

智能化消防通信技术 在灾害场景中的应用探索

文 ◆ 锦州市消防救援支队 刘博宇

引言

当前通信技术体系在极端温度、电磁干扰、结构坍塌等复杂场景时，暴露出网络重构迟滞、数据融合障碍与设备兼容不足等系统性缺陷，直接影响生命搜救效率和次生灾害防控效果。灾害场景的复杂性与动态性对消防通信系统提出多维挑战，传统通信技术因环境适应性不足难以满足应急救援需求。本研究聚焦智能消防通信技术的创新应用，系统分析灾害环境对通信系统的异质性需求，揭示传统技术在实战性、兼容性以及资源调度方面的固有缺陷。通过构建多模态协同消防通信架构，整合智能感知、动态组网与数字孪生技术，形成覆盖灾前预警、灾中处置、灾后评估的全周期解决方案。技术应用表明，智能系统在信号穿透性传输、通信抗干扰能力与弹性组网方面展现显著优势，但面临硬件可靠性、算法泛化性以及跨系统协同等实施瓶颈。研究提出环境耐受性提升、标准体系重构与模块化设计等发展路径，为突破灾害场景通信障碍提供理论支撑与实践指引。

1 灾害场景对消防通信的特殊需求分析

1.1 典型灾害环境特征

灾害场景的物理环境与常规消防救援环境存在本质差异，其空间结构与电磁环境呈现显著异质性。地震、山体滑坡等地质类灾害往往造成建筑结构坍塌与地下空间变形，导致常规通信基站的物理损毁与信号传播路径阻断。化工爆炸、森林火灾等事故产生的热辐射与浓烟颗粒，不仅改变局部大气折射率，还会引发无线信号的多径效应与衰减畸变。洪涝、台风等气象灾害则通过水体导电效应与强电磁干扰，加剧通信设备的物理损毁风险。更为复杂的是多数灾害呈现多模态耦合特征。

1.2 应急救援通信需求层次

灾害现场的通信需求呈现明显的时空梯度特征。在灾情感知阶段，需要构建全域覆盖的监测网络，实现温度、气体浓度、结构形变等多参数同步采集，此时通信系统须具备高密度终端接入能力与低延时传输特性。进入救援指挥决策阶段，指挥中枢需整合现场视频、三维建模、人

员定位等异构数据流，这对通信带宽的动态分配与多协议兼容性提出挑战。而实际处置阶段则面临更复杂的通信需求分层——一线作战单元需要立即响应对讲以供战术指令传输，后方指挥部依赖高清视频图传影像的通信数据支持，而复杂地形场景断网状态则需搭建自组网以保障极端条件下物流数据的稳定交互。

1.3 传统通信技术的局限性

现有消防通信体系在灾害场景中暴露出明显的结构脆弱性。运营商公网通信依赖固定基础设施，当基站损毁或供电中断时，易形成信号覆盖盲区。常规无线自组网虽具备快速部署优势，但节点抗毁能力不足，在高温、高湿等极端环境下设备故障率显著

【作者简介】刘博宇（1996—），男，河北廊坊人，硕士研究生，初级专业技术职务，研究方向：消防通信。

上升。卫星通信作为重要备份手段，却受限于终端体积、天气条件与传输成本，难以支撑大规模实时数据传输需求。更突出的矛盾体现在协议兼容层面，消防、医疗、市政等多部门通信设备制式各异，灾害现场常出现指挥指令无法跨系统透传的“信息孤岛”现象^[1]。

2 智能化消防通信的核心技术应用场景

2.1 灾情预警阶段的应用

智能化消防通信技术在灾前预警阶段的核心价值体现在多源数据融合与风险态势感知层面。通过部署智能传感网络，构建覆盖重点防护区域的立体化监测体系，将传统单一参数监测升级为温度场、应力分布、气体浓度等多维物理量的同步感知。基于边缘计算架构的智能网关设备，可在前端完成数据清洗与特征提取，显著降低原始数据传输对通信带宽的依赖。在数据融合层面，拓展多种算法消除多传感器间的差异与偏差，形成具有统一时空基准的灾害风险场模型。智能预测模块通过集成机器学习算法与灾害动力学模型，能够实现灾害演变趋势的预先动态推演。

2.2 应急救援阶段的应用

灾害发生后的黄金救援期内，智能化通信系统展现出动态组网与资源优化配置的核心能力。自适应通信网络采用拓扑感知算法，能够根据现场损毁情况自主重构传输路径，当主节点失效时，通过无人机搭载的移动中继基站设备快速构建空中通信走廊。多模态通信协同技术有效整合微波、可见光、声波等异构传输介质，在复杂电磁环境中构建备用通信

通道。智能资源调度引擎基于强化学习算法，实时评估各业务流的优先级与资源需求，动态调整信道分配策略，确保生命体征传输、指挥视频流等关键业务得到有效保障。

2.3 灾后评估阶段的应用

进入灾后重建阶段，智能化通信技术转向支持精准损失评估与次生灾害防控。移动式三维激光扫描系统与通信中继基站等设备协同作业，构建现场实景数字孪生体，通过点云数据与灾前模型的自动比对，实现建筑结构损伤的量化诊断。分布式光纤传感网络沿关键基础设施布设，持续监测灾后结构体的应力重分布过程，其监测数据通过低功耗广域物联网回传至评估中心^[2]。智能数据分析平台运用知识图谱技术，将碎片化灾害数据与历史案例库进行关联挖掘，自动生成包含致灾原因分析、救援效能评估、重建方案比对等要素的综合性评估报告。在次生灾害防控方面，基于通信网络部署的智能微震监测节点，可实时捕捉余震引发的岩体微破裂信号，通过机器学习算法识别潜在二次滑坡体的失稳前兆。

3 智能化消防通信技术应用中的关键问题与挑战

3.1 技术层面瓶颈

当前智能化消防通信系统的技术成熟度尚无法完全满足复杂灾害场景的实战需求。在硬件层面，核心传感器件在极端环境下的可靠性存在明显短板。高温高湿环境易导致光电传感器信噪比骤降，浓烟颗粒吸附引发的镜头污染会削弱图像识别精度，而剧烈震动则可能造成精密器件的机械性损伤。现有设备的防护等级与灾害现场的多物理场耦合作用之间尚未形成有效匹配，电磁屏蔽设计往往难以兼顾抗强冲击与散热需求。算法层面，智能决策模型的泛化能力面临严峻考验。多数机器学习算法依赖历史灾害数据的训练集，但实际灾变过程的非线性特征常超出模型预设的边界条件，导致态势推演出现偏差。多模态数据融合过程中，时间与空间基准不统一引发的信息冲突尚未得到系统性解决，如红外热成像数据与结构形变监测数据的时间戳错位可能误导损伤评估结论。

3.2 管理协同难题

跨部门协同机制缺失制约着智能化通信系统的整体效能发挥。消防救援、医疗急救、市政工程等多方主体在通信协议、数据格式、指挥权限等方面尚未建立统一标准，导致不同结构系统间的互操作性严重不足。无人机中继设备采集的现场影像因编码制式差异无法直接接入医疗机构的远程会诊系统，延误伤员救治的黄金时间。设备运维管理存在责任真空地带，智能通信装备的日常维护、战时调度、灾后检修等环节尚未形成全生命周期管理体系，部分先进设备因维护人员技能断层而长期处于闲置状态。

3.3 应用场景适配性挑战

智能化通信系统与动态灾害环境的适配度仍需提升。在空间维度，不同灾种对通信系统的性能需求呈现显著差异。地震救援需要穿透坍塌体的信号传输能力，化工火灾处置依赖防爆通信设备，而洪涝灾害中的

通信装置必须具备高等级防水特性。现有系统在模块化设计方面存在明显不足，难以通过快速更换功能模块实现场景适配。在时间维度，灾情演变的阶段性特征对通信资源配置提出差异化要求，但当前系统缺乏前瞻性预判能力，往往滞后于现场需求变化^[3]。系统弹性设计尚未达到实战标准，当遭遇超预期灾害冲击时，备用通信链路的激活速度与主链路的故障隔离速度难以满足关键业务连续性要求。

4 智能化消防通信技术的发展对策

4.1 技术研发方向建议

提升核心器件的环境耐受性应作为技术攻关的首要方向。重点研发具有多物理场防护能力的复合型传感器，通过微纳制造工艺集成温度补偿、震动缓冲、防化镀层等功能模块。针对复杂电磁环境，开发具备自适应滤波功能的射频前端芯片，通过可重构电路设计动态调整工作频段与调制方式。在算法优化层面，构建灾害场景的数字孪生训练平台，利用强化学习算法生成多灾种耦合条件下的通信网络优化策略，通过虚实交互训练提升智能决策模型的泛化能力。能源系统创新需突破传统储能模式，研发基于环境能量收集的自供能节点设备，集成压电发电、温差发电、射频能量捕获等多模态能量转换装置，实现通信设备在役持续供能。

4.2 管理机制优化路径

建立跨部门协同的应急通信标准体系是破除管理壁垒的关键举措。制定统一的异构系统互操作规范，明确数据接口协议、设备认证标准与频谱使用规则。完善应急指挥的权限动态分配机制，开发基于区块链技术的多级指挥权限控制系统，根据灾情态势自动调整数据访问层级与指令执行优先级。在设备运维层面，推行“平战结合”的全生命周期管理模式，建立智能装备健康状态数据库，通过数字孪生技术模拟极端条件下的设备性能衰减曲线，制定预防性维护策略。同时，构建“三维一体”培训体系，将理论教学、虚拟仿真、实战演练有机结合，重点强化指战员在通信系统异常状态下的应急处置能力，如突发干扰源识别、应急信道切换等关键技能。

4.3 应用场景适配策略

构建模块化可重构的通信系统架构是提升场景适应性的核心路径。采用软件定义无线电技术实现硬件功能虚拟化，通过加载不同波形软件满足地震救援穿透通信、化工防爆通信等差异化需求。例如，在坍塌废墟搜救场景中，快速切换至低频电磁波传输模式以增强障碍物穿透能力。发展具有前瞻性资源配置能力的智能网络，基于深度强化学习算法预测灾情演化趋势，预先部署通信资源。在灾情初期即构建“主干网+微蜂窝”的弹性架构，主干网保障指挥中枢通信，微蜂窝网络随救援力量推进动态扩展^[4]。针对超预期灾害冲击，设计“三级冗余”容灾机制。一级冗余通过相邻节点自组网维持基础通信；二级冗余启用系留无人机构建临时中继；三级冗余启动天基互联网接入服务。同时，建立智能通信伦理审查框架，明确生命探测数据匿名化处理规则，构建算法决策追溯系统，通过操作日志区块链存证实现责任认定可溯化。

结语

智能化消防通信技术的深度应用，标志着灾害应急救援通信从通道保障向决策支持的战略转型。研究证实，通过异构网络融合、智能算法嵌入与数字孪生协同，可有效提升复杂环境下通信系统的环境穿透力、服务可靠性与态势感知力。然而，技术实用化进程仍受制于极端工况设备耐受性不足、跨域数据融通标准缺失、经济发展及资金预算支持等现实约束，需在材料科学、信息工程、应急管理等多学科交叉领域寻求突破。未来研究应聚焦自供能设备研发、多智能体协同优化等方向，同时加强伦理规范与制度设计，推动技术创新与应急管理体系形成有机闭环，为构建韧性城市提供关键通信保障。^[5]

引用

- [1] 刘亚东.极端灾害事故的消防应急通信技术分析[J].长江信息通信, 2023,36(2):233-235.
- [2] 刘亚东.极端灾害事故的消防应急通信技术分析[J].数字通信世界, 2022(7):85-87.
- [3] 刘英尧.卫星通信技术在消防救援中的应用分析[J].森林防火,2024, 42(2):89-93.
- [4] 袁洪漳.浅析5G通信技术在消防通信体系中的应用[J].互联网周刊, 2023(12):60-62.

