引文格式:王英剑,胡燕祝,张明作,等.面向城市地下空间应急救援的灾情信息感知与通信技术及装备[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(6):1150-1158.DOI:10.13203/j.whugis20240489

Citation:WANG Yingjian,HU Yanzhu,ZHANG Mingzuo,et al.Disaster Information Perception and Communication Technology and Equipment for Emergency Rescue in Urban Underground Space[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(6):1150-1158.DOI:10.13203/j.whugis20240489

面向城市地下空间应急救援的灾情信息感知与通信技术及装备

王英剑[1] 胡燕祝[1] 张明作[2] 刘坤辉[1] 赵兴昊[1] 梁子涵[1]

1 北京邮电大学智能工程与自动化学院,北京,100876

2 北京市燃气集团有限责任公司,北京,100032

摘 要:地震等自然灾害下的城市地下空间应急现场面临“盲、狭、乱、危”,现场灾情信息获取困难和应急通信受阻,严重影响救援效率。为解决这一难题,提出了面向城市地下空间应急救援现场的灾情信息感知与通信技术及装备,主要包含3个方面:一是多态灾情信息感知与无人自主作业技术与装备,实现对灾害现场温湿度、毒害气体、三维地物环境及人员位姿的精准感知;二是多网协同应急通信网络系统与装备,保障复杂环境下多源灾情信息的高速传输;三是智能服务平台系统,提供灾害现场的智能化理解与辅助决策支持。通过地铁隧道、地下停车场、地下商场等多场景的实战化验证,为城市地下空间应急救援提供了有效支撑,具有重要意义。

关键词:城市地下空间;应急救援;灾情感知;应急通信;无人装备

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-12-25

DOI:10.13203/j.whugis20240489 **文章编号**:1671-8860(2025)06-1150-09

Disaster Information Perception and Communication Technology and Equipment for Emergency Rescue in Urban Underground Space

WANG Yingjian[1] *HU Yanzhu*[1] *ZHANG Mingzuo*[2] *LIU Kunhui*[1]
ZHAO Xinghao[1] *LIANG Zihan*[1]

1 School of Intelligent Engineering and Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2 Beijing Gas Group Co. Ltd, Beijing 100032, China

Abstract: **Objectives**: Urban underground spaces are critical components of modern urban infrastructure but they are highly vulnerable during natural disasters due to the blind, narrow, chaotic, and dangerous conditions. These characteristics cause significant challenges to emergency rescue operations, including difficulties in acquiring accurate disaster information and maintaining reliable communication. This study aims to develop an integrated framework for disaster information perception and communication technology and equipment, specifically tailored for emergency rescue in urban underground spaces, to enhance rescue efficiency and effectiveness. **Methods**: The proposed framework is guided by the principles of intelligent, lightweight, standardized, and systematic and comprises three core components. The first component is multi-state disaster information perception and autonomous operation technology. It includes 3D terrain mapping based on simultaneous localization and mapping (SLAM) to reconstruct disaster scenes, micro-assembled sensors for detecting temperature, humidity, and toxic gases, and social information fusion to provide a comprehensive understanding of the disaster situation. The second one is multi-network collaborative emergency communication network technology. It involves point-to-point communication using adaptive fre-

基金项目:国家自然科学基金(52478123);国家重点研发计划(2020YFC1511700)。

第一作者:王英剑,博士,研究方向为风险感知、预警及应急处置。wangyingjian@bupt.edu.cn

通信作者:胡燕祝,博士,教授。yzhu@263.net

quency variation and beamforming algorithms to enhance signal transmission, combined with a dynamic network switching strategy to ensure reliable communication in challenging underground environments. The third one is intelligent service platform system. This system integrates real-time data fusion and visualization from multiple sources and provides decision support through algorithms for path planning, resource allocation, and risk assessment. **Results:** The proposed framework is validated in various underground scenarios, showing significant improvements in disaster information perception and communication capabilities. The first component is disaster information perception. The SLAM-based system achieved high-resolution reconstruction of underground environments and identified key features such as stairs and slopes. Micro-assembled sensors provided accurate environmental data, and the social information fusion component enhanced situational awareness through multi-source data integration. The second one is autonomous operation. The unmanned vehicle was characterized by wheel-track-leg and demonstrated adaptability to complex terrains with vertical obstacle crossing capability up to 25 cm and a climbing ability of 35°. The carbon fiber cage-protected drone provided stable aerial surveillance in confined spaces. The third one is communication network. It ensured reliable communication over 1.2 km distances, dynamically adapting to environmental changes. Point-to-point communication showed robust performance with high data rate and low latency. The last one is intelligent service platform system. It provided real-time data integration and visualization, supporting decision-making through actionable insights based on real-time analysis. **Conclusions:** The proposed framework addresses the unique challenges faced by urban underground space emergency rescue through systematic and intelligent design, enhancing the efficiency and safety of rescue operations. Future work can focus on optimizing the system to adapt to more complex and diverse environments, thereby further improving its capabilities.

Key words: urban underground space; emergency rescue; disaster perception; emergency communication; unmanned equipment

中国是世界上受自然灾害影响和威胁最为严重的国家之一,随着城市化进程的加快,城市地下空间的开发利用不断增加。城市地下空间救援任务是灾害救援领域的难题,“盲、狭、乱、危”复杂环境使得救援工作面临巨大挑战。

灾情信息感知与通信是地下空间救援任务的关键环节,地下环境比地上更加复杂恶劣,相关技术尚存在一定不足[1-3]。在灾情信息感知方面,中国主要通过对视频图像、物联传感等信息结合分析算法实现,国际上利用激光雷达、声波、红外等多型终端,结合边缘智能识别算法实现感知与研判,但在环境适用性方面仍存在一定不足[4]。Foster-Miller公司研发的侦测机器人可在未知环境中执行探测任务,具备一定的环境适应能力[5];美国iRobot公司推出的多履带PackBot机器人具备良好的越障能力[6];沈阳新松机器人公司的轮式机器人能够在综合管廊等环境中实现自主作业与信息感知[7];哈尔滨工业大学研发的鱼类等仿生机器人为地下积水区探测提供了解决方案[8]。无人机结合多传感器技术为灾情信息感知奠定了基础,但在地下空间的狭窄复杂环境适应性等方面还需进一步提升[9-10]。在应急通信方面,为了适应灾害现场非视距、多阴影、多路径的信道特性,迫切需要广覆盖、环境自适应的应急通信技术。英国Domo战术通信公司的Mesh通信装备采用编码正交频分复用技术,通过空间极化分级接收增强非视距通信性能;美国Silvus公司采用自适应带宽多进多出(multiple input multiple output,MIMO)技术在空旷地区的传输速率可达100 Mbps,但在地下空间灾害环境下仍面临挑战。中国海能达、鼎桥科技等公司研制的应急通信装备可实现链状、网状等多种拓扑结构自组网。北京邮电大学、北京理工大学突破了地下无线信道建模、链路层接入控制和网络层路由等技术,为地下空间应急通信建模和信号体制研究奠定了基础。本文提出的地下空间应急救援的灾情信息感知与通信技术及装备,可实现应急现场的灾情感知、应急通信、自主作业、辅助决策等全链条,提升城市地下空间的应急救援能力。

1　地下空间灾情信息感知与应急通信架构

1.1　地下空间特点与应急救援需求分析

截至目前统计数据显示,中国城市地下空间

累计建筑面积超32.76亿m^2[11],地下空间具有以下特点:(1)功能复杂多样:地下空间功能从单一向综合化、多元化转变,涵盖了地下轨道交通、综合管廊、地下商业、地下娱乐等[12-14];(2)结构错综不规则:不同地下空间内结构各异,内部各类设施、系统等错综不一;(3)空间规模差异大:复杂大型公共地下空间规模大(如交通枢纽、商业中心等),地下有限作业空间规模小(如地下变电站、地下泵房等)[14];(4)环境封闭风险高:地下空间多位于建筑物、基础设施、山体下,易造成洪涝、火灾、毒害气体泄漏等灾害事故[15]。城市地下空间功能类型如图1所示。

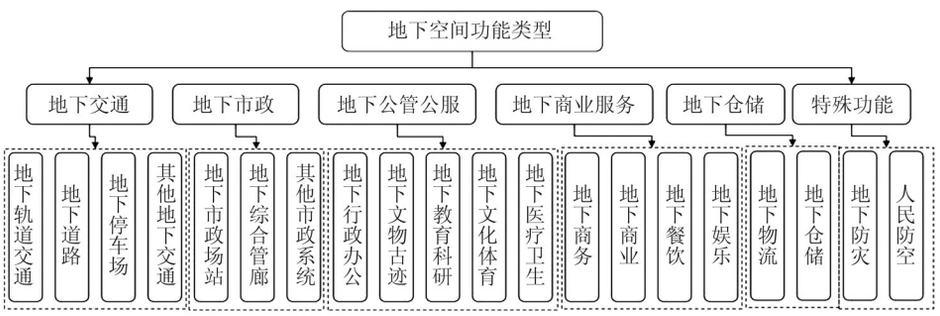


图1 城市地下空间功能类型

Fig. 1 Functional Types of Urban Underground Space

地下空间应急救援技术装备根据不同场景特点,以感知-通信-服务为链条,形成涵盖人车机多传感、多平台的智能协同体。具体需求为:(1)智能化:结合前沿信息、人工智能等技术,在灾情信息精准感知无人车机自主作业、智能理解服务等方面提出了智能化需求;(2)轻量化:结合微组装、轻质化等技术,对感知终端、无人车机、单兵装备、通信系统的体积重量等提出了轻量化需求;(3)标准化:针对灾情感知与通信技术装备的内容多样、接口不一,对数据格式、接口等提出了标准化需求;(4)体系化:以各型感知终端为依托,以无人车机为载体,以通信网络为支撑,对技术装备提出了体系化的需求。

1.2 整体架构设计

围绕智能化、轻量化、标准化、体系化需求,架构涵盖多源终端感知-自主装备集成-多网应急通信-融合智能服务的业务流程链条,如图2所示,具体包含:(1)多源灾情信息感知技术与终端:终端具有可配置、易搭载特点,实现对温湿度气压、毒害气体、地物环境等的感知;(2)无人车机自主作业技术与装备:适用于复杂路面及狭窄空间,具备快速自主行进、测绘、导航等能力,能够支持不同地下空间场景作业需求;(3)救援单兵定位定向技术与装备:利用自主定位与信标辅助,结合人体工程学三维结构的单兵背心实现人员的定位与轨迹测绘;(4)多网协同应急通信网络技术与装备:融合点对点与多网协同通信,实现地下空间复杂信道下的高容量、高可靠通信;(5)信息融合智能服务平台系统:融合与理解现场多源灾情信息,提供辅助指挥决策支持。

1.2.1 多源灾情信息感知技术与终端

针对地下空间三维地物重构、温湿度气压、毒害气体等多源灾情信息精准感知需求,架构包含了SLAM(simultaneous localization and mapping)三维地物测绘、温湿度气压及毒害气体微组装感知技术与终端[16-17]。

1)SLAM三维地物测绘与特征识别

SLAM地物测绘终端兼顾紧凑性、模块化和防护性需求,集成32线激光雷达、惯性导航传感器与微型计算机。其中三维地物测绘技术采用激光与惯导数据的紧耦合算法,并引入激光反射强度和地面约束,提升了三维测绘及重构准确性。同时集成重构图像像素分割和语义关系分析,融合了局部和全局的典型特征识别算法,实现对环境中沟、台、坡等特征的智能识别。三维地物测绘与典型特征识别如图3所示。

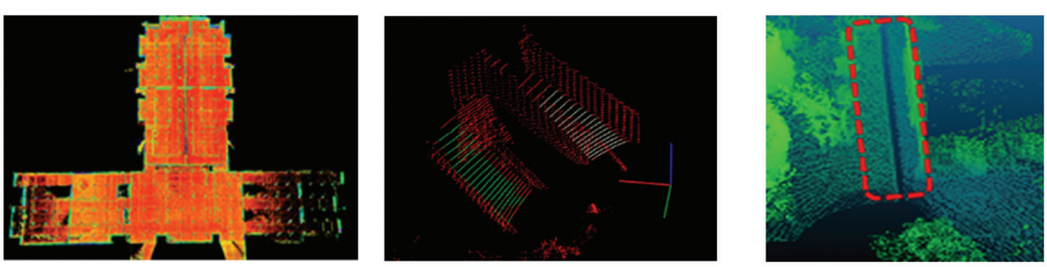
2)温湿度气压及毒害气体感知

感知终端集成热电堆红外温度传感、高精度MEMS(micro-electro-mechanical system)湿度传感、光离子PID(photo ionization detector)有毒气体传感等技术,采用多芯片、可配置和立体化设计实现器件高密度组装,同时利用标准化接口结合手持/车载型适配结构完成即插即用。终端可感知温湿度、气压、二氧化氮、氯气、氨气、硫化氢等,同时结合三维地物测绘信息实现融合场显示。感知终端及融合场显示如图4所示。



图 2　应急救援现场的灾情信息感知与通信架构

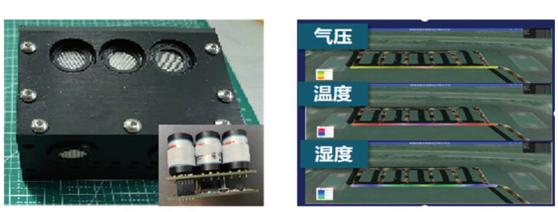
Fig. 2　Disaster Information Perception and Communication Architecture at Emergency Rescue Sites



(a) 地下巷道三维点云　　(b) 楼梯特征识别　　(c)沟特征识别

图 3　三维地物测绘与典型特征识别

Fig. 3　3D Land Surveying and Typical Feature Recognition



(a) 感知终端　　(b) 融合场显示

图 4　感知终端及融合场显示

Fig. 4　Perception Terminal and Fusion Field Display

1.2.2　无人自主作业技术与装备

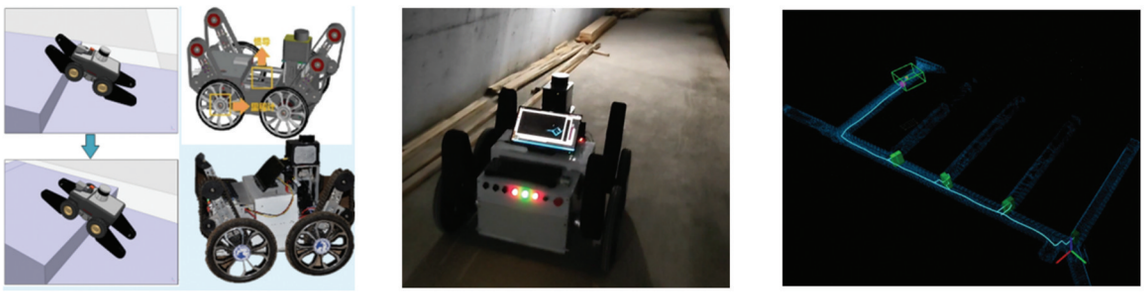
单一作业装备往往难以满足地下空间复杂多场景的需求,架构包含了“轮-履-腿”自主作业无人车、碳纤维笼防碰撞小型无人机[18-20]等装备,可在应急场景中协同作业,应对复杂多变的地下环境。

1)“轮-履-腿”自主作业无人车

面向复杂地形下快速自主作业需求,“轮-履-腿”无人车综合轮式快、履式稳、腿式灵的特点,采用两侧对称、前轮驱动、后轮从动设计,配合多运动模式的自主切换机制并集成模糊自适应平衡控制器,用于提升非平坦路况下的运行稳定性。无人车同时融合了边界点优化和改进A*算法的路径规划算法,实现未知非结构化环境的路径规划。无人车及自主工作如图 5 所示。

2)碳纤维笼防碰撞小型无人机

针对地下空间狭小区域灾情信息感知与现场测绘的需求,无人机结合雷达测绘传感、ResNet-LSTM(ResNet-long short-term memory)声音识别与人员目标识别技术,采用自抗扰控制方法实现飞行的稳定控制,并融合强化学习与A*算法实现自主规划。同时无人机配置了半球形碳纤维保护笼,利用高强度碳纤维材质及弹性悬架系统形成防碰撞保护。无人机及其感知信息如图 6 所示。



(a) 自主无人车示意图 (b) 自主无人车实物图 (c) 自主工作示意图

图5 无人车及自主工作

Fig. 5 Unmanned Vehicles and Autonomous Operation



(a) 小型无人机 (b) 人员感知示意图 (c) 声音感知示意图

图6 小型无人机及感知信息

Fig. 6 Small Unmanned Aerial Vehicles and Perception Information

3)无人车与无人机的协同作业

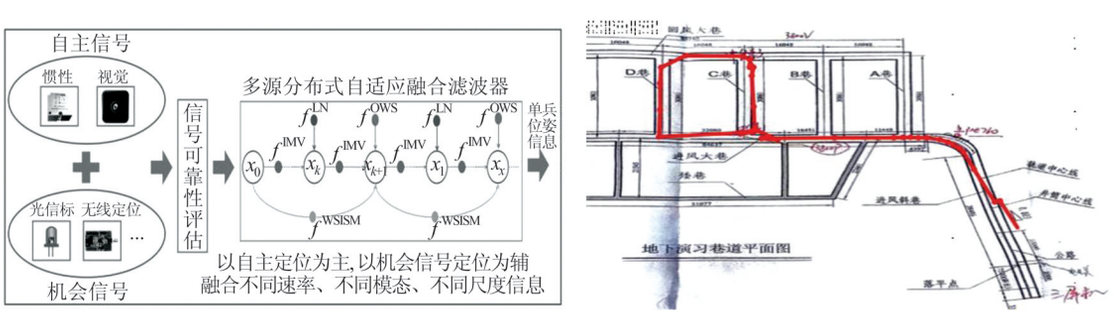
无人车与无人机的协同作业采用两种模式:(1)同步协同模式:无人机与无人车分别同步协同侦测不同尺度区域的灾情信息。(2)先后协同模式:无人机先进入现场并初步获取灾情信息,无人车根据信息研判后续进入现场重点区域。无人机与无人车通过地下应急通信网络系统共享信息及传输至智能服务平台系统,为应急救援提供灾情信息支撑。

1.2.3 救援单兵可穿戴式集成技术与装备

针对现场救援人员的位姿信息缺失等问题,框架中包含了单兵可穿戴式灾情信息获取装备,装备集成弱捷多源弹性融合的定位定向技术,并综合考虑了人机工效学和实战便携化需求[21-23]。

1)多源弹性融合定位定向技术

基于人体运动特点引入了特殊运动形式和先验地图信息的约束,结合人体不规则运动下的位姿误差传播规律,在单兵惯性自主定位定向基础上,以视觉、光信标、无线定位等机会信号为辅助,根据地图信息、环境条件、信号强度和运动形式等因素柔性选择可接入信号,形成多源弹性融合的定位定向技术,实现人员位姿信息与轨迹最优估计。多源弹性融合定位定向技术及轨迹如图7所示。



(a) 多源弹性融合技术 (b) 地下巷道定位定向轨迹

图7 多源弹性融合定位定向技术及轨迹

Fig. 7 Location and Orientation Technology and Trajectory of Multi-source Information Elastic Fusion

2)一体化单兵可穿戴式集成装备

在地下空间环境、运动方式、终端规格等条件约束下,以穿戴舒适性和实战便捷性为目标,结合单兵背心的人体工程学三维结构,集成背心、惯性、视觉及通信等模块,实现单兵可穿戴式装备一体化集成。单兵装备及运动轨迹如图 8 所示。



(a) 单兵可穿戴式集成装备　　(b) 地下商场运动轨迹

图 8　单兵装备及运动轨迹

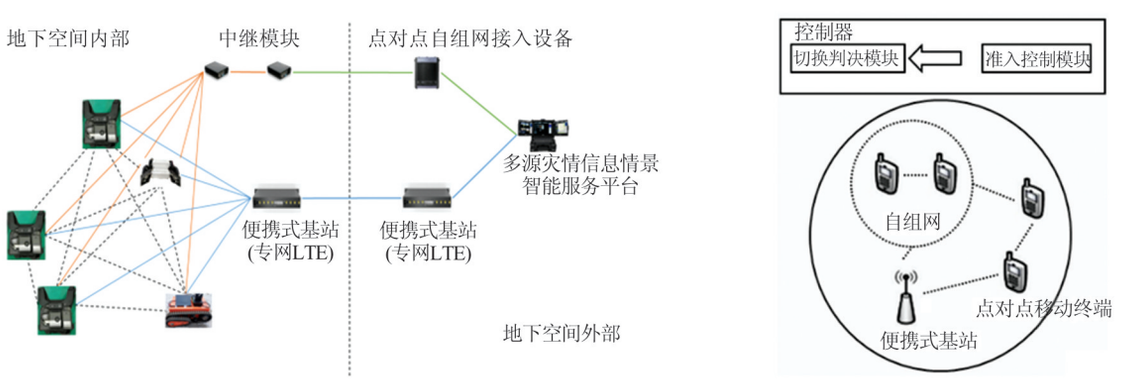
Fig. 8　Individual Equipment and Movement Trajectory

1.2.4　多网协同的应急通信技术与装备

针对地下空间大尺度阴影衰落、长距离信号衰减大等问题,框架中包含了基于自适应频变的多天线正交频分复用点对点传输方案。针对单一网络接入易中断问题,构建了自组网/便携基站相结合的多网协同通信体制,并将小型通信终端与便携式基站组合形成应急通信网络系统装备。

1)点对点与多网协同的应急通信技术

点对点通信利用基于信道几何均值分解的波束赋形算法,通过逆注水原则使信道几何均值分解后的各子信道能量趋于一致,并结合基于最大比合并的接收分集、正交空时编码的发射分集。将多网络的自适应切换问题转换为强化学习下的序贯决策问题,引入了多步学习、双 DQN(deep Q-network)技术以及基于时变图的网络路由中继切换技术。多网协同通信与路由切换如图 9 所示。



(a) 点对点与多网协同通信　　(b) 路由中继切换

图 9　多网协同通信与路由切换

Fig. 9　Multi-network Collaborative Communication and Routing Switching

2)地下空间应急通信网络系统装备

地下空间应急通信网络系统装备包含通信终端与便携式基站,针对地下空间信道状态复杂、网络拓扑结构多变的特点,通过搭载的多天线分集与波束赋形算法保证点对点通信的质量,采用最优路由实时计算和动态中继切换技术实现多网协同应急通信,装备如图 10 所示。

1.2.5　多源灾情信息融合与智能服务技术及平台

基于灾情信息感知、社会化及灾情专题库等多源数据,进一步挖掘了多源灾情信息间的映射关系,结合自适应权重信息处理算法进行灾情信息的时空融合理解[24]。平台利用了多层级架构、统一调度及可视化多源灾情信息,辅助支撑应急现场指挥决策。灾情信息可视化及平台如图 11 所示。

2　实施效果

2023 年 10 月,在四川省珙县依托专业人员在地下模拟灾害现场对灾情信息感知、无人自主作业、单兵可穿戴式集成、多网协同应急通信、智能

服务平台等装备进行了综合验证。灾情信息感知终端可实现地下空间三维地物测绘及环境信息感知,三维测绘误差实现小于等于10 cm。多态灾情信息感知如图12所示。

无人车可实现灾害现场内的自主作业与导航避障,且垂直越障达25 cm,爬坡优于35°。小型无人机可以在复杂空间环境下防碰撞平稳自主作业,同时可获取定位、人员感知与识别功能。单兵可穿戴式集成装备可实现人员的精准定位及轨迹追踪,误差定位小于1 m。在人车机协同作业下,实现对人员可达区域、未知风险区域、狭窄区域等全面信息感知。无人车、无人机、单兵装备的作业效果如图13所示。



(a) 点对点通信终端 (b) 通信网络系统装备

图10 地下空间应急通信网络系统装备

Fig. 10 Emergency Communication Network System Equipment for Underground Space



(a) 灾情信息可视化示意图 (b) 智能服务平台装备

图11 灾情信息可视化与平台装备

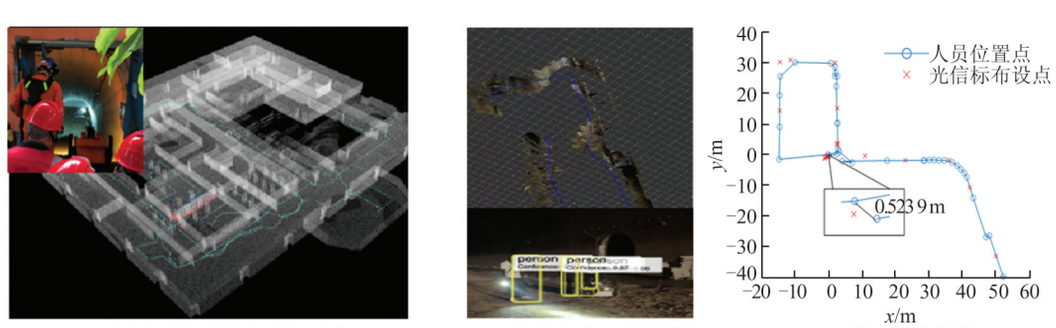
Fig. 11 Visualization of Disaster Information and Platform Equipment



(a) 地下空间三维地物测绘 (b) 灾情信息感知

图12 多态灾情信息感知

Fig. 12 Polymorphic Disaster Information Perception



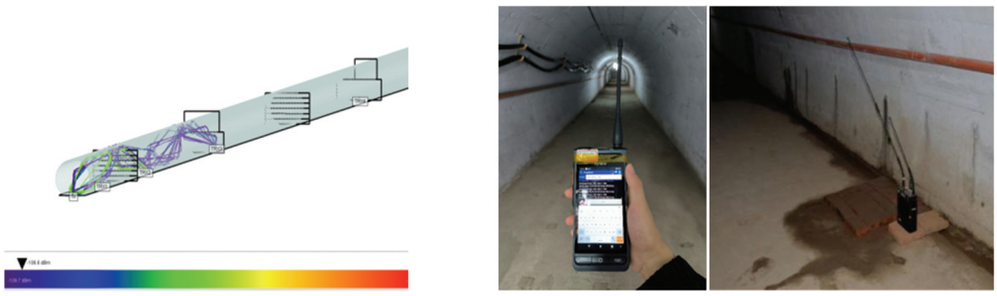
(a) 无人车自主作业与导航避障 (b) 无人机定位及人员感知 (c) 单兵行进轨迹

图13 无人车、无人机、单兵装备的作业效果

Fig. 13 Operation Effect of Unmanned Vehicles, Drones, and Individual Equipment

应急通信网络系统装备如图14所示。基于通信信道的建模信息,通过通信终端及便携式基站的网络拓扑结构自动切换,在复杂信道状态下实现点对点通信距离1.2 km,保证地下空间应急救援的通信可靠性。

综上所述,智能服务平台可以实现多链路多源灾情信息的自适应接入、综合处理与智能融合表达,支持多种展示方式,同时能够面向救援人员、决策指挥人员等提供个性化辅助决策服务。



(a) 地下空间通信信道建模　　(b) 通信终端与便携式基站

图 14　信道建模及应急通信网络系统装备

Fig. 14　Channel Modeling and Emergency Communication Network System Equipment

3　结　语

针对灾害事故导致地下空间现场的应急通信受阻、作业不畅、情况不明等问题,本文以应急救援实际需求为牵引,综合考虑了应急现场环境适应性、平台适配性等因素,提出了面向地下空间应急救援的灾情信息感知与通信技术及装备,包含了灾情信息感知、无人自主作业、单兵可穿戴式集成、多网协同应急通信、情境感知智能服务等技术及装备,并通过了综合性验证,为地下空间救援现场的灾情获取及应急决策能力提供了有力的支撑,进一步提升灾害事故应急救援与处置能力。

参　考　文　献

[1] 中国标准化研究院. 地下空间应急救援数据与传输通用要求: GB/T 12345—2024 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
China National Institute of Standardization. General Requirements for Emergency Rescue Data and Transmission in Underground Spaces: GB/T 12345—2024. [S]. Beijing: China Standard Press, 2024.

[2] 王勇, 韩遥遥, 刘纪平, 等. 应急救援地理空间情报: 概念特征、生成技术及应用实践[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, DOI:10.13203/J. whugis20240300.
WANG Yong, HAN Yaoyao, LIU Jiping, et al. Geospatial Information of Emergency Rescue: Concept, Characteristics, Generation Technology and Application Practice[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, DOI: 10.13203/J. whugis20240300.

[3] 董炳艳, 张自强, 徐兰军, 等. 智能应急救援装备研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2020, 56(11): 1-25.
DONG Bingyan, ZHANG Ziqiang, XU Lanjun, et al. Research Status and Development Trend of Intelligent Emergency Rescue Equipment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(11): 1-25.

[4] 张英杰. 面向灾后环境的搜救机器人研制及地图构建技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
ZHANG Yingjie. Research on Development of Search and Rescue Robot and Map Construction Technology for Post-Disaster Environment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.

[5] WELLS P, DEGUIRE D. TALON: A Universal Unmanned Ground Vehicle Platform, Enabling the Mission to Be the Focus [C]//Unmanned Ground Vehicle Technology VII, Orlando, USA, 2005.

[6] YAMAUCHI B M. PackBot: A Versatile Platform for Military Robotics[C]//Unmanned Ground Vehicle Technology VI, Los Angles, USA, 2004.

[7] 刘明芹. 搜索机器人设计与基于多机器人视觉观测的环境感知方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
LIU Mingqin. Design of Search Robots and Environmental Perception Methods Based on Multi-Robot Vision [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

[8] 杨春雨, 张鑫. 煤矿机器人环境感知与路径规划关键技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2844-2872.
YANG Chunyu, ZHANG Xin. Key Technologies of Coal Mine Robots for Environment Perception and Path Planning[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2844-2872.

[9] 董秀军, 邓博, 袁飞云, 等. 航空遥感在地质灾害领域的应用: 现状与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 1897-1913.
DONG Xiujun, DENG Bo, YUAN Feiyun, et al. Application of Aerial Remote Sensing in Geological Hazards: Current Situation and Prospects[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(12): 1897-1913.

[10] HE B, JI X X, LI G, et al. Key Technologies and Applications of UAVs in Underground Space: A Re-

view[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2024, 10(3): 1026-1049.

[11] 南京慧龙城市规划设计有限公司. 中国城市地下空间发展蓝皮书[M]. 上海: 同济大学出版社, 2024.
Nanjing Huilong Urban Planning and Design Co. Ltd. Blue Book of Urban Underground Space Development in China [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2024.

[12] 雷升祥, 申艳军, 肖清华, 等. 城市地下空间开发利用现状及未来发展理念[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 965-979.
LEI Shengxiang, SHEN Yanjun, XIAO Qinghua, et al. Present Situations of Development and Utilization for Underground Space in Cities and New Viewpoints for Future Development[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(4): 965-979.

[13] 朱合华, 丁文其, 乔亚飞, 等. 简析我国城市地下空间开发利用的问题与挑战[J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 22-31.
ZHU Hehua, DING Wenqi, QIAO Yafei, et al. Issues and Challenges in Urban Underground Space Utilization in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(3): 22-31.

[14] 吴健波, 岳伟涛, 王恩元. 2001—2023年中国城市地下空间开发利用研究特征与趋势: 基于CiteSpace和VOSviewer知识图谱分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(2): 83-89.
WU Jianbo, YUE Weitao, WANG Enyuan. Characteristics and Trends of Research on Development and Utilization of Urban Underground Space in China from 2001 to 2023: Based on Knowledge Graph Analysis of CiteSpace and VOSviewer[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2025, 21(2): 83-89.

[15] 胡志平, 彭建兵, 张飞, 等. 浅谈城市地下空间开发中的关键科学问题与创新思路[J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 76-84.
HU Zhiping, PENG Jianbing, ZHANG Fei, et al. The Critical Issues and Creative Concepts in the Development of Urban Underground Space[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(3): 76-84.

[16] WANG J W, ZHUANG Y, LIU Y S. FSS-Net: A Fast Search Structure for 3D Point Clouds in Deep Learning[J]. *International Journal of Network Dynamics and Intelligence*, 2023, 2(X): 100005.

[17] ZHANG Y X, PAN D W. Layered SIRS Model of Information Spread in Complex Networks[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2021, 411: 126524.

[18] 左辛凯. 面向无人车自主探索路径规划的多层次地图模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 2107.
ZUO Xinkai. Hierarchical Map Models for Unmanned Ground Vehicle Autonomous Exploration Path Planning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(12): 2107.

[19] SONG K, JIA Q X, CHEN G, et al. Autonomous Balance of Wheel-Legged Robot Based on Back Stepping Sliding Mode Control [C]// International Conference on Guidance, Navigation and Control, Paris, France, 2023.

[20] XU S H, GU Y, LI X Y, et al. Indoor Emergency Path Planning Based on the Q-Learning Optimization Algorithm[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2022, 11(1): 66.

[21] 王一静, 苏中, 李擎, 等. 地下空间单兵定位零速修正算法仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(11): 2545-2551.
WANG Yijing, SU Zhong, LI Qing, et al. Simulation of Zero-Speed Correction Algorithm for Underground Space Individual Positioning[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(11): 2545-2551.

[22] 赵辉, 苏中, 刘宁, 等. 基于双轴地磁航向误差自旋修正的行人自主定位方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(6): 585-592.
ZHAO Hui, SU Zhong, LIU Ning, et al. Pedestrian Autonomous Positioning Method Based on Biaxial Geomagnetic Azimuth Error Rotation Correction [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2023, 31(6): 585-592.

[23] 节笑晗, 刘宁, 沈凯, 等. 基于迭代自适应的多状态约束视觉/惯性融合定位算法[J]. 太原理工大学学报, 2025, 56(2): 356-364.
JIE Xiaohan, LIU Ning, SHEN Kai, et al. Iterative Adaptive Multi-State Constrained Visual/Inertial Fusion Positioning Algorithm [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2025, 56(2): 356-364.

[24] LUO A, LIU J P, LI P P, et al. Chinese Address Standardisation of POIs Based on GRU and Spatial Correlation and Applied in Multi-source Emergency Events Fusion[J]. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2021, 12(4): 319-334.