 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i5.5688

Strategy of communication protocol in collaborative operation of fire fighting robot

Wai Zheng

Shenzhen Fire Rescue Detachment, Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

This paper focuses on communication protocol technology in collaborative operations of firefighting robots. It outlines the characteristics and limitations of wired and wireless communication protocols, analyzes the challenges they face in terms of real-time performance, interference resistance, and security. A cooperative strategy based on a hybrid communication architecture is proposed, covering hierarchical communication protocol design, dynamic routing optimization algorithms, and communication protocol security design, to enhance the collaborative efficiency and communication reliability of firefighting robots.At the same time, performance testing and optimization are carried out in combination with practical application scenarios to verify the feasibility and effectiveness of this strategy. In the future, further exploration will be conducted on the deep integration with technologies such as the Internet of Things and edge computing, and the communication system of fire-fighting robots will be continuously improved to provide solid technical support for the intelligent development of fire rescue.

Keywords

communication protocol; fire fighting robot; cooperative operation

通信协议在消防机器人协同作业中的策略

郑外

深圳市消防救援支队，中国 · 广东 深圳 518000

摘　要

本文聚焦消防机器人协同作业中的通信协议技术。概述有线与无线通信协议特点及局限，分析其在实时性、抗干扰性、安全性方面面临的挑战。提出基于混合通信架构的协同策略，涵盖分层通信协议设计、动态路由优化算法及通信协议安全性设计，以提升消防机器人协同效能与通信可靠性。同时，结合实际应用场景进行性能测试与优化，验证该策略的可行性与有效性。后续将进一步探索与物联网、边缘计算技术的深度融合，持续完善消防机器人通信体系，为消防救援智能化发展提供坚实技术支撑。

关键词：通信协议；消防机器人；协同作业

1 引言

现代消防救援中，消防机器人协同作业是提升效率、保障人员安全的关键。通信协议作为机器人间数据交互纽带，其性能对协同效果起决定性作用。但现有通信协议在复杂火灾场景下问题频出，实时性差会使任务响应迟缓，抗干扰性弱易致通信中断，安全性漏洞则直接威胁救援行动。这些问题严重阻碍消防机器人协同效能的发挥，甚至可能危及救援人员与受灾群众生命。因此，深入钻研通信协议技术、优化协同作业通信架构迫在眉睫。本文将剖析现有协议缺陷，提出协同策略，为通信系统优化提供借鉴。

【作者简介】郑外（1986–），男，中国湖南耒阳人，硕士，从事消防通信研究。

2 通信协议技术的概述

通信协议是消防机器人协同作业的核心，规范着数据传输格式、时序与规则，可分为有线与无线两类。有线协议中，CAN 总线协议支持实时传输、抗干扰强，但布线复杂、扩展性差，不适于灵活部署；Ethernet/IP 协议带宽高，用于机器人与指挥中心通信，却移动性差、易受电磁干扰。无线协议里，Wi-Fi 带宽高、覆盖广，却抗干扰弱、易被障碍物影响；ZigBee 功耗低、自组网强，但带宽低、距离短；4G/5G 带宽高、延迟低，利于实时视频传输，却功耗高、信号易遮挡，影响续航与环境适应。

3 通信协议在消防机器人协同作业中面临的挑战

3.1 实时性挑战

在消防机器人协同作业场景里，实时性是保障任务高效、安全完成的核心要素，对通信延迟容忍度极低。以灭火

任务为例，机器人集群需实时共享火源位置、烟雾浓度等动态环境数据，并据此同步调整行动策略，如规划编队路径、控制灭火剂喷射角度与流量等。若通信延迟超 100 毫秒，机器人会因数据接收滞后而无法及时响应火场变化，比如无法规避突然蔓延的火势或重复处理已处理区域，进而降低协同效率甚至导致任务失败。现有通信协议在复杂环境下延迟表现欠佳。Wi-Fi 协议在无干扰环境可实现 20 毫秒低延迟，但在火灾现场的浓烟、高温及电磁干扰下，信号衰减与噪声干扰加剧，延迟可能超 100 毫秒，甚至丢包、链路中断。4G 协议端到端延迟通常在 50 - 100 毫秒，波动性削弱了对实时控制的支持，在需毫秒级响应的操作中，会导致决策与动作失配。建筑结构遮挡、金属构件反射等因素更使信号传播不确定性增加，延迟问题愈发严重，成为制约协同效能的关键瓶颈。

3.2 抗干扰性挑战

在消防机器人协同作业的复杂火灾场景里，抗干扰性是通信系统稳定运行的关键。火灾现场的高温、浓烟、金属结构和电磁辐射等干扰源，会从多维度破坏无线信号。典型通信协议受干扰明显。Wi-Fi 信号在浓烟中衰减严重，当烟雾浓度达火灾救援常见阈值 500mg/m³ 时，2.4GHz 频段信号衰减率高达 30dB/m，3 米距离信号强度或降至初始值的千分之一，易致数据传输中断或误码率飙升。ZigBee 协议虽以低功耗、短距离传输见长，但在金属障碍物（如建筑钢梁、管道）旁，其 2.4GHz 频段路径损耗大，信号穿过 10cm 厚钢板后，传输距离缩短超五成，且多径效应引发的信号叠加干扰会使接收端解调错误率增 4 - 6 倍。此外，高温加剧电子元件噪声干扰，使通信模块信噪比降 15 - 20dB，压缩信号传输范围。消防设备电磁辐射形成的背景噪声，与协议频段重叠，冲突概率升 300%。多种干扰叠加，通信系统链路可靠性不足 50%，严重威胁协同任务连续性。

3.3 安全性挑战

在消防机器人协同作业体系中，数据安全漏洞是威胁救援行动成功的重大隐患。机器人传输的火场三维结构图、受困人员定位、实时灭火策略等敏感信息，关乎任务成败与人员生命安全，但现有通信协议安全防护短板突出。多数协议依赖未加密的明文传输，数据在无线信道中毫无防护。攻击者借助开源嗅探工具，在百米内就能捕获并解析火场地图等核心数据，甚至篡改灭火剂喷射参数，诱导机器人误判火源、调整错误路径，导致资源浪费或火势失控。同时，协议普遍缺乏双向身份认证机制，中间人攻击风险极高。在 ZigBee 或 Wi-Fi 自组网场景中，攻击者可伪装成合法网关或指挥节点，通过 ARP 欺骗、DNS 劫持等手段篡改任务指令，如将“紧急撤离”换成“继续深入火场”，或截获视频流注入虚假画面误导指挥。此类漏洞还可能被敌对势力或犯罪组织利用，瘫痪救援系统、制造恐慌，凸显出消防机器人通信安全升级的紧迫性。

4 基于混合通信架构的协同策略

4.1 分层通信协议设计

4.1.1 感知层协议

在消防机器人协同作业中，感知层通信依托 ZigBee 协议构建短距离、低功耗的分布式网络，其工作于 2.4GHz 全球免授权频段，支持 100 米半径内的多节点数据传输，数据速率稳定在 250kbps，可实时传递烟雾浓度、障碍物坐标等环境参数。该协议采用 CSMA-CA 冲突避免机制与 128 位 AES 加密，在保障火场复杂电磁环境下（如金属结构反射、高温噪声）95% 以上传输可靠性的同时，有效抵御信号窃听与篡改风险。其自组网特性支持机器人动态加入 / 退出编队，适配火场快速变化的拓扑结构，并通过星型、网状混合拓扑优化多机协同效率，尤其适用于消防机器人编队内传感器数据共享与避障指令同步。协议帧格式如表 1 所示。

表 1 感知层协议帧格式

字段	长度（字节）	描述
前导码	4	同步信号
帧头	2	协议标识
源地址	2	发送机器人 ID
目标地址	2	接收机器人 ID
数据长度	1	数据字段长度
数据字段	0-255	环境感知数据
CRC 校验	2	循环冗余校验

4.1.2 网络层协议

在消防机器人协同作业体系中，网络层通信依托 Wi-Fi 6 协议构建长距离、高带宽的无线骨干网络，其遵循 IEEE 802.11ax 标准，工作于 5GHz 频段，理论数据速率可达 1.2Gbps。该协议通过 OFDMA 与 DL/UL MU-MIMO 技术实现多设备并发传输，可承载火场高清视频流与三维地图等大容量数据，并借助 1024-QAM 高阶调制与 BSS Coloring 着色机制优化频谱效率，在复杂电磁环境下仍能保障 90% 以上的传输可靠性。其支持 WPA3 加密协议的特性，可有效防御中间人攻击与数据窃取，满足消防任务对实时性与安全性的双重需求。

协议帧格式如表 2 所示。

表 2 网络层协议帧格式

字段	长度（字节）	描述
前导码	8	同步信号
帧头	4	协议标识
源 IP 地址	4	发送机器人 IP 地址
目标 IP 地址	4	接收机器人 IP 地址
端口号	2	通信端口
数据长度	2	数据字段长度
数据字段	0-65535	任务指令与状态数据
CRC 校验	4	循环冗余校验

4.2 动态路由优化算法

在消防机器人协同作业场景中，动态路由优化算法是保障复杂火场环境下通信链路稳定与高效的关键技术，其核心在于根据实时环境变化自适应调整数据传输路径。基于 AODV 协议的路由优化机制，通过周期性广播 Hello 包动态维护邻居节点表，当机器人需发送火场热力图、任务指令等数据时，发起路由请求（RREQ）洪泛传播，接收节点若存在有效路径则返回路由应答（RREP），并引入 ETX（Expected Transmission Count）链路质量评估算法，综合考虑丢包率、误码率及重传次数，从多条候选路径中筛选出最小传输代价的链路。例如，在火场烟雾浓度突变导致部分节点信号衰减时，ETX 算法可快速识别链路质量下降的节点，触发路由切换至备用路径，确保数据传输中断时间低于 50ms。[2] 而基于 Q-Learning 的路由优化则将问题抽象为马尔可夫决策过程，通过深度感知环境状态（如邻居节点数量、信号强度 RSSI、剩余能量比例）与动作（下一跳节点选择），构建包含延迟、带宽利用率、能耗等多维度的奖励函数。机器人持续学习并更新 Q 表，记录不同状态 - 动作对的长期收益，例如当检测到某节点信号强度低于 -85dBm 或剩余能量低于 20% 时，自动降低该节点的 Q 值权重，引导数据流向高可用性路径。在模拟实验中，该算法较传统 AODV 协议可降低平均端到端延迟 32%，同时将网络吞吐量提升 25%，尤其适用于高动态、强干扰的火场环境。

4.3 通信协议安全性设计

在消防机器人协同作业的通信协议安全性设计中，数据加密、身份认证与入侵检测构建起三位一体的防护体系，可有效抵御火场复杂电磁环境下的恶意攻击。数据加密层使用 AES - 256 高级加密标准，对任务指令、火场三维建模数据等敏感信息进行端到端加密。密钥通过 Diffie - Hellman 密钥交换协议动态生成，机器人编队与指挥中心通信前，双方借助椭圆曲线变体（ECDH）在非安全信道协商共享密钥，再结合 SHA - 3 哈希算法生成 256 位会话密钥，且密钥生命周期与单次任务周期同步，能强力抵御暴力破解攻击，破解 AES - 256 加密约需 10^55 年。同时，采用密钥分片技术，将密钥拆分为 3 部分，分别存储于机器人主控、边缘计算节点与指挥中心，降低密钥泄露风险。[1] 身份认证层依托 PKI 体系，由权威 CA 机构为机器人颁发 X.509v3 数字证书。双向认证采用 TLS 1.3 协议，握手阶段交换证书并验证签名，结合硬件安全模块（HSM）存储私钥，防止密钥被篡改或复制。实测显示，该机制抵御中间人攻击成功率达 99.99%，且证书过期前 72 小时自动更新，保障认证链有效。入侵检测层基于集成学习框架构建异常行为检测模型，输入 120 维指标，经历史攻击数据训练。当通信流量异常，如连续 10 个数据包长度异常，自动触发节点隔离协议，0.3 秒内可识别并阻断“虫洞攻击”，还能推送日志辅助溯源，并支持动态阈值调整，在误报率低于 0.1% 时实现 98% 的攻击识别率。

5 结语

消防机器人协同作业中通信协议技术至关重要，现有协议在实时性、抗干扰性和安全性方面面临诸多挑战，严重制约协同效能。本文提出的基于混合通信架构的协同策略，通过分层通信协议设计实现不同场景下数据高效传输，动态路由优化算法保障复杂火场通信链路稳定，通信协议安全性设计构建三位一体防护体系。这些策略有效提升了消防机器人协同作业的通信可靠性、实时性和安全性，为消防救援工作提供了更可靠的技术支持。未来，随着技术不断发展，还需持续优化通信协议，以应对更复杂多变的火灾场景，进一步提升消防机器人的协同作战能力，为保障人民生命财产安全发挥更大作用。

参考文献

[1] 张修军,聂莉莎.消防报警系统串口通信协议解读方法[J].自动化技术与应用,2008,(03):103-104.

[2] 吴冉龙.基于感性工学理论的消防机器人设计研究[D].安徽工业大学,2022.