

空天地一体化的应急救援通信组网研究

戴翠琴^{1,2}, 谢颖¹, 王海鹰³, 唐宏^{1,2}, 陈前斌⁴

1、重庆邮电大学 通信与信息工程学院 2、移动通信技术重庆市重点实验室

3、中国地震应急搜救中心

4、移动通信教育部工程研究中心

摘 要: 传统应急救援通信系统以地面为主, 受到地理位置的限制以及突发灾害的影响, 使得应急救援通信受到约束。空天地一体化的应急救援组网通过联合卫星应急通信系统、无人机应急通信系统和地面应急通信系统的优势, 保证应急救援通信的高效传输, 将突发灾害造成的损失降到最低, 以维护生产、生活秩序的稳定。首先, 概述了国内外应急通信系统的发展现状; 接着, 对空天地一体化应急救援通信组网架构进行分析; 然后, 归纳了卫星应急通信系统、无人机应急通信系统、地面通信系统以及空天地一体化应急通信系统的关键技术。最后, 对空天地一体化的应急救援通信组网发展进行了展望。

关键词: 应急救援通信, 空天地一体化, 组网架构, 关键技术

Research on emergency rescue communication networking for air-space-ground integrated networks

Cui-Qin Dai, Ying Xie, Haiying Wang, Hong Tang, Qianbin Chen

(¹ School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and

Telecommunications ² Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing

³ National Earthquake Response Support Service ⁴ Engineering Research Center of Mobile

Communications, Ministry of Education)

Abstract: Traditional emergency rescue communication system is principally ground-based, constrained by the limitation of geographical location and the impact of unexpected disasters, making emergency rescue communication restricted. Through combining the advantages of satellite emergency communication system, unmanned aerial vehicle(UAV) emergency communication system and ground-based emergency communication system, the air-space-ground integrated emergency rescue network ensure efficient transmission of emergency rescue communication, minimize the damage caused by sudden disasters, and maintain the stability of production and life order. Firstly, the current state of development of emergency communication systems at home and abroad is overview. Next, the air-space-ground integrated emergency rescue of network architecture is analyzed. Then, the key technologies of satellite emergency communication system, UAV emergency communication system, ground communication system and air-space-ground integrated emergency communication system are summarized. Finally, the outlook on the development of an integrated air-space-ground integrated emergency rescue communication network is provided.

Keywords: emergency rescue communication, air-space-ground integrated, network architecture, key technologies

0 引 言

近年来, 森林草原火灾、地震和地质灾害等自然灾害以及可能存在的战争等人为灾害对传统地面应急救援通信系统提出了更严峻的挑战。此类灾害发生后通常会导致公网瘫痪、道路损毁、电力中断, 同时伴以复杂的地形和气象条件, 造成灾区无法对外联络, 外界也无法针对灾情开展救援, 使得救灾工作非常被动。因此, 在灾害现场需要快速有效地构建一种大范围覆盖的应急救援通信系统来确保实时灾情信息报送, 从而为决策制定、指挥协调、救援救助等提供有效保障, 将灾害损失

降到最低,最大程度维护生产、生活秩序的稳定^[1]。应急通信系统的性能具有广覆盖、低时延、宽带化的趋势。传统的应急通信系统存在网络带宽窄、较大的时延难以支持实时型较强的业务、覆盖范围小、卫星终端普及率低、信号差、设备供电时间短等问题,难以承担当前大带宽、低延迟、广覆盖的实时通信需求。因此,空天地一体化网络架构,如何通过应急救援通信组网建立具备通信面积大、覆盖范围广、恢复能力强的应急通信保障体系日益成为人们关注的重点。

在网络架构方面,应急通信系统具有从传统地面网络架构向空天地一体化网络架构演进的趋势。随着地面移动通信技术的升级换代以及 5G 基站的全局推广,5G 可作为应急通信的常用通信手段,全面保障应急通信语音、视频、数据等综合业务,支持全面融合大数据云计算、人工智能等新兴技术,从而全面提升应急通信保障服务能力^[2]。然而,地震、森林火灾等灾害事故现场通信保障的难点在于,受灾区域的地面常规通信设施遭受损坏无法使用,灾区与外部的交通中断,车辆、大型通信器材很难在短时间内进驻现场,因此通信保障难度较大,此类现场的内外通信保障主要以卫星通信为主^[3]。卫星通信系统具有很好的网络兼容性,其数据容量大,能提供较多的业务种类,且维护费用相对较少,基本不受地理环境条件的影响。对于灾后救援中紧急情况下的通信,卫星通信可以发挥机动灵活的特点,甚小口径终端(Very Small Antenna Terminal, VSAT)的设备可以在汽车、运输设备上安装,甚至可以单兵携带,可以有效为应急指挥、抢险救灾工作提供坚实的通信保障和信息服务^[1]。同时,随着无人机平台的成熟使用,应急通信适时引入低空无人机通信,可以作为承上启下的通信节点。无人机既能增大通信带宽和通信覆盖范围,还可以对卫星覆盖盲区进行补盲通信,特别是在高山峡谷或沟壑湖泊的复杂地理环境下,可以有效满足应急通信需求^[2]。

在关键技术方面,传统地面应急通信系统在面临突发的紧急情况时,地面光纤通信被破坏其优势也随之消失,地面微波中继技术能够在该艰难环境中搭建应急设施实现数据的传输。此外,地面应急传输机制联合生物仿生协议,结合地理信息通过对紧急数据的高效转发,以实现对应急救援的可靠保证。但由于地面应急通信系统受地理位置的限制,当地面应急通信系统在受损严重时,其优势不能再体现。因此,无人机、卫星应急通信系统作为地面应急通信系统强有力的补充,其关键技术被广泛关注。无人机应急通信系统能够在短时间内实现快速部署,无人机群的智能部署与控制技术能够为飞行过程中数据融合及编队控制等方面带来诸多便利,从而实现协同任务分配、协同航迹规划等。考虑不同类型无人机的应用场景受限,卫星应急通信系统凸显其在应急救援中的重要地位。卫星成熟的星上处理技术,在收到地面终端发送的信息时,能够通过可靠的调制编码方式对数据进行处理,从而实现数据的交换,使得卫星网络能更好的与地面网络融合。此外,由于卫星终端的普及率低,当地面通信设施失效时,引入 VSAT 作为预备选择,从而保证终端用户之间的数据传输。空天地一体化应急救援系统作为应急通信系统的完备网络,考虑空天地一体化应急通信系统的各种特征,其各项网络技术,能够实现保证整体网络的连通性、网络资源的灵活自动配置以及满足不同应用的需求等优势。

本文针对空天地一体化应急救援通信组网,在接下来的部分中,首先概述了国内外应急通信系统的发展现状以及存在的问题,接着对整个系统的组网架构中的各个层级的设备功能和性能参数、工作方式以及系统优势进行分析,然后归纳了空天地一体化应急救援组网中的卫星应急通信系统、无人机应急通信系统和地面通信系统的关键技术,以及空天地一体化应急通信系统的融合关键技术,最后对全文进行了总结以及对空天地一体化应急救援通信组网需求进行了展望。

1 应急通信系统发展现状

应急通信是应对突发紧急情况,综合各类通信组网来满足通信需求的一种特殊通信机制。应急通信不是一种新型技术,其灵活融合空天地通信方式,以期达到稳定可靠的通信^[4]。因此,应急通信系统作为突发自然灾害的首要选择,能够快速提供应对方案,从而受到国内外的广泛关注^[5-15]。

表 1 国外应急通信系统对比^[4]

国家/地区	应急通信系统	通信方式
美国	国家安全应急准备计划、美国联邦应急管理信息系统、紧急报警系统	即时消息、视频、wi-fi 和卫星通信
欧盟	e-Risk 系统	有线/无线语音系统、宽带卫星
日本	专用防灾通信网、嵌入应急防灾功能的民用通信网	电台或传真、卫星系统

在国外,西方国家由于通信技术起步较早,应急通信系统相对成熟,表 1 列举了美国、欧盟等发达国家和地区的应急通信系统建设现状。以上三者都将卫星通信系统融入到传统地面应急通信系统之中。美国国家安全应急准备计划利用商业 C 波段卫星的互连,在传统地面应急通信系统的重要节点之间提供替补路由,在灾害发生时重建远程公用网,提供话音和数据服务。美国紧急报警系统通过与数千个广播电(视)台、有线电视系统以及卫星公司相连,可在紧急状况下向公众传递消息。欧盟“e-Risk”系统也是一个基于卫星通信的网络基础架构系统,其利用卫星通信和多种通信手段,为其成员国实现跨国、跨专业、跨警种且高效及时地处理突发公共事件和自然灾害提供支持服务。日本的防灾通信网络基本依托无线通信技术,中央防灾无线网是日本防灾通信网的骨干网,主要由固定通信线路(包含图像传输线路)、卫星通信线路、移动通信线路组成^[5]。随着无人机技术的日趋成熟,将其融入传统应急通信系统逐渐成为国外相关领域学者的重点研究方向。文献[6]提出了一种无人机辅助的泛在网状应急救援网络架构,以建立救援人员与受困群众之间的联系,并据此制定救援计划;文献[7]提出了一种应急网络—无人机上的 WiND 或 Wi-Fi 网络,用于在应急救援时提供互联网、内联网短信和监控;文献[8]提出了一种基于配备 5G 移动通信基站的无人机的远程应急移动通信基础设施(MHMI),并讨论了其应用场景、架构和关键技术;文献[9]提出基于飞行网状网(FMN)和救援人员创建的移动自组网(MANET)相结合的无线多跳网络(WMHN)为救援人员和幸存者提供连接;文献[10]提出了一个基于 SDN 的实时应急响应系统框架,SDN 控制器根据不同业务数据的紧急程度来确定其优先级,从而最小化端到端延迟。

在国内,我国经济发展水平和体制的不同,与发达国家在救灾领域通信技术研究状况相比还有一定的差距。我国真正意义上的应急管理体系建立是在 2003 年 SARS 疫情以后,建设应急体制、机制、法制为核心内容的“一案三制”应急管理系统。然而,受限于各地的应急平台建设发展不平衡,应用功能不完善,我国传统应急通信系统普遍都面临速率低、带宽不足、时延高和互联互通性差等问题。为了解决这些问题,我国诸多学者进行了许多关于将卫星通信和无人机融入传统应急通信的研究。文献[2]从需求、技术、网络架构、节点、服务保障、标准规范等方面对新一代应急通信提出了相关建议和设想;文献[5]讨论了卫星通信系统在应急领域的应用,展望了卫星通信的新技术及其未来发展;文献[11]讨论了“空天地”融合网络中无人机与蜂窝设备结合在应急通信领域的应用,提出了固定翼无人机应急通信系统架构和系留无人机应急通信系统架构;文献[12]讨论了紧急场景中的社会感知特性和无人机辅助的信息传播,并提出了社会物联网中基于无人机辅助的应急通信架构;文献[13]提出了基于便携式卫星通信站和无人机构建的应急通信保障新体系,并介绍了其基本结构和功能;文献[14]基于救援队多样化的灾害场景、任务、通信指挥等需求,提出了一种应急救援指挥通信平台架构,包括态势感知、辅助决策、行动控制、任务管理、资源调度等;文献[15]构建了基于我国自主研发的天通一号卫星移动通信系统的应急救援指挥平台,以实现对救援信息的及时和综合分析。

综上所述,当前国内外应急救援通信组网研究虽已进入寻求将卫星通信和无人机通信融入传统应急通信的阶段,但仍存在许多关键问题尚未解决。例如,大范围的异构、多源多维信息所带来的复杂网络结构和网络互联互通的问题;不同终端设备的网络兼容性问题;避免网络拥塞的路由设计

问题;网络资源管理和干扰管理问题等等。针对以上关键问题,将从网络架构、关键技术以下两方面进行分析。

2 空天地一体化的应急通信系统架构

空天地一体化应急通信系统主要采用北斗、天通和宽带卫星等卫星通信系统,融合地面传感器、用户终端设备、5G 通信传输技术,结合无人机自组网及通信手段,搭建空天地一体的应急救援通信保障体系,实现应急通信的无缝覆盖、无缝连接,满足重大自然灾害范围下,重点灾害区域现场通信不间断传输需求。由图 1 可知,空天地一体化应急通信系统可以划分为地面移动通信、低空无人机通信和高空卫星通信 3 个层级,本节主要介绍了整个系统的组网各个层级的设备功能和性能参数、工作方式以及系统优势。

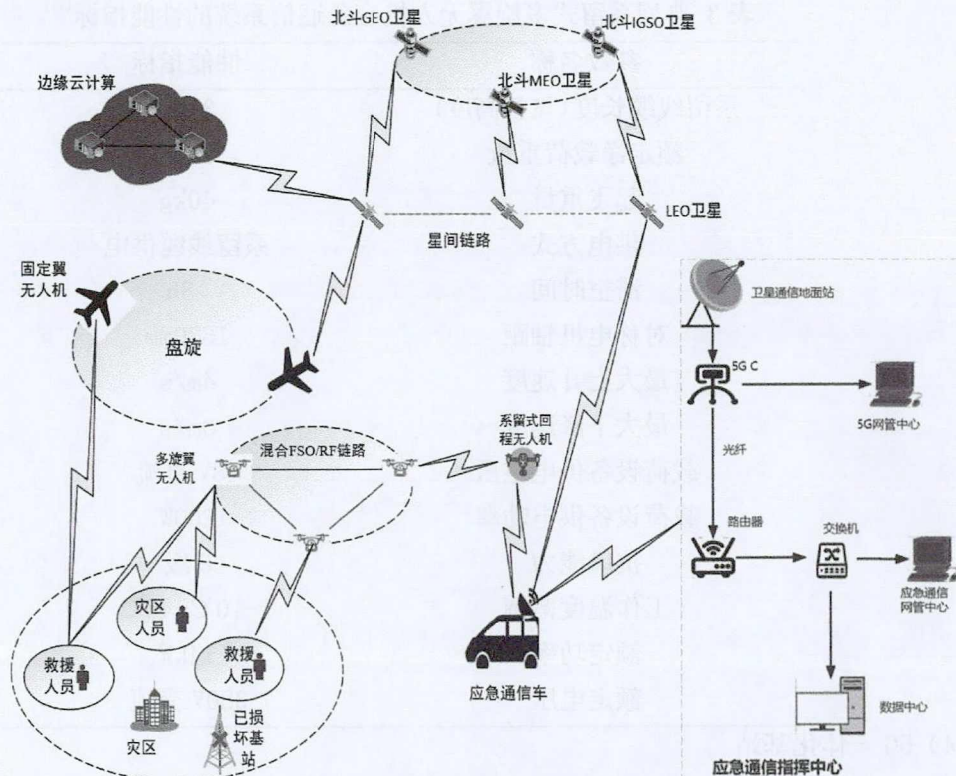


图 1 空天地一体化的应急救援通信系统

2.1 主要设备功能及性能参数

空天地一体化应急通信组网由包含北斗卫星和 LEO 卫星的高空卫星通信系统、低空无人机通信系统和地面 5G 通信系统组成。在本节,分别对这三层级通信系统中的主要设备及其性能参数进行介绍。

1) 北斗卫星

北斗卫星导航系统(Beidou Navigation Satellite system, BDS)是我国自主研发的卫星导航系统,具有快速定位(高精度为 10m)、实时导航(测速精度为 0.2 m/s)、精确授时(授时精度为 10ns)、位置报告和短报文通信服务 5 大功能。上行 L 频段,下行 S 波段。北斗系统的精确定位和短消息通信功能在应急通信中的应用具有广阔的研究空间,可用于受灾区域的定位、灾情数据回传、补盲通信覆盖等。

2) LEO 卫星

低轨卫星具备中继通信、提高北斗卫星定位精度、补盲通信覆盖等功能。主要采用 Ku 频段:上行: 14.0GHz~14.5GHz,下行: 12.25GHz~12.75GHz,卫星通信数据速率约为 64~2048kbps。中国现阶段的 LEO 星座及其参数如表 2。

表 2 中国的 LEO 星座

LEO 星座	卫星数量	高度/km	完成年份	主要功能
鸿雁	54	1100	2023	宽带和导航增强
虹云	156	1000	2022	宽带和导航增强
CentiSpace	120	700	2021	宽带和导航增强

3) 无人机

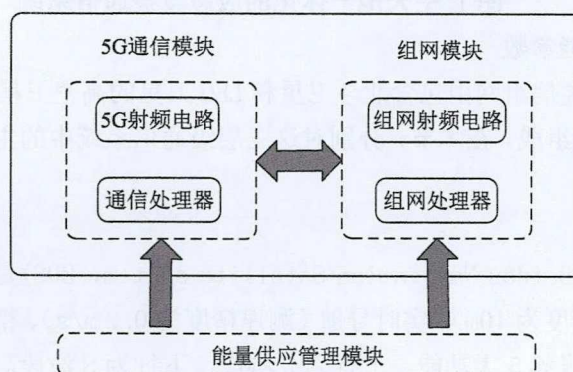
无人机主要通过搭载通信载荷 (5G 一体化基站) 来实现空中蜂窝组网通信功能, 以及搜救载荷 (机载摄像头、红外热像仪、激光测距仪、合成孔径雷达等) 来实现应急救援功能。一种典型系留式多旋翼无人机应急通信系统的性能指标见表 3。

表 3 典型系留式多旋翼无人机应急通信系统的性能指标^[16]

参数名称	性能指标
系留线缆长度(飞行高度)	312m
额定净载荷重量	20kg
起飞重量	40kg
供电方式	系留线缆供电
滞空时间	>8h
对称电机轴距	1630mm
最大上升速度	4m/s
最大下降速度	3m/s
载荷设备供电电压	48V 直流
载荷设备供电功率	200W
抗风能力	6 级
工作温度范围	-10℃-45℃
额定功率	14kW
额定电压	380V 交流

4) 5G 一体化基站

5G 一体化基站主要由 5G 通信模块、组网模块和能量管理模块组成, 如图 2 所示。

图 2 无人机通信载荷 (5G 一体化基站) 体系结构^[17]

5G 通信模块主要由 5G 射频电路和通信处理器组成, 负责 5G 信号的基础覆盖。其中 5G 射频电路直接与天线相连, 实现 5G 射频信号的物理层收发处理; 通信处理器负责 5G 基带信号处理。组网模块由组网射频电路和组网处理器组成。其中组网射频电路直接与天线相连, 主要实现组网射频信号的物理层收发处理; 组网处理器负责组网和飞控信息的处理以及组网和飞控协议运行。能量管理模块由电池充电供电系统和休眠唤醒系统等组成, 为载荷模块供电, 确保系统的正常运转^[17]。

2.2 组网工作方式

在应急救援层面,救援人员携带的搜救终端和无人机收集到的地面灾情数据主要通过卫星和无人机进行回传。在整个蜂窝基础设施被摧毁的情况下,只有卫星可以提供可用的无线回程连接,卫星通过边缘云计算来处理大量的数据,再把整合的数据通过无线回程连接的方式回传至地面指挥中心。而多旋翼无人机平台囿于载荷限制不能配备卫星收发设备,无法通过卫星链路进行数据回传。为了解决回传问题,可以使用系留式多旋翼回传无人机,通过馈线电缆连接到应急通信车中的卫星收发设备和多旋翼无人机自组网,最终通过卫星链路实现业务回传。地面应急指挥中心对接收到的灾情数据进行分析,辅以救援指挥决策专家系统,为应急指挥提供更准确的决策依据,并实时将救援指令传输到低轨卫星,低轨卫星通过下行链路将指令传输到无人机组组成的联合基站,再到地面搜救终端。

在通信覆盖层面,主要通过无人机自组网实现灾区的应急通信覆盖。无人机自组网是将搭载一体化基站的无人机作为网络节点,动态组成临时性的多跳网络。基站在空中接收地面信号再传输到接收端,可以有效扩大信号覆盖范围、提高数据传输速率。多旋翼无人机具有操控简单、可长时间悬停等特点,在灾害发生时可搭载快速一体化专用基站设备升空,构建低空蜂窝网络,为灾区的救援人员和群众提供通信服务。系留式无人机则作为通信汇聚节点和整个无人机网络的中央控制器的同时,为整个无人机网络提供了回程连接。

2.3 系统组网优势

空天地一体化的应急救援通信组网架构相比传统应急通信系统架构具有应急救援和通信覆盖两方面的优势。

在应急救援方面,空天地一体化的架构包含卫星、无人机和地面搜救终端,能覆盖整个灾区,对语音、图像、视频等灾情信息的收集更为精确、全面。同时,卫星无线回程连接和车载有线回程连接使得灾情数据的传输更为高效。边缘云计算则可以在数据过于庞大时,将大量的灾情数据从集中计算扩展到网络边缘,以改善服务延迟和节省资源,可以有效地避免网络拥塞,提高服务延迟中的系统服务质量,加快救援指挥响应速度。

在通信覆盖方面,利用空中无人机平台搭载通信设备升空建立中通信平台,相比传统应急通信系统可以更好地解决复杂地形条件下的无线通信覆盖问题。无人机平台具有体积较小、空中机动性好、部署方便快捷的特点,在应急需要时即可升空为地面通信终端进行广范围中继传输,组网更加灵活便捷,实现灾区通信的全面、高效、可靠覆盖。

3 空天地一体化应急通信组网关键技术

针对应急通信场景,本节分别对卫星、无人机、地面以及空天地一体化应急通信关键技术进行介绍,在3.1小节中介绍了卫星应急通信关键技术,3.2小节中介绍了无人机应急通信关键技术,在3.3小节中介绍了地面应急通信关键技术,在3.4小节中介绍了空天地一体化应急通信关键技术。

3.1 卫星应急通信关键技术

本小节介绍了空天地一体化网络中卫星应急通信的关键技术,主要包含卫星星上处理技术和卫星终端站。对于地面通信基础设施受损时,卫星星上处理技术旨在通过调制编码方式完成对接收到的来自终端或无人机数据进行处理,从而保证在紧急救援时通信数据的可靠。在应急通信场景下,卫星终端站作为地面通信设施失效的预备选择,保证终端用户之间的语音、数据、多媒体通信等业务的传送。

1) 星上处理技术

卫星星上处理(Onboard Processing, OBP)技术是指对来自卫星上行链路的射频载波携带的信息进行信号处理,以实现数据的交换,使卫星网络与地面网络的融合变得简单和方便。调制解调,可

靠编码技术等影响应急通信质量的关键星上处理技术。

在空天地一体化通信系统中,卫星通信信道非线性的特点,会导致已调波的外包络发生波动,从而进一步导致相位失真和频谱扩展^[18]。为适应卫星通信信道,数据传输时选择的调制方案应具有信号包络波动小的特点。为此,MPSK (multiple phase shift keying)在数据传输中得到了广泛的应用。随着对业务容量需求的不断增加,频谱资源日益稀缺。因此,提出了幅相结合的调制方案,能有效降低频谱使用成本、提高带宽利用率^[19]。APSK(amplitude phase shift keying)作为一种PSK与QAM相结合的调制方式,有较高的频谱效率^[20],能改善频谱资源紧张的问题,且信号的幅度值较少、包络起伏小,即PAPR(peak to average power ratio)低,能有效抵抗功率放大器的非线性失真^[18]。文献[19]提出了一种基于Hopfield神经网络(HNN)的APSK信号解调器,以降低解调的复杂性,提高解调的稳定性。文献[20]研究了延迟比特交织编码调制(delayed bit-interleaved coded modulation, DBICM)的APSK星座,发现DBICM的容量与编码调制容量相同。并通过信道容量分析表明在较小延迟下可以实现良好的性能;文献[21]发现,相比于QAM,APSK调制可以更好地调节自相位和交叉相位调制和激光相位噪声。

由于卫星通信距离远、时延长,选用可靠的编码技术,可以有效的降低通信系统的误码率,以保证在应急通信中数据传输的正确性。数据系统咨询委员会(CCSDS)推荐的编码有卷积码、RS码、LDPC码、Turbo码等。但对于上述已有的传统编码方式,各类码型的适用范围有一定限制且在实现过程中具有结构复杂、资源消耗多等劣势。因此,提出将其结合的方式,文献[22]提出了具有循环冗余校验的RS码和LDPC,其中RS码和LDPC码分别作为内码和外码来纠正突发错误和随机错误,仿真结果表明提出的编码性能优于传统编码。此外,极化码(Polar code)已在理论上被证明可以达到二元对称信道的信道容量^[23-25]。文献[23]在可见光通信中,使用固定比特索引的方法限制编码游程长度来设计Polar码,利用不同的指标设置不同的先验概率,以降低误码率。文献[24]通过将极性码分解为若干外码,在硬判决过程中避免对一些外码进行译码,从而降低译码复杂度。文献[25]在考虑多种复杂限制条件下,设计了一种具有迭代译码性能的编码调制系统。为满足星间链路、星地链路不同业务需求,实现信息高效可靠传输,卫星通信可采用自适应调制编码技术,通过使用不同方式、速率的编码调制以保证在应急救援的情况下各类业务信息的高效传输。

2) 卫星终端站

VSAT是与一种具有小口径天线的微型或小型地球站,通常与卫星通信系统结合,可以随时随地应用于所需地点。VSAT卫星应急通信网的组网结构一般是由一个主站和许多VSAT站配合组成的一类广域稀路由(站多,各站业务量小)的卫星应急通信网。该技术目前已成熟,可随环境变化而变化,而且传输机制稳定,对各类应急环境通信处置工作提供了强有力的保障。

小站设备天线口径通常为1.2m—2.4m,可工作在C、Ku和Ka频段上。由于VSAT终端工作频段较高,其较高的天线增益可支持高速数据传输,目前VSAT终端的最低起步速率通常为512kbit/s^[26],VSAT还能够支持更高的带宽需求,工作在Ka频段时出站最高可达4Mbps,入站最高可达10Mbps^[27]。此外,VSAT可充分利用Ku/Ka双频段天线自由切换2个频段,可满足应急通信宽带信息传输的实际需求,同时也避免了恶劣天气对应急信息通信所造成的负面影响,有效促进卫星应急通信系统从Ku向Ka宽带的有效过渡,二者融合应用,充分保证了卫星应急通信系统的优化应用^[28]。

3.2 无人机应急通信关键技术

本小节介绍了空天地一体化网络中无人机应急通信的关键技术,对于地面通信基础设施受损,短时间内无法恢复工作的应急通信场景,配备基站或中继器的无人机可在第一时间为应急区域内的用户提供无线通信保障。无人机在通信应用场景中的不同作用可以分为无人机基站、无人机中继和无人机用户。随着无人机向密集化、协作化、智能化方向的发展,将逐渐演变为无人机集群或无人机蜂群^[29]。

1) 应急通信的无人机类型及无人机基站研究

旋翼无人机体积小, 结构简单, 重量轻、操作简单等特点, 被广泛应用于应急通信领域。专业无人机包括固定翼和旋翼两种类型。相比旋翼无人机, 固定翼无人机体积比较大, 场地会限制其升降, 操控比较复杂。固定翼无人机虽然拥有载荷大, 续航时间长等特点, 但是由于对各项设备要求较高, 不适合快速搭建高空基站。

目前无人机作为机载基站的研究包括旋翼无人机高空基站和系留无人机高空基站。其中旋转翼无人机高空基站研究: 搭载 TDD 一体化小型无线设备 ($2 \times 5W$) 输出功率, 采用中继进行回传, 在 100m 高度, 在实际测试中平均 RSRP-74dBm, LTE 平均下载速率 7.5Mbps, VoLTE 平均 MOS 值 3.2, 而覆盖半径可达 1.23km。系留式无人机高空基站研究: 搭载 TDD 小型化无线设备 ($2 \times 10W$) 输出功率, 采用光电混合线缆进行供电和回传, 可以 24h 进行悬停, 在 100m 高空下, 在实际测试中平均 RSRP-96.6dBm, LTE 平均下载速率 13.5Mbps, VoLTE 平均 MOS 值 3.7, 有效覆盖半径可达 3.8km, 可满足部分应急救援场景需求^[30]。

2) 无人机智能部署和控制技术^[29]

由于在自然灾害情况下, 区域大, 且地域条件复杂多变, 所以需要多台无人机进行机群协同任务。引入无人机智能部署及控制技术为飞行过程中数据融合及编队控制等方面带来诸多便利。首先可以利用无人机集群系统来完成此项任务, 无人机集群系统包含若干无人机, 这些无人机通过通讯设备组网通讯进行信息交流, 从而实现协同任务分配、协同航迹规划和编队飞行控制, 从而实现无人机集群协同执行任务。其次受地面自组网思想启发, 无人机同样可以引入自组网概念, 即使某个无人机节点无法与地面控制站进行通信连接, 也能通过它与其它无人机的连接建立通信链路^[31], 这样也能建立无人机群协同任务的完成。

3) 无人机同步技术

针对无人机同步、避免通信中断、监控数据管理等设计难题, 文献[7]将 RPI 板 (Raspberry Pi, 树莓派) 与无人机集成, 设计了一个成本低、用户友好、可快速部署的应急通信网络。设计无人机同步的移动模型, 在受灾地区形成连锁网络, 为幸存者提供应急 Wi-Fi 服务。其同步方法为, 就是通过 GUI 平台共享坐标 (航路点) 列表, 以掌握无人机行动轨迹。主无人机将与前任无人机共享坐标, 等待一定的延迟, 然后开始飞往其第一个目标位置。前任无人机持续跟踪其主无人机的轨迹。在从一个坐标跳到下一个坐标的过程中, 主坐标和前一坐标之间必须同步, 以避免碰撞和由于高无人机间隙而造成的任何通信中断。

3.3 地面应急通信关键技术

本小节介绍了空天地一体化网络中地面应急通信的关键技术, 主要包括当地面基础通信设施没有完全受损时通过短微波技术衍生的微波中继通信技术、综合地理信息的地面应急传输机制以及地面应急通信的智能化关键技术。

1) 微波中继通信技术

地面微波中继通信是由短微波技术衍生出的在地震救灾中最常见的应急救援通信技术。在地震来临时, 依赖光纤通信的电缆、光缆被迅速破坏, 光纤通信的优势也随之消失。地面微波中继通信的出现可以弥补这一困境, 在艰难的环境中搭建有效可靠的应急救援通信设施。微波中继通信的中继方式主要分为两类。一类是中继设备将接收到的信号进行解调、调制和放大, 发送至下一个中继设备。另一类是中继设备仅将信号进行变频和放大, 直接输送给下一步, 而不需要调制与解调。车载基站和单兵通信是地面微波通信的主要应用。车载基站在应急通信中的应用最为广泛。通过车载应急通信的建设, 可以很好的保障后方指挥部与现场的实时通信, 高效有序的指挥调度。单兵通信配合车载应急通信设备是当前主流的灾后救援方式, 救援人员通过便携的单兵设备进行视频, 图像和声音的采集, 将数据发送给车载控制中心或基站, 可通过微波中继传送至指挥中心, 为救援行动

及时提供有效信息。也可与指挥中心取得联系,保障了救援人员的实时联络。尽管无人机和卫星准确高效的性能在应急救援中彰显了独特的优势,地面微波中继通信由于便捷、低成本、部署方便等特点在应急通信中占有一席之地。

2) 地面应急传输机制

当普通的应急传输机制无法满足应急通信的要求时,学者们将生物仿生协议及情况感知协议应用于紧急情况下数据传输机制中。文献[32]提出一种类似蜘蛛网的应急数据传输机制,该机制建立了一种结合地理信息系统和电子地图的类蜘蛛网传输模型。该应急传输机制将动态多优先级消息队列管理方法与基于位置预测的受限贪婪转发策略相结合。在针对地面应急通信时,地面车辆采用动态多优先级队列管理方法处理数据包,从而实现对于紧急数据的紧急处理。在针对提高紧急数据包转发率问题上,采用基于位置预测的受限贪婪转发算法转发数据包,保证紧急数据的交付率。这种地面应急传输机制相较于普通应急传输机制能够实现对紧急数据的高交付率转发。

3) 智能环境感知技术、智能运动控制及导航技术

智能救援装备在工作过程中主要通过传感器来获取环境信息并搜寻幸存人员。由于灾难现场一般具有复杂性和不确定性,室内结构化环境中传统的环境感知算法不能满足救援工作的需求。例如,传统的激光测距仪及声呐等仪器在充满烟雾和灰尘的环境中也很难以发挥作用。因此,需要研究传感检测识别技术和多传感信息融合技术。学者针对灾害现场浓烟、碎片和非结构化地形导致机器人很难在能见度很低的条件下工作的问题,开发了一种音频分类算法,用于识别与消防相关的声音,如遇险人员(婴儿哭声、尖叫声、咳嗽声)、结构故障(木材折断、玻璃破碎)、消防车和人群等。智能的环境感知技术是应急救援装备实现智能化的基础,面向不确定恶劣极端环境下的环境感知技术是智能救援装备未来的研究方向之一。

智能运动控制技术可以提高救援装备的运动精度和任务完成的可靠性。学者提出了一种基于视觉的喷水方向控制算法,通过摄像头辨别目标位置,并采用线性最小二乘优化的方法确定每个采样时间喷嘴的最佳俯仰角。在此基础上,采用卡尔曼滤波方法去除测量中的干扰因素,从而更好地确定当前喷嘴的方位。试验表明,机器人可实时调整喷嘴的姿态,实现更加准确的灭火,并具有纠错功能。在智能导航方面,移动装备导航的本质是在一定的约束条件下,找到一条可顺利到达终点的路径。目前该方法应用得还不多,但良好的适应性和灵活性使其在救援机器人路径规划领域拥有很大的应用前景。

3.4 空天地一体化应急通信关键技术

本小节介绍了空天地一体化应急通信组网的关键技术,由于空天地一体化应急通信组网具有结构立体多层,空间节点种类众多,网络管理复杂,业务类型繁多等特点。因此,在应急通信的场景下,对空天地一体化应急通信组网管理,连接选择,干扰管理与资源共享等技术进行分析。

1) 网络虚拟化

空天地一体化应急通信组网是一种异构网络,通信技术多样、业务类型丰富,并且普遍采用无线通信方式在这种网络中提供 QoS 支持面临如下技术难点:1) 不可预测的链路特性使得链路指标的测量很难准确获得;2) 无线自组网中的暴露终端和隐终端问题;3) 节点移动性和不稳定的链路造成的网络拓扑动态变化;4) 动态网络拓扑和变化的链路特性使得难以准确维护网络状态信息,路由时断时续路由的重建和预约维护非常复杂和困难;5) 节点能量和功率受限;6) 安全性难以保障。因此可以引入,软件定义网络(software defined network, SDN)和网络功能虚拟化(network function virtualization, NFV)技术,对网络进行管理。SDN 是一种能够将控制和转发进行分离的技术,将其应用于空天地自组网,可以实现网络资源的灵活自动配置,满足不同的应用需求。SDN 可以实现对数据流的精确控制,从而在最佳链路上无缝分发数据流,实现网络均衡负载。NFV 则由运营商联盟提出,核心思想是 IT 虚拟化,将传统的通信设备软件与通信硬件解耦,从而降低成本,

提高效率。将 SDN 和 NFV 配合可以在异构环境下对全网设备全局管理,从而更为灵活高效的资源分配,并解决传统卫星网络系统配置管理繁琐的问题。

2) 跨层及层间切换优化

低轨道卫星是天地一体化网络的重要节点。卫星移动速度高达 7km/s 以上,每个星波束服务用户的时长可能只有几十秒,这将会导致频繁的波束切换。整网用户频繁切换将会给系统带来无法承受的信令开销,对用户服务的连续性带来极大影响^[33]。与单层网络的用户切换问题相比,在空天地三层异构网络中用户的行动轨迹很难预测,尤其是当用户设备(User Equipment, UE)无法在地面网络上中继时。因此需要保证终端可以通过透明的切换连接到卫星网络或者天基网络当中。设计可靠的切换机制设计应考虑卫星通信系统、空中通信系统和地面通信系统在功率和时延方面的差异。文献[34]通过计算接收信号强度低于设定阈值的概率,提出了一种自适应切换算法。文献^[35]提出了一种高效的覆盖决策算法,旨在提供无缝连接,建立全连通的空中网络。同时,空中平台的增加,需要考虑空中网络与地面网络之间频繁的切换^[36]。

文献[37]目前,在各个协议层次上虽然都有大量的研究成果,但是迄今对于异构无线网络的 QoS 保证问题仍然没有令人满意的解决方案。这是因为在各个层次独立进行设计与优化并不是解决 QoS 问题的理想方法。在有线互联网中,各学者在各个协议层次之间设置有比较严格的界限,这是因为这种方法使得整个网络系统具有良好的模块化特征,有利于网络功能模块化,便于功能的实现及扩展。但是无线网络结构不同于有线网络,若将这样的方法用于无线网络设计中会造成各个层次独立优化而整个系统并不能得到优化的问题,此时唯有考虑跨层设计优化,利用层间协议的交互和耦合特性才能解决这样的问题,因此使用跨层设计与优化方法在异构无线网络中提供 QoS 保证有着良好的应用前景。

3) 干扰管理与资源共享

由于空天通信网络中各个节点分布广、类型多,高中低轨卫星、高空平台、无人机以及终端之间的干扰管理问题受到众多学者的广泛关注。文献^[38]针对数目众多的非静止轨道卫星的轨道特性,提出了全球场景下的非静止轨道卫星的全星座干扰分析方案,为非静止轨道星座的干扰情况提供了理论依据。通信资源管理可大致分为基于资源预留的信道资源管理策略、基于预测模型的信道资源管理策略,以及基于博弈论的信道资源管理策略^[39]。有学者利用卫星移动轨迹的可预测性,研究基于信道预测的下行动态资源优化方案。解决了波束间切换的联合资源分配问题^[40]。对部署多个高空平台站(High Attitude Platform Station, HAPS)的空天通信网络,有学者研究基于 OFDMA 的 HAPS 中多播的无线资源分配问题,找到了 HAP 功率、子信道和时隙等资源的最佳分配^[41]。

4) 边缘计算

为了解决应急突发地流量聚集,不能实时将数据传输的问题,多接入的边缘计算(Multi-access Edge Computing, MEC)得到了广泛的研究。MEC 通过使用网络边缘的资源,提供低延迟、高数据速率和灵活的计算服务。边缘计算在应急通信网络中也得到越来越多的应用^[42, 43]。通过在 LEO、UAV、USV 等设备中部署边缘服务器,开展边缘计算,提高应急通信网络的性能,主要体现在以下三个方面^[44]: 1) 降低时延: MEC 将计算能力推向应急救援网络的边缘。利用边缘节点的计算资源可以减少延迟; 2) 满足快速增长的应急计算与通信需求: 充分利用边缘计算节点的并行计算能力,可以缓解云计算中心的压力,满足快速增长的应急计算与通信需求; 3) 网络安全提升: MEC 的分布式部署降低了用户信息数据在网络中的集中度和数据暴露的机会,从而降低了隐私数据丢失或泄露的风险。空天地一体化网络的出现彰显了与传统通信网络不同的架构与模式,将 MEC 技术应用于空天地一体化网络中,更能够突出空天地一体化网络在应急通信中的优势^[45]。

4 结论与展望

近年来,空天地一体化应急通信系统受到了人们的广泛关注,本文描述了该系统架构特点,对国内外在空天地一体化应急通信方面的所做的研究进行了概括,并对其中涉及的关键技术进行了分析对比,对未来建立完备的新一代应急通信系统具有重要意义。综上所述,未来空天地一体化应急救援通信系统应满足如下组网需求:

1) 全面的信息服务支持。新一代应急通信系统应为指挥调度提供实时通信保障和航天遥感信息支援服务;为现场救援人员提供准实时的话音、灾害现场视频、图像传输、业务数据、定位信息;为灾区群众提供话音、数据、视频等多媒体通信服务^[46];支持前线应急指挥中心远程查询危化品信息、车辆信息、人员信息、预案、物资的定位及流动跟踪,实现应急管理下的实时态势感知^[46]。

2) 可靠的救灾能力。通信系统的可通率、可靠性即使在地形复杂、气象复杂、电磁环境复杂的环境中仍然要保持较高水准,尽可能地提高数据传输效率,而且系统应具备自动化的通信能力,以及最低限度的保底通信能力。此外,通信设施应操作简便,能够做到开机就通,以减轻抢险救灾人员的作业以及日常使用维护的负担^[2]。

3) 快速的机动能力。应急通信要求预先设置的网络部署和常态化的网络运营,从而免除耗时过久、程序复杂的网络准备工作,以提高通信网络的应急效率。此外,应急指挥中心应能够根据现场应急通信触发的业务量,快速响应并实时调整应急通信网络保障资源^[2]。当系统出现故障而无法使用时,仍能借助于基站自组网技术,快速建立基站之间的自组网络,实现多基站的互联互通,增强专网通信的生存能力和抗毁性^[46]。

4) 科学的应急决策能力。无人机云平台与 AI、云计算、边缘计算等技术相结合进行数据采集分析,辅以救援指挥决策专家系统,为应急指挥提供更准确的决策依据,提高应急救援作业的有效性^[47]。

参考文献:

- [1] 王纪强, 吴晨, 宋文杰, 等. 地震救援现场应急通信体系研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(S1): 214-219.
- [2] 周雄伟. 新一代应急通信系统发展展望[J]. 通信技术, 2022, 55(01): 1-6.
- [3] 张磊, 范玉峰. 新时期我国应急通信体系建设分析[J]. 中国公共安全(学术版), 2019(02): 48-51.
- [4] 周洋. 应急通信技术现状及趋势[J]. 电子世界, 2021(06): 87-89.
- [5] 孟晖, 宋俊海. 卫星通信在应急通信中的应用及发展[J]. 科技导报, 2018, 36(06): 40-46.
- [6] Ganesh S, Gopalasamy V, Shibu N B S. Architecture for Drone Assisted Emergency Ad-hoc Network for Disaster Rescue Operations[C]// 2021 International Conference on COMMunication Systems & NETworkS (COMSNETS). Bangalore, India: IEEE Press, 2021: 44-49.
- [7] Panda K G, Das S, Sen D, et al. Design and Deployment of UAV-Aided Post-Disaster Emergency Network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 102985-102999.
- [8] Bae J, Sohn K Y, Lee H, et al. Structure of UAV-based Emergency Mobile Communication Infrastructure[C]// 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Jeju Island, Korea: IEEE Press, 2021: 634-636.
- [9] Molla D M, Badis H, Desta A A, et al. SDR-Based Reliable and Resilient Wireless Network for Disaster Rescue Operations[C]// 2019 International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM). Paris, France: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [10] Rahouti M, Xiong K, Chin T, et al. SDN-ERS: A Timely Software Defined Networking Framework

for Emergency Response Systems[C]// 2018 IEEE International Science of Smart City Operations and Platforms Engineering in Partnership with Global City Teams Challenge (SCOPE-GCTC). Porto, Portugal: IEEE Press, 2018: 18-23.

- [11] 丁海煜, 崔航, 程锦霞, 等. “空天地”融合技术为应急通信提供有力保障[J]. 通信世界, 2021(16): 12-14.
- [12] Wang B, Sun Y, Sun Z, et al. UAV-Assisted Emergency Communications in Social IoT: A Dynamic Hypergraph Coloring Approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(8): 7663-7677.
- [13] Liu Y, Ji F, Sun Y. The Construction of Public Security Emergency Communication Architecture Based on Satellite Communication[C]// 2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). Qufu, China: IEEE Press, 2021: 1-3.
- [14] Xu W H, Zhang Z, Wang W, et al. Design and application of emergency rescue command communication platform[C]// 2021 International Conference on Networking, Communications and Information Technology (NetCIT). Manchester, United Kingdom: IEEE Press, 2021: 27-31.
- [15] Zheng J, Shan C, Li Q, et al. Design of Emergency Rescue Command Platform Based on Satellite Mobile Communication System[C]// 2021 IEEE 4th International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE). Xi'an, China: IEEE Press, 2021: 118-122.
- [16] 郎为民, 裴云祥, 王振义, 等. 系留无人机应急通信系统研究[J]. 电信快报, 2021(09): 1-6.
- [17] 钟剑峰, 王红军. 基于 5G 和无人机智能组网的应急通信技术[J]. 电讯技术, 2020, 60(11): 1290-1296.
- [18] Sanctis M D, Cianca E, Rossi T, et al. Waveform design solutions for EHF broadband satellite communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 18-23.
- [19] Shi Y, Liu P, Yan D, et al. A Hopfield Neural Network Based Demodulator For APSK Signals[C]// 2020 IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). Chongqing, China: IEEE Press, 2020: 2005-2009.
- [20] Hosoya G. Analysis of Delayed Bit-Interleaved Coded Modulation for APSK[C]// 2021 20th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT). Tottori, Japan: IEEE Press, 2021: 193-198.
- [21] Poor S Z, Forouzan A R, Parvaresh F. A New Probabilistic Constellation Shaping Scheme for APSK Modulation[C]// 2021 Iran Workshop on Communication and Information Theory (IWCIT). Tehran, Iran: IEEE Press, 2021: 1-4.
- [22] Wang B, Chen P, Fang Y, et al. The Design of Vertical RS-CRC and LDPC Code for Ship-Based Satellite Communications On-the-Move[J]. IEEE Access, 2019, 7: 44977-44986.
- [23] Wang H, Kim S. Design of Polar Codes for Run-Length Limited Codes in Visible Light Communications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(1): 27-30.
- [24] Trofimiuk G, Iakuba N, Rets S, et al. Fast Block Sequential Decoding of Polar Codes[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 10988-10999.
- [25] Fayyaz U U. Symbol Mapping Design for Bit-Interleaved Polar-Coded Modulation With Iterative Decoding[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(1): 32-35.
- [26] 王艳君, 汪春霆, 张文方. 应急通信第一反应器——卫星移动通信[J]. 卫星应用, 2014(10): 50-54.
- [27] Yunbo L, Sheng L, Lei W, et al. Satellite communication application in emergency communication[C]// 2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS). Beijing, China: IEEE Press, 2014: 1-4.
- [28] 徐知辉. 探讨卫星通信在应急通信中的应用及发展[J]. 中国新通信, 2019, 21(17): 2-3.
- [29] 徐星光, 王晓峰, 姚璐, 等. 固定翼无人机编队构型与通信拓扑优化[J]. 系统工程与电子技术: 1-16.

- [30] 李威, 李跃军. 利用无人机搭建高空基站的研究[J]. 通讯世界, 2017(09): 12-13.
- [31] 徐哲. 无人机集群任务规划及控制仿真[D]. 南京航空航天大学, 2019.
- [32] Qiu T, Wang X, Chen C, et al. TMED: A Spider-Web-Like Transmission Mechanism for Emergency Data in Vehicular Ad Hoc Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 8682-8694.
- [33] 田开波, 杨振, 张楠. 空天地一体化网络技术展望[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(05): 2-6.
- [34] Sadek M, Aïssa S. Handoff algorithm for mobile satellite systems with ancillary terrestrial component[C]// 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Ottawa, Canada: IEEE Press, 2012: 2763-2767.
- [35] Park K N, Cho B M, Park K J, et al. Optimal coverage control for net-drone handover[C]// 2015 Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks. Sapporo, Japan: IEEE Press, 2015: 97-99.
- [36] Zhou J, Su Y, Li P. An Emergency Mobile Communication System Based on Fixed-Wing Drone and Satellite Transmission Access[C]// 2019 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Cloud and Big Data Computing, Intl Conf on Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCom/CyberSciTech). Fukuoka, Japan: IEEE Press, 2019: 465-470.
- [37] 王海涛, 陈晖. 一体化应急通信网络体系框架构想[J]. 航空电子技术, 2012, 43(03): 1-5.
- [38] 靳瑾, 李娅强, 张晨, 等. 全球动态场景下非静止轨道通信星座干扰发生概率和系统可用性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(09): 833-840.
- [39] 李伊陶. 基于 LEO-MSS 的多层扩展网络场景下的资源分配和切换优化[D]. 中国科学技术大学, 2020.
- [40] Grace D, Chen G, White G P, et al. Improving the system capacity of mm-wave broadband services using multiple high altitude platforms[C]// IEEE Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM). San Francisco, USA: IEEE Press, 2003: 169-173.
- [41] Ibrahim A, Alfa A S. Using Lagrangian Relaxation for Radio Resource Allocation in High Altitude Platforms[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(10): 5823-5835.
- [42] Xiao P, Wang L, Chuan J, et al. Implementation for UAVs Aided Edge Sensing System in Wireless Emergency Communications[C]// 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Xi'an, China: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [43] 张科, 叶影, 张红. 基于边缘计算的森林火警监测系统[J]. 大数据, 2019, 5(02): 79-88.
- [44] Pang Y, Wang D, Wang D, et al. A Space-Air-Ground Integrated Network Assisted Maritime Communication Network Based on Mobile Edge Computing[C]// 2020 IEEE World Congress on Services (SERVICES). Beijing, China: IEEE Press, 2020: 269-274.
- [45] 唐清清, 李斌. 面向空天地一体化网络的移动边缘计算技术[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(01): 27-35.
- [46] 刘荣朵. 我国应急通信发展的需求分析[J]. 信息通信技术与政策, 2019(12): 63-66.
- [47] 周剑, 贾金岩, 张震, 等. 面向应急保障的 5G 网联无人机关键技术[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2020, 32(04): 511-518.