

Research on innovative application and breakthrough of 5G-A technology enabling high-rise residential fire protection

Yingfang Tan¹ Wei Sang¹ Jizhen Tan² Guichu Gu¹

1. China Mobile Communications Group Yunnan Co., Ltd. Kunming Branch, Kunming, Yunnan, 650200, China

2. Guandu District Fire Rescue Brigade Kunming, Kunming, Yunnan, 650200, China

Abstract

This study focuses on the application scenarios of 5G-A technology in the field of high-rise residential fire prevention and UAV fire extinguishing. Through technical comparative analysis and research, it solves the problems of 'information island' and 'response bottleneck' in the traditional fire protection mode, and proposes a technical solution with both theoretical forward-looking and engineering feasibility.

Keywords

5G-A technology ; high-rise residential ; firefighting

5G-A 技术赋能高层住宅消防的创新应用与突破研究

谭颖芳¹ 桑维¹ 谭纪振² 谷桂初¹

1. 中国移动通信集团云南有限公司昆明分公司, 中国·云南 昆明 650200

2. 官渡区消防救援大队, 中国·云南 昆明 650200

摘要

当前, 中国城市化进程深刻重塑了城市空间形态, 高层住宅作为节约土地资源、提升居住容积率的重要载体, 已成为城市人口居住的主流。然而, 伴随高层住宅保有量的持续增长, 其火灾防控问题日益凸显, 已成为制约公共安全治理能力提升的关键瓶颈。本研究聚焦5G-A技术在高层住宅火灾预防与无人机灭火领域的应用场景, 通过技术对比分析与研究, 破解传统消防模式存在的"信息孤岛"与"响应瓶颈"问题, 提出兼具理论前瞻性与工程可实施性的技术解决方案。

关键词

5G-A技术; 高层住宅; 消防

1 引言

据应急管理部消防救援局统计数据显示, 近十年来中国高层住宅火灾发生率呈逐年攀升态势^[1], 2024年全国高层建筑火灾起数同比上升12.3%, 火灾造成的人员伤亡与财产损失规模同步扩大。高层住宅火灾防控之所以成为行业难题, 核心在于其"预警滞后、扑救困难、疏散受阻"的三重特性, 传统消防模式在该场景下的适用性缺陷显著。5G-Advanced (以下简称5G-A) 技术作为第五代移动通信技术的演进增强版本, 其"超高速率、超低时延、超大连接"的核心技术特性, 为构建"空-地-物"一体化消防防控体系提供了关键技术支撑。

5G-A技术与无人机系统的深度融合, 更成为破解高层住宅消防难题的创新路径。无人机具备机动灵活、视野开阔的作业优势, 结合5G-A网络的高清图传与远程操控能力,

可实现火灾现场的实时侦察与精准处置, 通过空地协同作战模式大幅提升消防救援效能。

2 5G-A 技术架构与消防场景适配性分析

2.1 5G-A 核心技术特征

2.1.1 超高速率传输

5G-A技术在数据传输速率方面实现质的突破, 其理论峰值传输速率可达10Gbps, 较传统通信技术提升一个数量级, 为高层住宅消防场景的海量数据传输提供坚实支撑。在火灾处置过程中, 该特性可实现4K热成像视频(3840×2160分辨率)的实时回传, 通过超高分辨率影像精准呈现火场温度分布、火源位置及火势蔓延态势; 同时支持三维点云数据的同步传输, 为指挥中心构建火场三维立体模型提供数据基础, 实现建筑结构、通道布局及障碍物分布的精准映射。

2.1.2 超低时延通信

5G-A技术的通信时延可控制在10ms以内, 较4G网络(时延>50ms)实现显著优化, 该特性在消防设备联动与指挥通信场景中具有不可替代的作用。火灾处置的"黄金

【作者简介】谭颖芳(1983-), 女, 中国云南昆明人, 硕士, 工程师, 从事传输网络建维研究。

时间”集中在初期阶段，毫秒级的响应延迟可能直接影响火势控制效果。

2.1.3 超大连接密度

5G-A 技术单小区可支持超千个消防终端的同时接入，具备强大的多设备兼容能力，可实现烟感传感器、温感传感器、无人机、消防栓压力监测设备等多类型终端的一体化接入。高层住宅消防场景需实现全域覆盖的监测网络部署，大量终端的并发接入需求对通信网络的连接能力提出极高要求。

2.2 高层住宅消防场景的技术痛点与 5G-A 适配方案

2.2.1 隐蔽区域监测难题

高层住宅电梯井、电缆沟等隐蔽区域因结构复杂、空间狭窄，一直是消防监测的薄弱环节。传统人工巡检模式效率低下，漏检率高达 40%；有线监测设备部署成本高、维护难度大，难以实现全域覆盖。

5G-A 通感一体传感器为该难题提供了有效解决方案^[2]。该传感器采用无线部署模式，较传统有线方案降低 60% 的部署成本，同时集成烟雾、温度等多参数监测功能，通过 5G-A 网络实现数据实时传输，将隐蔽区域监测覆盖率提升至 98%。

2.2.2 多设备协同低效问题

传统消防系统中，各类设备间的数据交互延迟超过 30 秒，当烟感报警器触发后，需经过多级传输才能实现消防泵、喷淋系统等设备的联动启动，无法形成初期灭火合力，延误处置时机。

5G-A 网络切片技术通过为不同消防业务分配专属网络通道，可将设备间数据同步时延控制在 5ms 以内，实现各类设备的无缝协同。

2.2.3 高空设备控制局限

传统无人机消防作业受限于视距控制范围，无法实现高层住宅顶部及远距离区域的全覆盖；同时高层住宅周边电梯变频器、微波设备等产生的电磁干扰，易导致无人机信号中断，影响作业安全性与稳定性。

5G-A 技术的超视距控制与抗干扰波束赋形技术有效突破上述局限。超视距控制能力可实现 10km 范围内的稳定通信，大幅拓展无人机作业半径；抗干扰波束赋形技术通过智能调整信号收发方向，可将复杂电磁环境下的信号中断率降至 0.1% 以下。该技术组合使无人机可携带灭火弹实现精准打击，或搭载高清设备完成火场侦察，为高层消防作业提供可靠技术保障。

3 5G-A 驱动的高层住宅消防预防体系构建

3.1 全空间智能监测网络构建

3.1.1 立体化感知终端部署

全空间智能监测网络是实现火灾早期预警与精准防控的核心载体，通过在不同区域部署差异化感知设备，构建全方位、多层次的监测体系。

针对电缆井、管道井等隐蔽区域，部署 5G-A 融合传感器实现多参数精准监测。该传感器集成烟雾、温度、振动监测功能，烟雾检测精度达 0.01dB/m，温度分辨率 0.1℃，振

动灵敏度 $\pm 0.5g$ ，可捕捉微小异常变化；通过嵌入 AI 算法实现多参量关联分析，当监测到烟雾浓度突升、温度异常升高且伴随振动时，可快速识别火灾隐患并触发预警，误报率降至 2.7%。

采用“机巢+多旋翼无人机”模式实现建筑外立面及楼顶的自动化巡检。机巢为无人机提供充电、维护及数据传输保障，确保作业连续性；多旋翼无人机搭载双光载荷，每 2~4 小时自动起飞巡航，实时回传 1080P 高清影像。通过图像识别算法实现阳台堆积物 92% 的识别准确率，50 米范围内可清晰识别外墙保温材料破损情况，巡检效率较人工提升 5 倍，有效弥补人工巡检的视野局限与效率短板。

3.1.2 大数据驱动的风险评估与预警

消防数字孪生平台是实现风险评估与预警的核心支撑，该平台整合传感器实时数据、无人机巡检结果及 10 万+ 历史火灾案例数据^[3]，通过大数据分析 with 机器学习算法实现风险的精准评估与预警。

平台通过实时采集烟雾、温度等监测数据及无人机影像信息，构建高层住宅数字化镜像模型，实现建筑物理结构与消防参数的实时映射；结合历史火灾案例数据的深度挖掘，总结火灾发生规律与风险演化特征。通过机器学习算法生成楼层风险热力图，以可视化方式呈现各楼层风险等级，支撑管理人员开展针对性防控。

建立三级预警机制实现差异化处置：一级预警面向物业推送工单，要求 2 小时内完成隐患闭环处置；二级预警触发后 10ms 内联动声光报警系统，实现电梯自动迫降并向居民推送 AR 逃生导航（定位精度 < 1 米）；三级预警直接对接消防指挥中心，推送 BIM 模型、火源坐标及实时视频，较传统模式压缩 40% 的接警处置时间。

3.2 应急通信与协同处置优化

5G-A 网络切片技术构建的专用通信通道，实现端到端时延 $< 8ms$ 、丢包率 $< 0.01\%$ ，为应急通信与协同处置提供可靠保障。该通道支撑消防员 AR 头盔的实时通信需求，可回传第一视角火场影像至指挥中心，同时显示逃生路线与危险源标记，通信覆盖率从传统 60% 提升至 95%，有效解决浓烟环境下的通信中断问题。

通过 5G-A 网络实现消防设备的远程精准控制，室内消防栓加压响应时间 $< 200ms$ ，防火卷帘门可即时下放，形成“发现即处置”的初期灭火能力。远程控制能力使指挥中心可根据火场态势动态调整设备运行状态，确保灭火资源精准投放，最大限度降低火灾损失。

4 5G-A 赋能无人机信号灭火技术突破

4.1 无人机性能瓶颈与技术突破

4.1.1 载重与续航能力提升

传统消防无人机存在载重不足与续航较短的性能瓶颈，消费级多旋翼无人机载重通常仅 1-5kg，锂电池续航时间 20-30 分钟，难以满足高层住宅火灾的持续处置需求，频繁充电导致作业中断，延误最佳灭火时机。

采用双旋翼气动设计的河南移动 WK-1900PRO 机型实现载重能力质的突破,通过优化空气动力学结构提升升力性能,载重可达 300kg,可携带 15 枚 12kg 灭火弹或 180L 水基灭火剂,具备多着火点集中打击能力。系留供电技术与 5G-A 专网的融合应用,通过地面电源经高强度电缆为无人机持续供电,突破锂电池续航限制,可支持 170 米超视距作业(约 56 层楼高),实现长时间持续灭火作业,为火灾彻底处置提供保障^[4]。

4.1.2 精准控制与环境适应

高层住宅周边障碍物密集、火场浓烟高温等复杂环境,对无人机的定位精度与避障能力提出极高要求。传统 GPS 定位在遮挡环境下精度不足,视觉传感器在浓烟中易失效,导致无人机碰撞风险升高,影响作业安全性。

融合北斗+UWB 超宽带定位与激光雷达避障技术构建精准控制体系。北斗系统提供全域定位基础,UWB 技术实现 0.5 米级高精度定位,即使在卫星信号遮挡场景下仍可保障定位精度;激光雷达探测距离达 100 米,在能见度<5 米的浓烟环境中可识别 30 米内障碍物,较传统 GPS 定位精度提升 10 倍。基于建筑 BIM 模型与实时气象数据的 AI 航线规划技术,可动态调整飞行路径,将高空风阻导致的落点偏差控制在 1 米内,实现火源精准打击。

4.2 空地协同灭火作战体系

4.2.1 三级无人机编队协同机制

构建侦察层、处置层、保障层三级无人机编队协同机制,实现各层级功能互补与高效联动,形成完整的灭火作战体系^[9]。

侦察层由机身尺寸<20cm 的微型穿越机组成,具备高机动性优势,可穿透窗口进入室内开展近距离侦察,实现<2 米精度的火源定位与被困人员坐标采集,同时构建火场三维热力图,为指挥决策提供精准数据支撑。处置层采用重载无人机,携带灭火弹与泡沫喷射系统,单架无人机可覆盖 3 个着火窗口,多机协同可形成立体灭火网络,快速遏制火势蔓延。保障层由货运无人机构成,5 分钟内可完成便携式灭火器、防毒面具等物资投送,解决高层物资补给难题,为被困人员自救与救援人员作业提供物资保障。

4.2.2 多源数据融合指挥系统

多源数据融合指挥系统通过整合无人机影像、GIS 地图、消防水系统压力数据等多源信息,构建火场数字孪生模型,实现火势与设备状态的实时映射。无人机影像提供火场动态态势,GIS 地图呈现建筑布局与消防设施分布,消防水系统数据保障供水稳定性,多数据融合实现指挥决策的全面性。

系统嵌入 AI 算法实现灭火方案的智能生成与优化,通过分析火势规模、建筑结构、气象条件等参数,从无人机编队调度、灭火策略制定等方面生成最优方案。当检测到消防栓压力不足时,自动调度无人机挂载水带与地面消防车构建"空中水网",供水高度从传统<100 米提升至 150 米,突破超高层供水限制。指挥人员可通过系统实时监控作业进度,根据火场动态调整救援策略,确保灭火作业的精准性与高效性。

5 实践挑战与优化路径

5.1 技术落地瓶颈

高层住宅广泛采用的玻璃幕墙对 5G-A 信号存在显著衰减效应,实测数据显示衰减幅度达 15%-20%,导致室内及隐蔽区域信号强度不足,影响终端通信质量;频繁换电不仅增加人力成本,更可能错失火灾控制的关键时机,降低整体救援效率;当前无人机超视距飞行审批流程耗时约 4 小时,远无法满足高层住宅火灾"黄金 10 分钟"的应急响应需求,导致初期侦察与灭火作业延误。

5.2 系统性解决方案

5.2.1 网络增强技术

采用"微基站部署+3D 波束赋形"组合方案提升信号覆盖质量。在建筑顶部部署 5G-A 微基站,缩短信号传输距离;结合 3D 波束赋形技术智能调整信号方向,增强穿透能力,将玻璃幕墙穿透损耗降至 8%。开发动态频谱感知算法,实时监测电磁环境,通过频率与带宽动态调整避开干扰源,确保控制信号信噪比>20dB,保障通信稳定性。

5.2.2 装备与能源创新

研发氢电混合动力无人机,融合氢燃料电池与锂电池优势,续航时间提升至 120 分钟,有效载重比从 40% 提升至 60%,减少作业中断次数。设计模块化灭火载荷,实现灭火弹、水带、泡沫喷射系统等设备的 3 分钟快速更换,适配不同火灾场景需求,提升作业灵活性。

5.2.3 政策与标准协同

建立"消防无人机应急飞行绿色通道",通过跨部门协同简化审批流程,实现 3 分钟内一键审批,保障应急响应时效;搭建实时空域共享平台,避免与其他飞行器冲突。制定《高层住宅消防无人机操作规范》,明确飞行高度(≤200 米)、作业半径(≤5km)及数据安全要求,规范操作人员资质管理,降低飞行风险。

6 结语

综上,5G-A 技术驱动的高层住宅消防体系实现三大突破:全空间监测网络使隐患识别准确率超 95%,预警响应达秒级;应急协同体系实现初期火灾即时处置;无人机技术突破与编队协同形成"空-地-物"立体化能力,大幅提升救援效率与成功率,为高层住宅消防安全治理提供有效技术方案。

参考文献

- [1] 国家消防救援局. 高层建筑消防安全管理规定(2025修订稿)[S]. 北京: 应急管理出版社, 2025.
- [2] 华为技术有限公司. 5G-A 通感一体技术在消防领域的应用研究[Z]. 深圳: 华为技术有限公司, 2025.
- [3] 最高人民检察院. 公益诉讼检察工作白皮书(2024)[Z]. 北京: 最高人民检察院, 2025.
- [4] 河南移动. 5G-A 无人机高层灭火技术白皮书[R]. 郑州: 中国移动通信集团河南有限公司, 2024.
- [5] Pei Zhu, Rui Song 等. 《Multiple UAV Swarms Collaborative Firefighting Strategy Considering Forest Fire Spread and Resource Constraints》. 《Drones》, 2025 年.