

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.220726002

电力应急通信非合作博弈资源分配方法*

吴 庆, 胡 明, 孟子健, 方 爽, 王志刚, 赵训威, 刘 迪

(国网信息通信产业集团有限公司, 北京 102211)

摘 要:电力应急通信 Mesh 网络承载单兵装备业务能力受到现场无线信道质量、节点通信资源抢占等影响,不合适的信道资源分配将降低 Mesh 网络整体服务质量。在构建 Mesh 拓扑网络的基础上,提出考虑单兵装备业务类型的非合作博弈资源分配方法,构建节点报价-业务通信-节点惩罚机制,实现无线信道资源合理分配。仿真结果表明,在明确接入单兵装备业务类型的前提下进行节点报价和信道资源分配,能够提升 Mesh 网络整体服务质量,为应急作业效率优化提升提供参考。

关键词:电力应急通信;无线自组网;Mesh 网;信道分配;博弈论

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号:TN925 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2024)02-0266-07

Power Emergency Communication Resource Allocation Based on Non-cooperative Game

WU Qing, HU Ming, MENG Zijian, FANG Shuang, WANG Zhigang, ZHAO Xunwei, LIU Di

(State Grid Information & Telecommunication Group Co., Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: The ability of individual equipment business transmission in power emergency communication Mesh network is affected by the quality of wireless channel and the preemption of channel resources. Improper channel resource allocation will reduce the overall service quality of Mesh network. With the construction of Mesh network topology, a resource allocation method considering the business type of individual equipment based on non-cooperative game is proposed. It constructs a node quotation-communication service-node penalty mechanism and realizes the reasonable wireless channel allocation. Simulation results show that the overall service quality of Mesh network can be improved by quoting and allocating with the type of individual equipment, which provides a reference for the optimization and improvement of emergency operation efficiency.

Key words: power emergency communication; wireless ad hoc network; Mesh network; channel assignment; game theory

0 引 言

为进一步提升突发事件应对能力,国家电网公司启动了新一代应急指挥系统建设,确保突发事件情况下应急处置实时化、可视化、智能化、数字化,有效提升突发事件的应对水平。其中,以手持设备、便携基站、无人机^[1]、飞艇、卫星等构成的电力应急通信系统,在 5G、光纤等正常电力通信网络不可用的情况下,能够为突发灾害、迎峰度夏、重大活动保电等电力应急事件^[2]提供通信服务,在应急抢修作业

现场与后方指挥中心之间建立可靠的通信连接^[3]。特别是在应急作业现场,本地通信网络能够为作业终端提供信息传输服务,确保现场人员沟通及时、作业安全、效率提升。然而,本地应急通信网络(在新一代应急指挥系统中是 Mesh 自组织网络^[4])在完成网络拓扑构建后,各业务终端对网络资源需求的自私性与网络资源有限性之间形成矛盾,各节点系统申请或占用尽可能多、质量尽可能好的信道资源进行数据发送,这将造成无线信道资源的浪费,信道

* 收稿日期:2022-07-26;修回日期:2022-09-13

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5700-202218220A-1-1-ZN)

通信作者:吴庆 Email:wuqing@sgitg.sgcc.com.cn

资源利用率的下降;另一方面,由于电池容量、处理能力、存储空间等约束,部分节点不愿意过多地参与到数据转发工作中,从而影响了 Mesh 网络提供高效的通信服务。

文献[5]以网络的总链路加权干扰为约束条件完成信道分配,主要应用于大量密集节点应用场景。文献[6]构建了一种动态频谱分配模型,主要应用于移动运营商蜂窝网络。文献[7]对 Mesh 网络中无线链路的预期负载进行量化分级,通过节点优先级和节点邻居数来对信道分配进行优化,但节点优先级与业务之间的对应关系不明晰。文献[8]提出了一种新的基于联合合作博弈来解决联合路由与信道分配的最优化问题,需要各个节点及簇节点通过遵守公平路由协议来实现信道资源管理。

综上,本文针对应急现场 Mesh 自组织网络,考虑现场采集、视频、交互等业务特征及通信需求,提出面向应急现场的电力应急通信非合作博弈信道分配方法,结合应急单兵装备业务特征,通过“节点报价-业务通信-节点惩罚”机制,提升 Mesh 网络信道资源利用效率及网络整体业务服务质量,为应急作业协调指挥效率优化提升提供参考。

1 应急现场通信网络

1.1 应急通信与单兵装备

根据新一代应急指挥系统建设要求,形成了以

“超小型便携卫星站+无线宽带 Mesh 自组网设备+便携式融合调度一体机+个人终端”为核心的应急通信及单兵装备,其中现场单兵装备主要包括以下几类设备。

- 1)智能安全帽:具备视频、对讲、定位、报警等功能,实现作业人员与后方直接沟通,辅助提升处理能力和作业效率。
- 2)智能布控球:具备视频采集、红外夜视、对讲等功能,采集现场音视频,便于后方指挥中心掌握现场情况。
- 3)智能手环:能够对人员体征(体温、心率等)及定位信息实时采集和监测,对异常状态自动报警,确保人员状态正常。
- 4)行为记录仪:具备视频记录、对讲、定位等功能,监督作业过程规范、安全。
- 5)气体检测仪:具备可燃气体、氧气、一氧化碳、硫化氢等气体检测能力,确保基坑、管廊、密闭空间等作业环境安全。

此外,超小型便携卫星站和无线宽带 Mesh 自组网设备为应急现场提供通信服务。多个 Mesh 自组网设备之间建立无中心多跳通信网络,并通过 WiFi 热点为周围单兵装备提供通信接入。典型的应急现场作业部署如图 1 所示,各应急基干分队、各抢修作业人员、各单兵设备之间主要通过 Mesh 网络与前方指挥部通信。

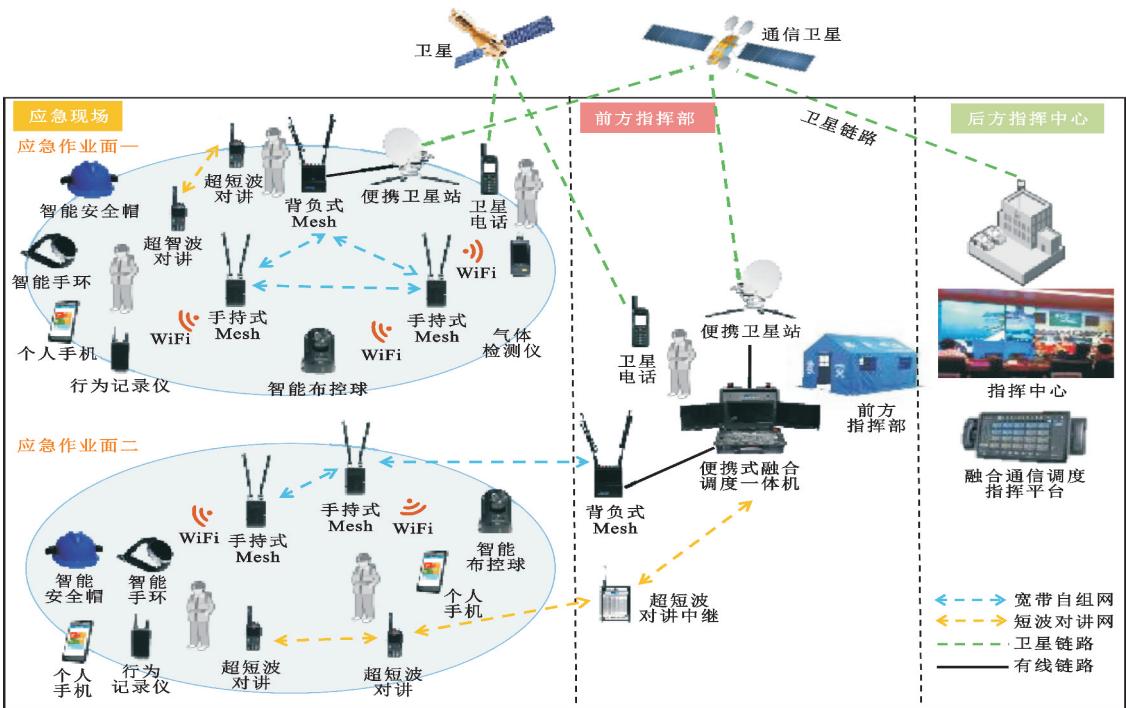


图 1 应急通信与单兵装备典型应用场景

Fig. 1 Typical application scenarios of emergency communication and individual equipment

1.2 Mesh 自组织网络

在应急现场,Mesh 自组网络如图 2 所示,主要包括 3 类节点:一是为应急现场单兵装备提供 WiFi 热点接入的节点,如节点 S_1, S_2, S_3 等;二是作为 Mesh 自组网中继的节点,如节点 R_1, R_2, R_3 等,同时也可以为单兵装备提供 WiFi 接入;三是直接与前方指挥部连接的节点,如节点 D 。应急现场有且只有一个节点 D ,应急现场信息都将汇聚到节点 D ,网络形成树状拓扑。

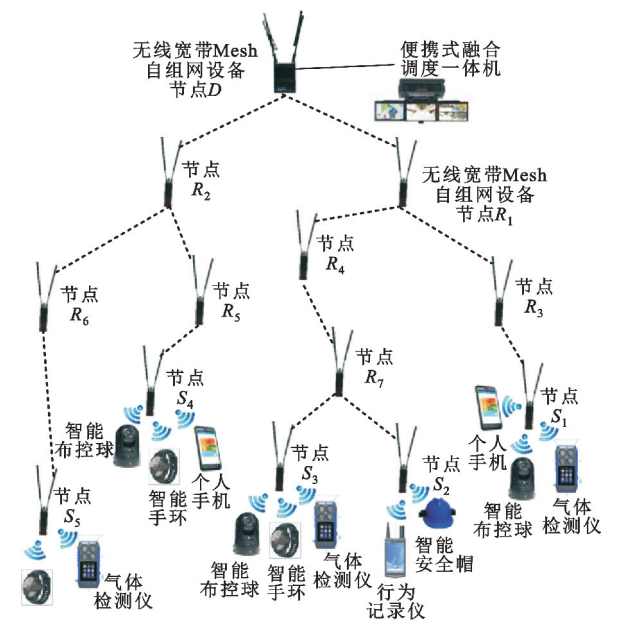


图 2 Mesh 自组网络拓扑

Fig. 2 Diagram of Mesh ad hoc network topology

Mesh 自组织网络采用正交频分多址 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 作为多址接入方案^[9],能够为不同的业务或链路分配不同的子载波,从而可以成为能够灵活调配的通信资源,并且在多个子载波上并行传输业务,能够带来分集增益。

2 电力应急通信网络信道分配方法

2.1 多信道无线 Mesh 网络信道分配模型

对于随机分布的无线 Mesh 节点,将各个节点构建可靠的无线 Mesh 网络拓扑是第一步。文献[10–12]等提供了针对不同场景、不同应用的无线 Mesh 网络拓扑构建方法,为业务、节点和网络组建适合的路由。在无线 Mesh 网络拓扑构建完成后,基于多射频多信道、定向天线、改进 MAC 协议等技术实现信道分配,从而增强网络整体信通性能。

仍以图 2 为例,各个节点根据算法构建 Mesh 拓扑,由源节点 S_i 经过中继节点 R_i 连接至根节点 D 形成一条端到端的业务信息通路,现场各单兵装备在 Mesh 网络上形成了许多路径相同、不同或部分相同的业务信息通路。为减少信道间干扰对通信带宽、通信质量的影响,需要对所有业务信息通路进行信道分配,实现业务传输需求与网络服务质量最大化的匹配。

首先定义无线 Mesh 网络中的节点、链路等相关参数。无线 Mesh 网络建模为图 $G(N, E)$, 其中, N 表示无线 Mesh 网络中所有的 Mesh 节点集合, E 表示经过网络拓扑构建后形成的所有链路集合。对于 N 中两个节点 $p, q \in N$, 以及节点 p, q 形成的链路 $e_{p-q} \in E$ 。链路 e 的上行节点 $U(e)$ 表示链路 e 的两个节点 p, q 中更靠近根节点 D 的节点, $D(e)$ 表示链路 e 的两个节点中更靠近现场单兵装备的节点, 也即

$$U(e) = \{p | e_{p-q} \in E, D(e) = q\} \tag{1}$$

$$D(e) = \{q | e_{p-q} \in E, U(e) = p\} \tag{2}$$

定义单位路径 l 表示为以根节点 D 、源节点 S 、或存在多个下行节点的中继节点 R 为端点,且路径中不含这 3 类节点的最长路径,即在整条单位路径 l 中不会在某个中途节点出现分支链路的情况。可以为每一个节点定义节点权重 Q_n , 每一条单位路径定义路径权重 Q_l , Q_l 为距离根节点 D 较远端节点的节点权重,有

$$Q_l = Q_n(D(l)) \tag{3}$$

基于以上定义,在完成无线 Mesh 网络拓扑图 G 构建之后对链路进行权重计算,按照链路权重顺序依次分配信道直到所有链路都被分配了信道。其中,链路权重基于式(3)计算,其核心是节点权重 Q_n 的计算方法。

文献[13]针对树状网络拓扑,按照距离根节点的距离对链路进行分级,并结合流量和信道间干扰情况作为信道分配的因子,以最小化链路带宽损失作为目标函数。文献[7]提出了一种基于邻节点数 B 、节点优先级 P 的节点权重计算方法,节点权重为 $Q_n = B/P$ 。可见,邻节点越多、优先级越高的节点,权重越大。上述方法仅考虑了无线 Mesh 通信网络本身的拓扑特性和信道干扰,并未完全结合实际业务。而在电力应急现场,气体检测仪环境采集、智能布控球视频采集、行为记录仪多方音视频会商等业务对通信网络性能指标的要求不相同,单从接入单兵装备的数量、某个 Mesh 节点优先级无法获得最

优的信道分配结果。因此,本文提出基于非合作博弈的 Mesh 网络资源分配方法,利用基于非合作博弈的经济学理论,通过一定的激励机制,提升网络及节点的运行效率或效益,为单兵装备提供最优的通信服务。

2.2 基于非合作博弈的 Mesh 网络资源分配方法

博弈理论的核心是参与者之间的相互作用,每一个参与者自身的行为,对所有参与者所感兴趣的结果都会产生影响。同时,每一个参与者也知道自身的行为会对所有参与者所感兴趣的结果产生影响,并采取相应的行动。博弈论一般被分成两种类型:合作博弈与非合作博弈^[14]。合作博弈要求参与者之间应遵循具有约束力的协议,参与者通过建立起的这个有约束力的协议,使得本不能实现的合作方案得以实现,从而达到博弈的效果。而非合作博弈则在参与者之间不存在这样的协议约束。因此在非合作博弈中,参与者一般可以看作是一个或一类理性的决策单元,当参与者彼此之间产生影响的时候,单独博弈参与者如何决策是影响结果的主要因素,其策略与其他参与者无关,该参与者通过采取适合的策略使得自身的收益得到最大化的实现。

对于没有任何合作或者无约束条件的无线 Mesh 网络而言,引入节点报酬概念,优化节点信道资源的利用效率。

2.2.1 系统模型

无线 Mesh 网络提供高质量通信服务的核心是合理的信道分配,而信道分配的依据来源于各节点对通信资源的需求(申请)。在无线 Mesh 网络中,业务数据从某个源节点 S_i 最终到达目标节点 D ,各中继节点 R_i 转发数据需要付出一定的成本。各节点的成本定义为 $c=\{c_{R1},c_{R2},\cdots,c_{Rn}\}$,各中继节点根据自己的成本信息可以给出转发数据的报价 $b=\{b_{R1},b_{R2},\cdots,b_{Rn}\}$,目标节点 D 根据各中间节点的报价计算得到不同链路上所有节点的报价之和,从而根据不同层级链路和不同链路报价来进行信道分配。对于链路上各个节点各自的收益 p_{Ri} ,节点 R_i 的效用值 $u_{Ri}=p_{Ri}-c_{Ri}$,这里 p_{Ri} 不一定等于 b_{Ri} 。

对于电力应急通信系统而言,各个无线 Mesh 节点相对独立,由于各节点之间信息的非对称,节点盲目、自私、夸大、虚假报价都将导致网络最终无法达到理想的信道分配最优解。因此,有学者提出 Ad hoc-VCG (Vickery-Clark-Groves) 防策略机制^[15],激励各节点给出转发所需的真实成本。其核心思想是

对于某一条链路(信道)上的所有节点 R_i ,除支付该节点所报的价格 b_{Ri} 之外,还向该节点支付一定的额外报酬 Δp_{Rk} ,这个额外的报酬值为链路(通道)选择其他节点比选择该节点 R_k 多出来的机会成本值。那么节点 R_k 获得的实际报酬为

$$p_{Rk}=\Delta p_{Rk}+c_{Rk} \tag{4}$$

这样,可以激励节点 R_k 报出真实成本,从而实现防策略性,保证节点没有动机去任意抬高自己的价格,其收益不会随着其报价提高而增加^[16]。

2.2.2 报价机制

结合 2.2.1 节描述的系统模型和 OURS 模型^[17],能够在其他节点报出真实成本的情况下,节点 R_i 的最优策略是报出自己的真实成本 c_{Ri} 。这样,所有节点在非合作情形下,都选择报出各自的真实成本达到纳什均衡。

报价机制包含初始化、报价和惩罚 3 个阶段。在初始阶段,各源节点 S_i 根据各自接入的单兵装备业务特征及预算,对发送业务数据所能支付的价格进行广播。显然,承载音视频指挥会商业务传输,相对于承载现场气象情况采集业务传输,源节点 S_i 支付的价格更高,以便获得更好的通信资源。在报价阶段,全部中继节点 R_i 基于 S_i 广播的支付能力和自己所处的链路拓扑位置提出报价 b_{Ri} 。在完成业务(或者一定时间内的一批业务)传输后,进入惩罚阶段,对比源节点 S_i 、中继节点 R_i 转发业务类型和报价之间关系,若节点报价与转发业务类型相匹配,则按照其报价进行支付;若节点报价与转发业务类型不符(如承载音视频交互业务却提出低报价,或者承载采集类业务却提出高报价),则对该节点进行罚款惩罚(式(4)中的额外报酬 Δp_{Rk} 变为罚款惩罚,从而防止节点报出非真实成本下的报价,造成链路权重失真的问题)。这样,式(3)中节点权重 Qn 可由各节点真实报价 b_{Ri} 得到,进而可以计算得到链路权重,并根据链路权重的高低顺序分配无线 Mesh 网络信道资源。

2.2.3 算法步骤

无线 Mesh 网络信道节点权重(报价)的算法伪代码如下:

```
输入:无线 Mesh 网络拓扑架构、单兵装备业务类型
输出:信道分配结果
1 for  $i=1:m$  //  $m$  个源节点,初始阶段广播支付价格
2     CollectTask( $i$ ) //收集接入终端的业务类型
3     BroadcastPrice( $i$ ) //广播报价
4 end for
5 for  $j=1:n$  //  $n$  个中继节点依次报价
```

```
6   GetPrice(j)  //中继节点获取下游节点报价
7   BroadcastPrice(j)  //广播报价
8   end for
9   AllocationChannel(Qn)  //计算权重并分配信道
10  TaskTransmission()  //各单兵装备业务传输
11  for k=1:m+n  //对 n+m 个节点进行惩罚或支付
12      if(IsPunishment(k))//判断满足惩罚条件
13          Punish(k)  //对节点做出惩罚
14      else  //支付
15          Pay(k)  //对节点进行支付
16      end if
17  end for
```

在电力应急现场,应急通信与单兵装备主要围绕前方指挥部、各作业现场部署,相对于一般的 Mesh 网络应用场景,应急现场部署的无线 Mesh 网络拓扑相对固定,各链路上承载的业务相对固定,业务对通信性质的需求也相对固定,上述算法可在初始化后进行保持,直到出现单兵装备入/退网、突发业务传输起止、Mesh 网络拓扑变化等情况,再动态调整以达到网络服务整体最优。

3 仿真分析

3.1 仿真场景构建

以国家电网公司应急基干分队装备配置标准、电力应急通信系统架构^[18-19]、某地区抢险救灾作业现场、实际列装 Mesh 装备等作为参考设置仿真参数。部署 Mesh 自组网设备 10 台(分别以最大两跳广度优先和最大 4 跳深度优先随机形成树状拓扑,如图 3 和图 4 所示)。部署各类单兵装备 10~20 台(3 类终端各 1/3 且随机接入到 Mesh 设备源节点 S_i),音视频会商交互类业务(如行为记录仪、个人手机)支付价格 P_1 设置为 5,视频采集类业务(如智能布控球)支付价格 P_2 设置为 3,一般采集类业务(如智能手环、气体检测仪、智能安全帽)支付价格 P_3 设置为 1。

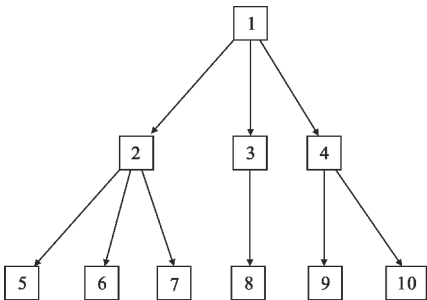


图 3 随机生成 Mesh 通信网络拓扑(广度优先)
Fig. 3 Topology of randomly generated Mesh network (breadth first)

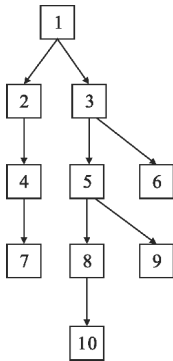


图 4 随机生成 Mesh 通信网络拓扑(深度优先)
Fig. 4 Topology of randomly generated Mesh networks (depth first)

需要注意的是,与一般的树状拓扑不同,图 3 和图 4 中 1 号节点(即目标节点 D)所处位置为应急前方指挥部,实际情况中不可能部署在灾害现场中心,也即所有节点 R 和 S 基本都分布在同一个区域(灾害现场),而不会分散在节点 D 周围 360° 区域内。因此在分配信道时,图 3 和图 4 拓扑中,即使相邻但不处于同一条链路上(如图 3 中 e_{2-7} 和 e_{3-8} ,图 4 中 e_{4-7} 和 e_{5-8}),也应尽量分配不同的信道以避免干扰。

3.2 仿真结果及分析

根据设置,部分信道正常可承载单兵业务;部分信道由于外部干扰或邻信道干扰,所承载的单兵业务将受到影响。在设置相同节点数量、网络拓扑、业务类型、信道条件的前提下,当正常信道数量减少时,根据本文方法以及文献[7]、文献[13]方法,信道情况与不受信道干扰影响的单兵装备数量占比之间的关系仿真计算结果如图 5 和图 6 所示。

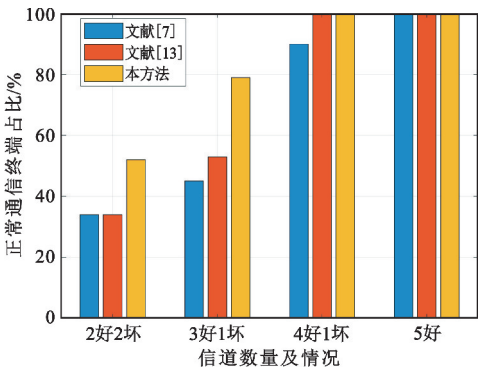


图 5 信道情况与服务单兵装备数关系(广度优先)
Fig. 5 The relationship between the channels and serviced individual equipment (breadth first)

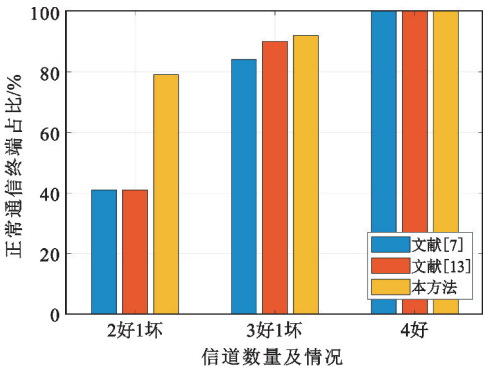


图 6 信道情况与服务单兵装备数关系(深度优先)
Fig. 6 The relationship between the channels and serviced individual equipment (depth first)

此外,若不采取“节点惩罚”的机制来实现非合作博弈,则节点将产生无节制的资源竞争,信道分配更趋于随机。信道分配结果与该信道承载单兵装备业务之间的适配关系程度将恶化,如图 7 所示。

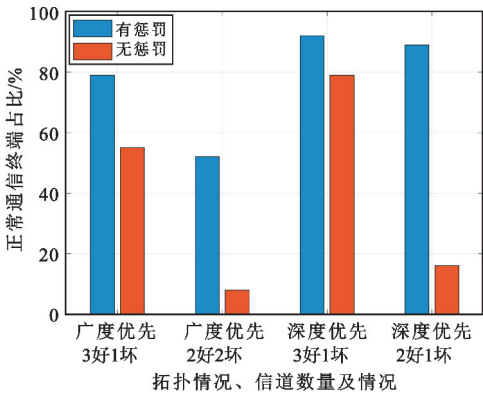


图 7 可用信道数量与服务单兵装备数关系(无节点惩罚)
Fig. 7 The relationship between the number of available channels and serviced individual equipment (no punishment)

由图着色原理^[20],当可用信道数足够多时(如图 5 中存在 5 个无干扰信道),可避免相邻链路间的信道干扰,所有单兵装备均能够得到满足要求的通信服务。但当无干扰信道数量减少,或者相邻链路间不得不分配相同信道资源时,所造成的干扰将降低链路通信服务质量。由图 5 和图 6 可见,采用本方法相对于文献[7]和[13]方法能为相对更多的单兵装备提供通信服务。

4 结 论

本文提出的非合作博弈信道资源分配方法充分考虑了电网新一代应急指挥系统对现场采集、视频、交互等不同单兵装备业务类型的通信需求,为 Mesh

网络中的源节点报价提供了依据。通过“节点报价-业务通信-节点惩罚”机制,确保中继节点权重计算的可信性,进而为信道资源分配的合理性提供基础,避免网络节点因为自私性对网络通信资源的不合理占用,为现场态势收集分析、各方资源调动协调、应急指挥辅助决策提供支撑与保障。

参考文献:

[1] 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.

[2] 苗新,陈希,赵子岩. 电力通信应急预案体系建设与编制[J]. 电力建设,2010,31(7):54-58.

[3] 陈曦,刘倩,杨斌,等. 电力应急通信系统建设探讨[J]. 电力安全技术,2022,24(1):11-13.

[4] 史俊潇,吴慧. 基于异构组网的电力应急通信保障研究[J]. 电力信息与通信技术,2020,18(7):46-51.

[5] 叶方,孙雪,李一兵. 基于改进离散蝙蝠算法的无线 Mesh 网络部分重叠信道分配[J]. 电子与信息学报,2022,44(12):4265-4273.

[6] 杜海龙,邵霞,张卫党. 一种动态频谱分配的多层博弈模型构建分析[J]. 电讯技术,2022,62(7):922-928.

[7] 张颀,柴继文,孙冠杰,等. 基于链路负载分级的无线 Mesh 网信道分配算法[J]. 电子技术应用,2016,42(5):82-84,89.

[8] 张维维,何家峰,高国旺,等. 基于博弈论的无线 Mesh 网络路由与信道分配联合优化算法[J]. 吉林大学学报(工学版),2018,48(3):887-892.

[9] MOHAJER A, DALIRI MS, MIRZAEI A, et al. Heterogeneous computational resource allocation for NOMA:toward green mobile edge-computing systems[J]. IEEE Transactions on Services Computing. 2022,6:1-14.

[10] 高见. 异构无线 Mesh 网络路由技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2021.

[11] 亓峰,唐晓璇,邢宁哲,等. 未来大数据环境下的配用电通信网虚拟网络架构及应用[J]. 数据采集与处理,2015(3):511-518.

[12] 程德怿,乔健,朱俊峰. 基于数据分组到达时间的无线 ad hoc 拥塞避免算法[J]. 计算机应用与软件,2021,38(9):127-132.

[13] 孙冠杰. 基于无线 Mesh 网络信道资源分配及高效利用的研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.

[14] 罗云峰. 博弈论教程[M]. 北京:清华大学出版社,2007:218-259.

[15] ANDEREGG L,EIDENBENZ S. Ad hoc-VCG;a truthful and cost-efficient routing protocol for mobile ad hoc networks with selfish agents[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Computing and Networking. San Francisco:ACM,2003:245-259

[16] 汪洋,林闯,李泉林,等. 基于非合作博弈的无线网络路由机制研究[J]. 计算机学报,2009,32(1):54-68.

[17] WANG W, LI X, EIDENBENZ S, et al. OURS: optimal unicast routing systems in non-cooperative wireless networks [C]//Proceedings of the 12th International Conference on Mobile Computing and Networking. Los Angeles: ACM, 2006: 278-289.

[18] 陈曦,刘倩,杨斌,等. 电力应急通信系统建设探讨[J]. 电力安全技术,2022,24(1):11-13.

[19] 陆绍彬,郑文斌. 应急通信指挥车在电力系统中的应用分析[J]. 电力系统装备,2020(22):17-18.

[20] 胡致远,郭建丁,王景,等. 多接口无线 mesh 网络的信道时空分配[J]. 重庆大学学报,2011,34(2):26-31.

作者简介:

吴庆 男,1983 年生于重庆,2015 年获工学博士学位,现为高级工程师,主要研究方向为电力通信及自动化、终端通信接入网、电力应急通信等。

胡明 男,1980 年生于北京,2006 年获工学硕士学位,现为工程师,主要研究方向为电力通信网络运行及测试。

孟子健 男,1996 生于天津,2021 年获工学硕士学位,主要研究方向为电力 5G 通信、电力应急通信等。

方爽 男,1988 年生于河北唐山,2014 年获工学硕士学位,现为工程师,主要研究方向为电力应急通信、5G、电力无线专网等。

王志刚 男,1982 年生于辽宁沈阳,2007 年获工学硕士学位,现为工程师,主要研究方向为电力通信网络设计与运行。

赵训威 男,1974 年生于江苏镇江,2005 年获工学博士学位,现为正高级工程师,主要研究方向为无线通信技术、电力通信网络规划及系统设计。

刘迪 男,1982 年生于内蒙古呼伦贝尔,2007 年获工学硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为人工智能、信息化建设、应急指挥系统等。