

doi: 10.3969/j.issn.1001-893X.2020.11.005

引用格式: 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. [ZHONG Jianfeng ,WANG Hongjun. Emergency communication technology based on 5G and drone intelligent networking[J]. Telecommunication Engineering 2020 60(11):1290-1296.]

基于 5G 和无人机智能组网的应急通信技术*

钟剑峰,王红军**

(国防科技大学 电子对抗学院,合肥 230037)

摘 要: 针对现有应急通信系统面临的低速率、高时延、带宽不足和互联互通性差等问题,提出了一种基于 5G 和无人机智能组网的应急通信系统技术路线,并对其部分关键技术进行了剖析,以期提升救援力量在受灾地域的应急通信保障能力提供重要支撑。通过理论分析可知,该技术路线能够实现目标区域内无人机编队的智能组网和部署、5G 信号的覆盖和 5G 通信的联通,拓展 5G 网络的覆盖范围,可在通信基础设施损毁的环境下实现用户终端之间以及用户终端与应急指挥中心之间的互联互通,具有一定的应用前景。

关键词: 应急通信; 5G; 无人机智能组网; 自适应路由

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号: TN915.9 文献标志码: A 文章编号: 1001-893X(2020)11-1290-07

Emergency Communication Technology Based on 5G and Drone Intelligent Networking

ZHONG Jianfeng ,WANG Hongjun

(College of Electronic Countermeasure ,National University of Defense Technology ,Hefei 230037 ,China)

Abstract: For the problems of low speed ,high delay ,insufficient bandwidth and poor interoperability of the existing emergency communication systems ,this paper proposes an emergency communication system technical route based on 5G and drone intelligent networking ,and analyzes the key technologies in order to provide important support for improving the emergency communication support capability of rescue forces in disaster areas. According to theoretical analysis ,the technical route can achieve the intelligent networking of drone formation ,the coverage of 5G signals and the communication of 5G network in the target area ,expand the coverage of 5G networks and realize the interconnection and interoperability among user terminals and the emergency command center in the damaged environment of communication infrastructure. It has certain application prospects.

Key words: emergency communication; 5G; drone intelligent networking; adaptive routing

0 引 言

近年来,在自然灾害如地震、海啸、洪水等的救援善后工作中,应急通信的需求增长迅速。由于受

灾地域通常面临着通信基础设施损毁或缺乏的情况,这给灾后救援、重建等工作造成了极大的障碍。因此,应急通信系统对于灾后各项工作至关重要。

* 收稿日期: 2019-12-19; 修回日期: 2020-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61971473)

** 通信作者: hongjun-wang@163.com

只有构建完善的应急通信体系,提高各级政府应对突发公共事件的能力,才能在紧急关头保持受灾人员、救援力量的通信,减少人民生命财产的损失^[1]。

我国现有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的问题,导致救援力量在受灾地域的感知、通信和调度成为一个短板弱项^[2]。文献[3]提出了一种基于分时期演进(Time division long term evolution, TD-LTE)技术体制的自组网系统,实现岸基侧指挥中心与海上舰艇、舰艇与舰艇之间的互联互通功能,提供实时数据、电话、视频等 IP 业务传输,但该设计主要针对的是海上应急通信。文献[4]提出了一种基于多旋翼无人机和 4G 的中继通信方案,其采用的 4G 转发模块由于速率、带宽不足且中继平台之间没有进行组网,无法满足广覆盖、宽连接、低时延要求。文献[5]讨论了基于卫星通信和地面站的应急通信方案,文献[6]提出了被称为“轮子上的蜂窝”的临时蜂窝网络系统。由于文献[5-6]系统均需将相关设施运送至灾区,它们的最大弊端是当灾区地面交通网络被破坏时应急通信系统就无法组建。

鉴于 5G 通信网络的高速率、高可靠、低时延和低功耗等特性以及无人机集群技术飞速发展^[7],将无人机智能组网技术和 5G 通信技术相融合,实现无人机快速空地通信以解决现有应急通信系统的问题成为可能。与 2G/3G/4G 移动通信技术相比,5G 通信技术在传输速率和稳定性方面有质的飞跃,可

以满足应急通信需求;其次,无人机因其快速、灵活、成本低、适用多种救援环境等特性,已广泛应用于地震救灾、海上救援和临时热点区域增强覆盖等应急通信领域^[8]。无人机自组网是将无人机作为网络节点,动态地组成的具有临时性的多跳网络。通过无线中继等技术实现无人机间的互联互通,无人机自组网还具备高效快速组网的优势,能够较好地满足应急通信系统快速开设需求。

目前 5G 基站在城市街区的有效覆盖半径只有数百米,由于旋翼无人机载重有限,通过单架次无人机加大天线发射功率来拓展 5G 基站覆盖半径并不可取,比较可行的做法是采用无人机分布式组网方式实现 5G 信号覆盖。

综上所述,针对现有应急通信系统所存在的问题和面临的挑战,研究出一种基于 5G 和无人机智能组网的应急通信系统技术路线,通过无人机搭载载荷升空组网,建立基于无人机的 5G 空中通信网,实现海上救援、地震救灾等场景下的应急通信,可为提升救援力量在受灾地域的应急通信保障能力提供支持。

1 基于 5G 和无人机智能组网的应急通信系统技术路线

1.1 总体设计

基于 5G 和无人机智能组网的应急通信系统总体设计如图 1 所示。

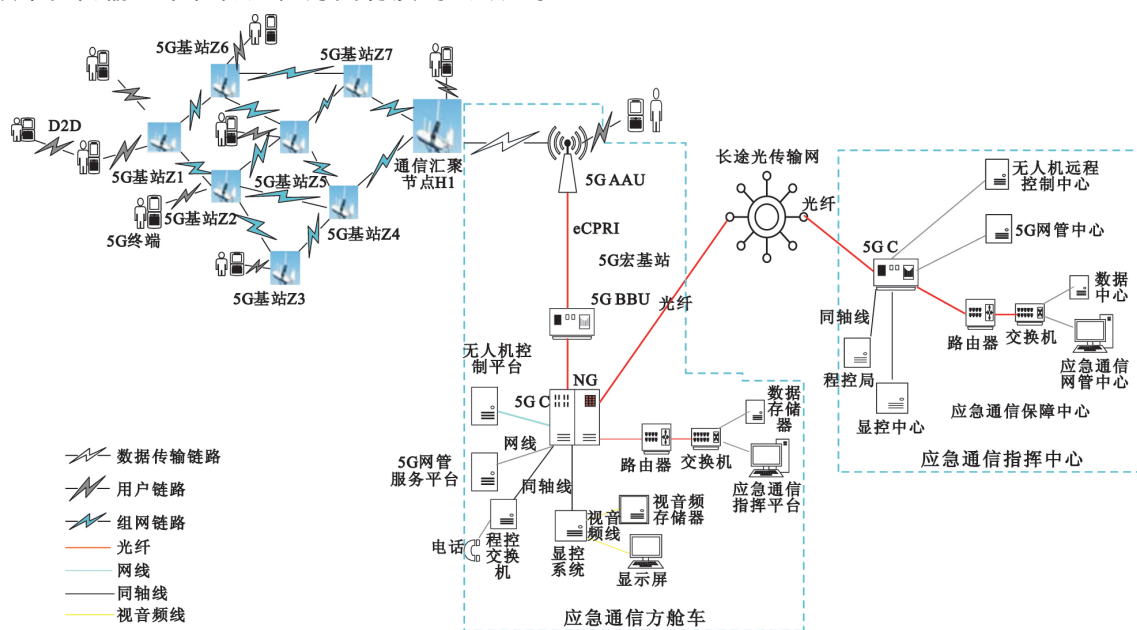


图 1 基于 5G 和无人机智能组网的应急通信系统

基于 5G 和无人机智能组网的应急通信系统由

基于无人机的 5G 空中通信网、地面应急通信方舱

车和应急通信指挥中心三部分组成。

基于无人机的 5G 空中通信网通过无人机搭载任务载荷来实现,负责 5G 组网通信。无人机载荷(UAV Load ,UAV-L)由 5G 通信模块、组网模块和能量管理模块组成。其中通信模块采用全双工双向中继技术(Full-duplex Two-way Relay Technology ,FTRT)^[9]和定向天线覆盖技术(Directional Antenna Coverage Technology ,DACT)^[10],负责 5G 信号的基础覆盖;无人机组网模块集成了组网和飞控功能,采用全向天线技术(Omnidirectional Antenna Technology ,OAT)^[11]建立无人机之间组网链路以及智能组网,此外,组网模块还负责无人机的智能部署和飞行控制;能量管理模块负责供电。

地面应急通信方舱车配置有 5G 宏基站、5G 核心网设备和相关席位,其中车载 5G 宏基站回程信号通过光纤接入应急通信方舱车 5G 核心网设备;5G 核心网设备由光缆引接席通过光缆接入最近的未阻断公网固定通信台站,进而实现与应急指挥中心的联通;5G 网管服务平台采用浏览器/服务器模式架构(Browser/Server ,B/S)进行访问,基于用户名和密码登录,负责受灾地域救援的 5G 应急通信服务和调度;通信保障席负责视音频、数据和电话通信业务保障;无人机控制平台通过控制链路实现无人机编队控制。

应急通信指挥中心由无人机控制中心、5G 网管中心和通信保障中心构成,其中无人机控制中心负责管理无人机集群控制平台和对无人机实施远程控制,无人机控制服务器配置在应急指挥中心;5G 网管软件系统安装在 5G 网管服务器,配置在应急指挥中心,负责管理和调度整个 5G 应急通信网络;通信保障中心负责应急指挥中心的通信保障。

1.2 无人机任务载荷设计

基于无人机的 5G 空中通信网的核心是无人机任务载荷,设计的无人机任务载荷架构如图 2 所示。

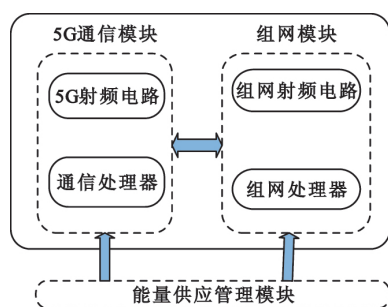


图 2 无人机任务载荷体系架构

各个功能模块的主要功能分别设计如下:

(1) 5G 通信模块

主要由 5G 射频电路和通信处理器组成,选择临近地面应急通信方舱车装配基站的无人机搭载的 5G 通信模块设置为通信汇聚节点。其中 5G 射频电路直接与天线相连,主要实现 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;通信模块工作主频率为 3.5 GHz,采用全双工双向中继技术和定向天线技术,采用直接放大转发中继策略,天线扇面角度为 120°,负责 5G 信号的基础覆盖,用户通过 5G 无线网络接入 5G 通信模块。

具体设计工作流程:一方面,同一个子区内相邻各终端用户在可直接通信时则执行端到端(Device to Device ,D2D)信息交互;同一个子区内无法直接通信的用户之间信息交互时,通过同一个 5G 通信模块进行通信;不同子区的用户之间信息交互时,源节点 5G 通信模块接收到用户信号后,通过通信处理器转换为基带信号后送到组网模块,由组网模块根据目标用户的身份信息在网络间传输到用户终端所接续的 5G 通信模块,由 5G 通信模块将组网模块送来的信息按照协议进行重组,然后下发给用户终端。另一方面,当用户终端与应急通信指挥中心进行信息交互时,5G 通信模块接收到用户信号后,通过通信处理器转换为基带信号后送到组网模块,由组网模块依据协议进行处理,再将该信息流在网络间进行传输,最后交互到通信汇聚节点,由通信汇聚节点与地面应急通信方舱车里装配的基站进行信息交互,最后由基站将信息通过核心网传输到应急通信指挥中心;反之,当应急通信指挥中心与用户终端进行信息交互时,首先由地面应急通信方舱车里装配的基站将信息发送到无人机搭载的通信汇聚节点,通信汇聚节点将处理后的基带信息送到组网模块,由组网模块根据目标用户的身份信息在网络间传输到用户终端所接续的 5G 通信模块,由 5G 通信模块将组网模块送来的信息按照协议进行重组,然后下发给用户终端。

(2) 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。组网模块一方面负责将 5G 通信模块需要在网间中继的信息进行协议转换,然后再在组网模块之间完成信息交互,最后由无人机搭载的通信汇聚节点无缝地与地面应急通信方舱车所配置的基站互联互通,实现用户终端

与应急通信系统之间的链接; 另一方面, 组网模块还负责将飞控系统需要在网间传输的飞控指令信息进行协议转换, 然后再通过组网模块建立空地控制链路, 实现无人机与无人机地面控制平台(中心)的连通, 即飞控指令信息按照改进的微型空中飞行器链路(Micro Air Vehicle Link, MAVLink)^[12]通信协议数据格式重新打包后交互到组网模块, 通过组网链路建立空地控制链路, 采用预编程和人工控制相结合的方式对无人机进行智能部署和控制。

组网模块工作主频率为 5.8 GHz, 采用全向天线技术、基于簇结构和强化学习的自适应路由协议(Adaptive Routing Protocol Based on Cluster Structure and Reinforcement Learning, ARPBCSARL)和改进的 MAVLink 协议, 负责基于无人机的 5G 应急通信节点组网和无人机的飞行控制。

(3) 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, 在系统能源不足时发出报警提示和充电请求; 此外, 该模块还具有休眠唤醒功能, 能够通过休眠唤醒降低功耗, 延长电池工作时间。通常, 通信模块功率不超过 3 W, 组网模块功率不超过 2 W, 因此无人机载荷总功率不超过 5 W, 机载电池供电系统可以满足无人机载荷模块工作 6 h 以上^[13]。此外, 自供电旋翼无人机最长飞行时间超过了 6 h, 因此设计要求充满电的微型电池在 -20℃ ~ 85℃ 环境温度下满足无人机载荷系统正常工作时间不低于 6 h。

1.3 无人机组网数量预估

自由空间传播一般指地面上空的大气层是各向同性的均匀媒质, 其相对介电常数和相对导磁率均为 1, 传播路径上没有障碍物阻挡, 到达接收天线的反射信号场强可以忽略不计。在自由空间传播模型中, 无线电波的损耗只与传播距离和电波频率有关。当给定信号的频率、发送端天线的总功率(即发射功率加发射天线增益, 然后减去接头和电缆损耗)和接收端天线总功率(即接收灵敏度加接收天线增益, 然后减去接头和电缆损耗)即可估算出天线的有效通信距离, 计算公式为

$$L = 92.44 + 20 \lg d + 20 \lg f,$$

$$L = P_t - P_r。$$

式中: L 为自由空间损耗(单位 dB), d 为有效通信距离(单位 km), f 为工作频率(单位 GHz), P_t 为发送端天线的总功率(单位 dBm), P_r 为接收端天线的总功率(单位 dBm)。则自由空间传播模型下, 通信模

块工作主频率为 3.5 GHz, 通信天线发射总功率为 27 dBm, 地面(水面)终端接收天线总功率为 -97 dBm, 其有效通信距离为 10 889 m; 组网模块采用全向天线, 工作主频率为 5.8 GHz, 组网天线发射总功率为 24 dBm, 接收天线总功率为 -97 dBm, 则组网天线的有效通信距离为 3 723 m。

假设在 $M \text{ km} \times M \text{ km}$ 的受灾地域, 通信模块采用定向天线, 天线的扇面角度为 120° , 无人机 5G 信号覆盖半径主要取决于无人机升空高度, 几何模型如图 3 所示。

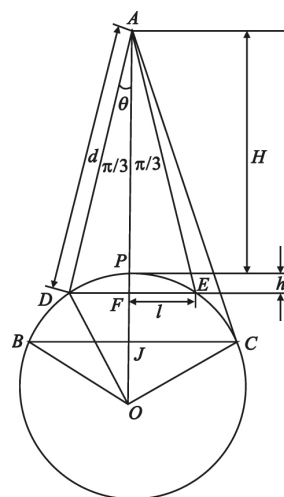


图 3 无人机 5G 信号覆盖几何模型

考虑地形环境影响, 为提升无人机覆盖半径, 无人机飞行高度设定为 1 000 m, 由于远小于地球半径 R (约 6371 km), 因此, 圆弧 BPC 近似为直线 BC 长度, 球冠 DPE 的面积也可近似为以 P 为中心、半径为 l 的平面圆面积, 则可近似求出无人机 5G 通信模块覆盖半径为 1 732 m。把 $M \text{ km} \times M \text{ km}$ 分成一个个正六边的小子区, 每个小子区部署一架无人机由其搭载的 5G 通信模块进行覆盖, 生成如图 4 所示的蜂窝网结构。

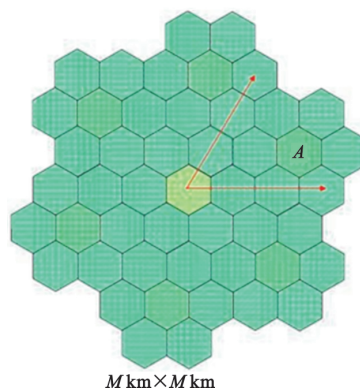


图 4 基于无人机的 5G 蜂窝网结构

因此, $M \text{ km} \times M \text{ km}$ 区域至少需要 $1 + \frac{2M^2}{9\sqrt{3}}$ (加通信汇聚节点) 无人机才能实现 5G 通信信号的全覆盖。

为了增强 5G 信号覆盖的有效性, 5G 通信模块采用的是定向天线, 按上述设计参数, 在 $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$ 的应用场景下, 需要 30 架无人机完成 5G 信号的全域覆盖。如果遇到大范围的自然灾害, 可增大无人机的天线扇面角度和增加无人机飞行高度来减小无人机群数量, 譬如假设受灾面积为 $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$, 5G 通信模块此时需采用全向天线覆盖技术, 部署在距地面 200 m 高度, 同时组网模块发射总功率设定为 30 dB, 经估算此时通信模块通信距离为 10 889 m, 组网模块通信距离为 9 645 m, 需要 31 架无人机完成 5G 信号的全域覆盖。

2 基于 5G 和无人机智能组网的应急通信系统关键技术分析

基于 5G 和无人机智能组网的应急通信系统关键技术主要有 5G 通信应用技术、全双工双向中继技术、定向天线覆盖技术、无人机智能部署和控制技术、无人机分布式智能组网技术、边缘计算和云计算技术等。下面重点对其中的部分关键技术进行分析。

2.1 5G 通信应用技术

通过无人机搭载 5G 通信基站升空组网, 采用高低频协作组网^[14]方式构建基于无人机的 5G 应急通信网, 实现 5G 信号基础覆盖和避免频率干扰问题; 通信链路采用 3.5G 频率进行 5G 信号覆盖, 组网链路通过 5.8G 频率进行组网, 通信汇聚无人机与地面 5G 宏基站采用波束赋形技术^[15], 提升频谱效率。无人机作为 5G 通信节点形成的空中 5G 应急通信网具有一定的抗毁性和自愈合功能, 可以实现全网节点信息共享, 将大大提升应急救援通信系统效能。

5G 通信模块硬件拟对 5G 直放站进行改进。根据基于 5G 和无人机的应急通信系统基本需求, 拟改进的华为 5G 直放站的主要功能技术指标如下: 工作主频率 3.5 GHz; 频道带宽可预设; 最小通信速率不低于 20 Mb/s; 用户接入数量大于 20; 模块尺寸不大于 $100 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$; 电源为直流 5 ~ 12 V; 功耗为 1 A 输入; 天线发射总功率为 500 mW; 总功率不超过 3 W; 质量小于 200 g。

• 1294 •

2.2 无人机智能部署和控制技术

随着无人机集群协同完成任务的需求不断增加, 无人机编队飞行技术成为无人机智能控制研究领域的新方向^[16]。无人机编队飞行是指为完成任务, 多架无人机按照队形排列或者进行任务分配的任务执行模式。在无人机编队飞行中, 首先必须解决飞行过程中的数据融合、编队控制等问题^[17]。为解决上述问题, 需从以下方面入手:

2.2.1 基于改进的 MAVLink 协议数据融合技术

MAVLink 协议是比较主流的无人机通信协议, 因此, 数据融合时考虑将多架无人机的飞行控制指令按照改进的 MAVLink 协议数据格式重新打包后, 通过空地控制链路在飞机与地面控制站之间传输。

2.2.2 无人机编队控制技术

无人机编队方案包括编队部署和编队控制两部分。编队部署是指获得目标任务区域范围后, 根据无人机通信距离、任务要求等约束条件对无人机编队进行区域部署。编队控制是指无人机编队执行任务过程中涉及到的起落、队形保持、防撞避障和路径规划等问题。

(1) 编队部署技术

编队部署即通过相关群智能部署算法^[18]得到无人机的路径规划。路径规划问题^[19]涉及的方面很多, 主要包括环境信息的获取、模型的建立、规划算法的选取和航迹控制跟踪。

(2) 编队控制技术

编队控制^[20]是基于无人机的 5G 空中通信网的关键技术, 通过在避免碰撞的前提下使多个无人机按一定的编队结构移动来完成规定的 5G 组网通信任务。编队控制存在三个重要问题: 编队保持与重组、任务更新和编队可靠性。

吴炜玉等人^[21]提出的基于虚拟力 (Virtual Force, VF) 的部署算法需要感知六种虚拟力, 其算法适应于感知设备齐全且没有无人机地面控制中心的场景。在自然灾害等通信基础设施损毁场景下, 针对感知设备不齐全、无人机地面控制中心存在的实际情况, 拟采用基于群智能航迹规划算法使无人机生成最优路径后, 通过预编程和地面人工控制相结合的方式使无人机按飞行路线部署生成基于无人机的 5G 空中通信网网络拓扑; 同时改进 MAVLink 协议, 飞行控制指令按照改进的 MAVLink 协议数据格式重新打包后, 通过空地控制链路在无人机与地面方舱车之间可靠传输, 使地面无人集群控制平台

EasySwarm^[22]对无人机编队进行实时控制,实现无人机编队的智能部署和控制。

2.3 无人机自组网网络动态分簇和自适应路由技术

由于基于无人机的 5G 空中通信网网络拓扑结构动态变化,无人机地面控制站采用群智能节点部署算法预设无人机编队的飞行轨迹,在生成的所有粒子路径轨迹中,寻求一条能够实现 5G 信号覆盖、且距离最短的路线,即为无人机的最佳飞行路线。在此基础上,针对现有无人机自组网分簇算法没有充分考虑无人机编队网络拓扑结构动态变化对组网性能的影响,且无人机大多采用自由运动模型不符合应急通信场景下无人机飞行的实际情况,提出一种改进的加权分簇算法(Improved Weighted Clustering Algorithm, IWCA),将邻居节点稳定性、节点度、剩余能量和丢包率四种因素作为簇首选择的依据,实现网络动态分簇。

在高效分簇的基础上,针对现有的无人机自组网路由协议不完全适用于基于无人机的 5G 空中通信网高动态、对可靠性和通信时延要求高的问题,提出一种基于簇结构和强化学习的自适应路由协议 ARPBCSARL,其簇内采用基于簇结构的先应式路由协议,簇间采用基于位置和链路质量 Q 学习^[23]的自适应路由协议,簇间路由协议通过引入基于位置信息和链路质量 Q 学习的转发策略转发给距离目的节点最近、链路质量最好的下一跳节点,一方面可以避免路由控制包的反向传输,降低路由控制开销;另一方面有利于发现最短和链路质量最好的路径,缩短端到端时延。

3 可行性分析

目前,对各类应急通信系统的评估尚未建立一套完整、实用、科学、准确的效能评估机制,比较普遍的应急通信系统性能评价指标主要是系统通信能力、系统反应能力、系统抗毁能力和系统可用性四个方面^[24],其中系统通信能力主要包括网络覆盖能力、系统传输能力、网络交换能力和网络管理能力;系统反应能力主要包括网络互操作能力、网络快速开设能力、空中通能力和车辆机动能力;系统抗毁能力主要包括网络重组能力、路由迂回能力、抗干扰能力和电磁兼容能力;系统可用性主要包括系统可靠性、可维修性、网络安全保密性和网络协调性。

本文将 5G 通信技术和无人机集群技术相结合,提出一种基于 5G 和无人机智能组网的应急通

信系统技术路线,通过对部分关键技术进行分析可知其在理论上是可行的。首先,将无人机作为地面用户的升空基站和采用全双工双向中继、定向天线、波束赋形等技术,不仅能扩大无线网络的覆盖面积,更能提升网络的传输性能;其次,通过群智能算法获得无人机最佳飞行路线将能提升网络开设速度;然后,通过对网络进行高效分簇和采用强化学习的自适应路由协议,将能有效提升网络重组能力和路由迂回能力;接着,采用高低频协作方式组网和动态分簇算法将能有效避免频率干扰问题和提升网络稳定性;最后,通过无人集群控制平台和 5G 网管中心将能提升系统的可靠性和网络协调性。

因此,利用无人机搭载 5G 通信基站升空组网,将能使救援力量在通信基础设施损毁的环境下实现 5G 级别的应急通信,能够极大程度地提升其应急通信保障能力。与现有的基于 4G 和无人机的应急通信系统相比,基于 5G 和无人机智能组网的应急通信系统能实现的 5G 级别通信有着明显优势^[25]。

随着 5G 通信技术的发展完善,“万物互联”将逐渐成为现实。同时 5G 将与人工智能技术相融合,加速应急通信系统的智能化建设,大幅增强救援力量的应急通信保障能力,形成智能化的应急通信新体系,大幅提升救援效率。

4 结束语

针对现有应急通信系统存在速率低、高时延、带宽不足,互联互通性差的问题,本文提出了一个基于 5G 通信技术和无人机智能组网的应急通信系统技术路线,通过无人机搭载 5G 通信基站升空组网,利用改进的链路层协议和人工智能技术进行无人机编队的智能部署和控制,特别提出一种基于簇结构和强化学习的自适应路由协议,以实现基于无人机的 5G 应急通信网的智能组网,为提升救援力量在通信设施损毁的应急通信保障能力提供支撑。鉴于论文研究目标为设计一条可行性的技术路线,目前主要从理论角度进行了相关分析,后续还将对所设计的系统展开大量的实测工作。

参考文献:

- [1] 张鹏,陈金鹰,黄岩.突发自然灾害与应急通信[C]//四川省通信学会学术年会论文集.成都:四川省通信学会,2008:322-344.
- [2] 宋露露.应急通信发展现状和技术手段分析[J].信息通信,2018(9):224-225.

- [3] 李燕,方勇,徐珩. 海上机动通信中的电磁兼容与远距离传输设计[J]. 信息通信 2018(2):65-67.
- [4] 王艳,鱼亚伟,郝晶. 基于多旋翼无人机和4G的中继通信研究[J]. 通信设计与应用 2017(10):21-22.
- [5] MOROSI S, JAYOUSI S, DEL RE E. Cooperative strategies of integrated satellite/terrestrial systems for emergencies[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Personal Satellite Services. Heidelberg: Springer 2010:409-424.
- [6] DEATON J. High altitude platforms for disaster recovery: capabilities strategies, and techniques for emergency telecommunications[J]. EURASIP Journal on Wireless Communication and Network 2008:1-8.
- [7] 陈实秋. 5G 移动通信发展趋势及关键技术探究[J]. 数字通信世界 2019(3):43.
- [8] 彭高召. 基于无人机的应急通信网研究[D]. 杭州:浙江大学 2019.
- [9] 钟智坚,崔海霞. 全双工中继协作通信的关键技术研究综述[J]. 通信技术 2017(10):2137-2143.
- [10] 欧阳峰,刘强,郝琦,等. 基于定向天线的移动自组网技术研究综述[J]. 电视技术 2017(4/5):148-153.
- [11] 张红梅. 基于 MIMO 技术的宽带全向双极化吸顶天线的研究与设计[D]. 南昌:华东交通大学 2016.
- [12] 费浩彬,鞠训光,张微微,等. 基于 MAVLink 实现无人机一键起飞[J]. 计算机科学与应用 2019,9(6):1037-1044.
- [13] 氢燃料电池的无人机续航达 12 小时[EB/OL]. [2019-12-01]. <https://www.81uav.cn/uav-news/201905/03/55780.html>.
- [14] 赵军辉,杨丽华,张子扬. 5G 高低频无线协作组网及关键技术[J]. 中兴通讯技术 2018(3):2-9.
- [15] 贺子健. 5G 移动通信系统增强移动宽带和空地通信性能仿真研究[D]. 北京:北京邮电大学 2018.
- [16] 王品,姚佩阳. 存在时延的分布式无人机编队控制方法[J]. 计算机测量与控制 2016,24(9):1811-183.
- [17] 杨红生,黄华园. 通用无人机测控系统与关键技术[J]. 电讯技术 2018,58(4):391-396.
- [18] 杜映峰,陈万米,范彬彬. 群智能算法在路径规划中的研究及应用[J]. 电子测量技术 2016,39(11):65-70.
- [19] 程晓明,曹东,李春涛. 多无人机协同航迹规划技术研究[J]. 航空计算技术 2014(4):71-7.
- [20] 李旭. 面向应急通信的中继网络部署问题研究[D]. 合肥:中国科学技术大学 2015.
- [21] 吴炜钰,赵海涛,王海军,等. 无人机骨干网分布式组网及接入选择算法[J]. 计算机学报 2019(2):351-367.
- [22] 若联科技开源无人机集群控制平台 EasySwarm 发布[EB/OL]. [2019-12-01]. <https://www.81uav.cn/uav-news/201812/27/49656.html>.
- [23] JUNG W S, YIM J, KO Y B. QGeo: Q-Learning based geographic ad-hoc routing protocol for unmanned robotic networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(10):2258-2261.
- [24] 洪旭,柳虔林,丁洪伟,等. 应急机动指挥通信能力评估分析[J]. 无线电通信技术 2015,41(4):20-23.
- [25] 卞颖颖. 5G 通信技术促进军用无人机发展[J]. 军事文摘 2019(4):20-23.

作者简介:



钟剑峰 男,1992 年生于江西赣州,硕士研究生,主要研究方向为现代军事通信系统。

王红军 男,1968 年生于江苏镇江,博士,教授、硕士生导师,主要研究方向为无线通信网。