说明
指令响应时间	15 min	3 min	案例 1 现场记录与案例 2 复现场景时间戳对齐标定
资源调度准确率	70%	92%	指挥台派单与回执对比，按任务载荷—装备能力匹配矩阵进行判定
救援时间缩短比例	0%	25%	以完成楼梯间控烟与林带隔离带成形所需时长为基准的相对缩减计算口径

面向上述短板，优化路径把低功耗节点与可负担卫星接入当作主线。硬件侧选用高集成 SoC 与功放自适应，叠加射频休眠唤醒和占空比调度，把续航时间拉长；空中中继配置高效散热与快换电池，并在车载平台设置直流补给点。边缘侧把语义编码与事件级视频摘要前移，结合链路质量驱动的接入控制，压缩无效上行。卫星端推进平板小型化天线与多星座双模终端，配合可编程波形、差异化队列以及硬件加密加速与轻量身份认证，把成本与可靠性在可接受区间内进行权衡，并把统一运维平台纳入观测与策略下发。

5 结语

研究表明，空地一体 Mesh 与卫星回传的融合架构在热、烟与强干扰条件下可保持指挥链路连续，配合边缘侧语义压缩、QoS 与 AI 事件识别，实现关键业务优先到达与决策闭环收敛。与传统体系相比，响应更快、调度更准、救援效率明显提升。当前瓶颈在续航、拓扑稳定与卫星接入成本。后续将沿低功耗节点、空中中继热管理与快换、事件级视频摘要、小型化多星座终端与统一运维平台推进迭代，并拓展至地震次生火灾与海上平台等场景。

参考文献

[1] 潘晓军,杨倩兰,李佳栋.可级联转发的灾害应急指挥系统研究[J].广播电视信息,2025,32(10):97-99.

[2] 安相君.基于Mesh的消防应急通信基站设计与性能评估[J].科技创新与生产力,2025,46(07):104-106.

[3] 陈启伟.应急广播在偏远地区的覆盖与传播策略研究[J].中国宽带,2025,21(04):86-88.

[4] 焦立彬,王明,马文学,王建超.基于IMS的智能多媒体通信技术研究[J].无线电通信技术,

[5] 国家安全生产应急救援队伍应急通信技能提升实训班成功举办[J].中国安全生产科学技术,2025,21(11):158.