

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)03-0157-05

一种基于宽带自组网路由协议应急通信分布式传输方法

游上院¹, 黄彦霖², 李秉恩³, 张东强⁴
(广东电网有限责任公司茂名供电局, 广东 茂名 525000)

摘要:为应对应急通信环境中因地形遮挡、信号衰减等因素导致的传输不稳定问题,提出一种基于宽带自组网路由协议的应急通信分布式传输方法。首先,通过建立T型多径信道模型,计算信号绕射损耗,引入反射因子与地形参数,量化障碍物对信号传播的影响;然后,设计一种按需式宽带自组网路由协议,依据节点距离矢量和链路状态,基于邻居表编码与数据域动态计算,实现传输带宽的智能分配;最后,通过分析带宽利用率与干扰系数,设计具有干扰抑制编码的信道传输机制,结合克拉美罗界优化编码性能,从而提升信号在分布式多节点环境中的传输强度与稳定性。实验结果表明,所提方法在各节点间实现了较高的信号传输质量,接收信噪比普遍维持在75 dB至85 dB之间,且频谱分布集中、幅度平稳,显著优于对比方法。因此,该方法在应急通信场景中具有较好的可靠性与实用性,为分布式应急通信系统的设计与优化提供了可行思路,后续可进一步研究节点动态更新机制以增强系统自适应能力。

关键词:应急通信;通信传输;状态辨识;分布式传输;宽带自组网路由协议;信息传输方法

中图分类号: TP274; TN929

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)03-0157-05

A distributed transmission method for emergency communication based on broadband ad hoc network routing protocol

YOU Shangyuan¹, HUANG Yanlin², LI Bingen³, ZHANG Dongqiang⁴

(Maoming Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Maoming 525000, Guangdong, China)

Abstract: To address the issue of unstable transmission caused by factors such as terrain obstruction and signal attenuation in emergency communication environments, this study proposes a distributed transmission method for emergency communication based on broadband ad hoc network routing protocols. Firstly, by establishing a T-shaped multipath channel model, the signal diffraction loss is calculated, and the reflection factor and terrain parameters are introduced to quantify the impact of obstacles on signal propagation; Then, design an on-demand broadband ad hoc network routing protocol, based on node distance vectors and link states, using neighbor table encoding and data domain dynamic calculation to achieve intelligent allocation of transmission bandwidth; Finally, by analyzing the bandwidth utilization and interference coefficient, a channel transmission mechanism with interference suppression coding is designed, and the coding performance is optimized by combining the Cramer boundary, thereby improving the transmission strength and stability of the signal in a distributed multi node environment. The experimental results show that the proposed method achieves high signal transmission quality between nodes, and the received signal-to-noise ratio is generally maintained between 75 dB and 85 dB. The spectrum distribution is concentrated and the amplitude is stable, which is significantly better than the comparative methods. Therefore, this method has good reliability and practicality in emergency communication scenarios, providing feasible ideas for the design and optimization of distributed emergency communication systems. Further research can be conducted on node dynamic update mechanisms to enhance the system's adaptive capabilities.

Keywords: emergency communication; communication transmission; state identification; distributed transmission; broadband ad hoc network routing protocol; information transmission method

在灾难应援以及活动安全等工作领域中,部分情况下可能存在通信需求剧增的现象。在这样的情况下,保障信息能够稳定传输的应急通信机制十分关键。然而,由于应急通信环境因素的影响,例如地下、山区等信号较差的地点,应急通信的信息传输过程很可能出现信息传输失败的问题。为了缓解这一问题,领域内很多研究人员提出了面向应急通信的传输方法。

多路径聚合下的应急通信传输方法^[1]。在通信链路

中建立安全聚合网关,并利用调制解调器定义该网关的VPN。通过加入加速程序,构建多路径实时传输的通信网关数据流。在此基础上结合安全加密技术,实现应急环境下的通信传输。但通信路径的聚合可能会带来额外的带宽和能耗开销,导致在部分场景下难以实现较为高质量的通信传输。基于几何多径信道的应急通信传输方法^[2]。考虑通信环境的信号干扰状态,推导通信信道的多径分量,由此构建几何多径信道的三径模型。在该模型中添加

收稿日期:2024-07-16;录用日期:2024-08-28

基金项目:广东省科技项目(GDKJXM20220831)

作者简介:游上院(1989—),男,高级工程师,研究方向:应急管理、应急装备。

引用本文:游上院,黄彦霖,李秉恩,等.一种基于宽带自组网路由协议应急通信分布式传输方法[J].自动化技术与应用,2026,45(3):157-161.
([J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(3):157-161.)

信号衰落因子,计算信号在信道传输过程中的综合损耗。构建反射路径长度矩阵,将该损耗值转化为路径最优值,由此实现应急通信传输过程。但该方法面临着信道建模以及相应模型参数优化的问题,但通信信道往往存在着多变性特征,使得模型的参数优化往往难以实现,导致通信质量不如预期。基于背负式 Mesh 基站的应急通信传输方法^[3]。将采集的信息以稳定的回传调度过程传输至通信终端。在该终端建立背负式 Mesh 基站架构,并将通信节点通过匹配的过程进行点对点的信息传输。在此基础上,结合基站的信息分配功能,实现应急通信传输过程。但背负式 Mesh 基站依赖于可靠的电力供应,使其信号覆盖范围受到较大的限制,在电力资源不足的应急场景下,可能会影响最终的通信传输质量。基于无线网状网络路由协议的应急通信传输方法^[4]。设计了无线网状网络的稳定拓扑结构,并分析网络节点的通信利用率参数,根据该参数制定网络节点的通信消耗平衡策略。在此基础上选定网络通信的路由协议,结合应急通信的距离矢量,为其分配通信传输信道,实现应急通信传输过程。但无线网状网络具有开放性和广播特性,导致通信数据的安全性问题难以得到有效的保障,可能会影响通信数据的质量。

鉴于上述文献所提出的应急通信传输方法存在不同方面的限制,导致应急通信传输的稳定性不足。基于此,本研究提出了一种基于宽带自组网路由协议的应急通信分布式传输方法。该方法通过分析在应急环境下的信号绕射损耗,并通过宽带自组网路由协议为传输节点分配相应的带宽,在此基础上,为传输信道添加干扰抑制编码,实现稳定的高质量应急通信传输。

1 应急通信分布式传输方法设计

1.1 应急通信信号绕射损耗计算

在应急通信场景中,由于建筑物、树木等障碍物的遮挡,信号在传输的过程中存在多径效应,导致信号发生绕射的传播路径^[5-6]。对此,本研究计算了在应急通信环境下的信号绕射损耗。

将信号在多径效应传输下的信道视为 T 型架构,如图 1 所示。

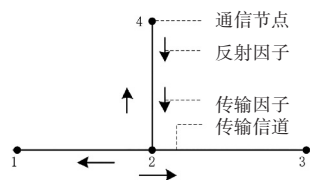


图 1 T 型信号多径传输信道

Fig. 1 T-type signal multipath transmission channel

如图 1 所示,在 T 型信道架构中,4 个节点之间需要通过中间节点 2 来实现通信传输。假设在 4 个节点处的传输因子相同,按照式(1)计算相应的反射因子。

$$\varepsilon = \frac{U \exp(l + Z)}{|\eta|} \quad (1)$$

式中, ε 表示反射因子, U 表示透射系数, l 表示节点传输

信道长度, Z 表示传输信道阻抗, η 表示传输因子。

将计算所得的反射因子作为信号绕射损耗的衰减常数,结合应急传输场景的地形环境,计算相应的绕射损耗值^[7]。本研究将传输环境参数简化为如图 2 所示的过程。

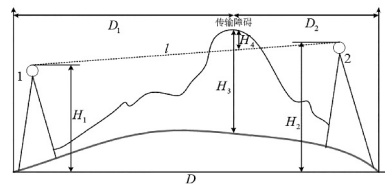


图 2 应急传输场景环境参数简化示意图

Fig. 2 Simplified schematic diagram of environmental parameters for emergency transmission scenarios

图 2 中,在传输节点 1 和 2 之间,存在地面高度为 H_3 的障碍,该障碍的最高点与两个传输节点之间的距离分别为 D_1 和 D_2 ^[8-9]。基于这一简化的应急通信传输环境,计算其绕射损耗,具体的计算方法如式(2)所示。

$$\begin{cases} F = \sqrt{\frac{\lambda D_1 D_2}{D}} \\ v = -H_4 \frac{\sqrt{2}}{\varepsilon \cdot F} \\ L(v) = \frac{H_3}{H_1 + H_2} \lg \sqrt{v^2 + 1} \end{cases} \quad (2)$$

式中, F 表示第一菲涅耳半径, λ 表示应急通信环境路面的等效半径系数, D 表示两个传输节点的水平距离, v 表示信号传输速率, H_4 表示传播余隙, $L(v)$ 表示信号的绕射损耗, H_1 和 H_2 分别表示节点 1 和 2 的海拔高度。

通过上述步骤的分析与计算,得到应急通信场景下的信号绕射损耗值。

1.2 路由协议分配传输带宽

根据计算所得的信号绕射损耗,定义应急通信传输的宽带自组网路由协议,并为通信节点分配相应的传输带宽。基于应急通信的分布式传输特性,本研究采用按需类型的自组网路由协议。在信号发射端启动路由查找,并根据节点的距离矢量分配传输带宽^[10]。

定义发射的应急信号的数据编码格式,如图 3 所示。

| 邻居节点地址 | 链路持续时间 | 表项失效时间 |
|--------|--------|--------|
| | | |

图 3 应急信号数据编码格式

Fig. 3 Encoding format of emergency signal data

如图 3 所示,本研究采用邻居表的形式作为信号的数据编码格式。基于该编码格式将路由表初始化处理,并生成路由协议的数据链表,如图 4 所示。

考虑到在如图 4 所示的数据链表中,数据域中的信号存在分量差,本研究对链表中的数据域大小进行计算,如公式(3)所示。

$$a = \frac{\sqrt{r^2 - G}}{t^2} \quad (3)$$

式中, a 表示路由协议的数据域大小, r 表示传输节点发射信号的有效通信半径, G 表示信号分量差, t 表示数据

链路的持续时间。

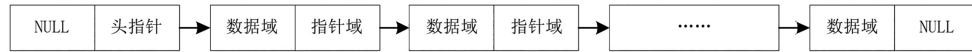


图 4 路由协议数据链表

Fig. 4 Routing protocol data linked list

利用计算所得的数据域大小定义路由协议的数据链表后,在路由链路中发起通信传输的路由请求^[11-14]。并通过一次泛洪过程建立应急通信的信号传输路由路径,在此基础上,建立路由协议的自组网拓扑分组格式,如图 5 所示。

| 分组类型 (8) | 分组序号 (8) | 跳数 (8) | 持续时间 (8) |
|-------------|-------------|-----------|-------------|
| 路径分配节点(32) | | | |
| 源地址(32) | | | |
| 发送时间(32) | | | |
| 转发节点地址(32) | | | |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 转发节点地址(32) | | | |

图 5 路由协议自组网拓扑分组格式

Fig. 5 Packet format of routing protocol self-organizing network topology

在图 5 中的分组格式中,数字表示了分组格式各部分的字节数量。由此建立应急通信的自组网路由协议。在此基础上,为路由发现分组添加相应的带宽^[15]。带宽的添加值的计算如公式(4)所示。

$$A = \frac{aL}{\sum_{i=1}^k aP(L)} \quad (4)$$

式中, A 表示协议的带宽添加值, i 表示应急通信节点, k 表示节点路由数据链表, L 表示分组的接口队列长度, $P(L)$ 表示该节点的信号接入概率。

通过添加分组带宽,制定应急通信的带宽自组网路由协议。基于此,计算各传输节点的带宽分配值,如公式(5)所示。

$$K = w \frac{1}{hP(L)} + \sqrt{A^2 + n} \quad (5)$$

式中, K 表示传输节点带宽分配值, w 表示中间节点, h 表示前向路由距离, n 表示路由路径跳数。

根据公式(5)的计算结果为应急通信传输的各个节点分配带宽自组网路由协议的传输带宽值。

1.3 通信信号分布式传输

在分配的传输带宽值下,调制应急通信的信号强度。通过计算当前强度下的带宽利用率参数,分析信号分布式传输信道中的干扰。在此基础上,结合上述求解的信号绕射损耗,为信号的传输信道设计相应的干扰抑制编码,保证信号在传输过程中的强度^[16],实现应急通信的分布式传输。

信号强度的带宽利用率参数的计算方法如公式(6)所示。

$$J = (C + xK) \sum_{i=1}^k \text{int}\left(\frac{E}{x}\right) \quad (6)$$

式中, J 表示, C 表示协议数据帧偏置, x 表示应急传输信号, E 表示信道带宽冗余。

通过该参数的计算,对比通信信道中的静态总线带宽,分析当前信号强度下的干扰系数。干扰系数的求解方法如公式(7)所示。

$$s = \sqrt{\frac{C}{n(\delta + 1)}} \quad (7)$$

式中, s 表示传输信道干扰系数, δ 表示静态总线带宽。

在此基础上,将分布式传输节点的干扰系数进行求和,求解多信道的通信干扰。这一过程的信号频谱如图 6 所示。

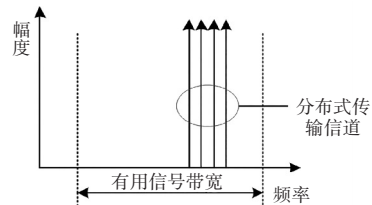


图 6 分布式传输信道干扰系数求和示意图

Fig. 6 Schematic diagram of summing interference coefficients for distributed transmission channels

按照如图 6 所示的信道干扰求和后,结合前述步骤求解所得的信号绕射损耗,为传输信道定义干扰抑制的编码^[17]。信道干扰抑制编码的克拉美罗界的定义如公式(8)所示。

$$B = \frac{1}{s} \ln \mu^2 Z^\beta \quad (8)$$

式中, B 表示信道干扰抑制编码的克拉美罗界, μ 表示干扰系数求和的矩阵向量形式, Z 表示子载波, β 表示分布式信道求和后的频域幅值和。

通过为传输信道添加抑制干扰的编码,将信号在传输过程中的强度稳定在信号发射的初始值,由此实现应急通信分布式传输。

至此,完成基于宽带自组网路由协议的应急通信分布式传输方法的研究设计。

2 应急通信传输测试

2.1 应急通信环境搭建

选定的实验场地位于远离市区的丘陵山地环境中。该实验场地的原始通信信号较弱,适宜开展应急通信传输实验。

本次测试共设置 6 个分布式通信传输节点,分别搭载于六辆越野型吉普车中。将相应的车辆开至指定的通信传输区域,每个传输区域之间的距离均在 1.5~2.2 km 之间。当实验车辆在指定区域停稳后,将车辆携带的通信设备天线升高至 10 m,分别采用 A~F 为 6 个实验车的通信传输节点命名,并分别为其设定 IP 地址,如表 1 所示。

表 1 通信传输节点的 IP 地址设定

Tab. 1 IP address setting for communication transmission nodes

| 通信传输节点 | 虚拟机物理地址 | 虚拟机 IP 地址 |
|--------|----------------|---------------|
| A | 00:0C:30:A1:71 | 192.168.61.51 |
| B | 00:0C:30:B1:95 | 192.168.61.52 |
| C | 00:0C:30:C1:36 | 192.168.61.53 |
| D | 00:0C:30:D1:22 | 192.168.61.54 |
| E | 00:0C:30:E1:18 | 192.168.61.55 |
| F | 00:0C:30:F1:29 | 192.168.61.56 |

按照表 1 中的 IP 地址作为应急通信传输的定位。为每个虚拟机节点设置相应的信号接收信噪比初始值,如表 2 所示。

表 2 通信传输节点信号接收信噪比初始值

Tab. 2 Initial value of signal-to-noise ratio for signal reception at communication transmission nodes

| 通信传输节点 | 接收信噪比/dB |
|--------|----------|
| A | 9.4 |
| B | 8.6 |
| C | 13.5 |
| D | 11.3 |
| E | 12.5 |
| F | 8.5 |

以上述参数的通信环境作为本次应急通信传输测试的基本环境。在该环境下,测试应急通信传输方法的应用性能。

2.2 应急通信分布式传输实践

在测试环境下,构建六个通信传输节点的自组织网络。根据六个节点的地理位置分布,利用本研究所提方法将其构建为 A 节点和 D 节点之间经由 B、C 两个节点形成跳拓扑通信传输结构,D 节点和 F 节点之间经由 C、E 两个节点形成跳拓扑通信传输结构,由此形成应急通信的自组网架构,如图 7 所示。

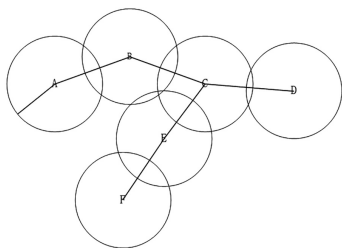


图 7 应急通信自组网架构

Fig. 7 Architecture of emergency communication self-organizing network

如图 7 所示,根据本文方法构建的自组网以车辆 C 为中心节点,向周围扩展为链路式自组网架构。根据该架构,按照设计的宽带自组网路由协议的通信传输区分字段,并生成相应的协议分组格式。结果如图 8 所示。

在如图 8 所示的协议分组格式下,为应急通信传输过程记录邻居节点的 IP 地址信息,构建通信分布式传输的通信链路,在此基础上,实现多节点之间的应急通信分布式传输。以接收节点 D 和节点 F 为例,通过快速傅里叶变

换计算接收的通信信号的频谱分量,绘制出节点通信传输的信号接收频谱,结果如图 9 所示。

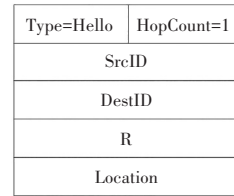
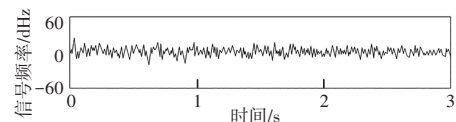
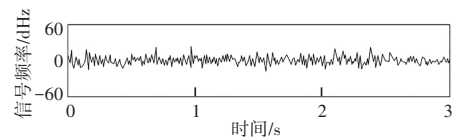


图 8 宽带自组网路由协议分组格式

Fig. 8 Packet format of broadband ad hoc network routing protocol



(a) D 节点接收信号频谱



(b) F 节点接收信号频谱

图 9 D、F 节点信号接收频谱

Fig. 9 Signal reception spectra of nodes D and F

根据图 9 所示的信号接收频谱分析可知,由本文方法传输得到的节点通信接收信号的幅度较为平稳,并且信号频率分布在 $[-0.2, 0.2]$ 之间,信号的接收较为完整。由此可见,在本文所提方法应用下的应急通信分布式传输能够在不同节点中均保障信号的传输质量,实现较为稳定的通信传输。

2.3 应急通信传输质量对比

采用对比分析的方法进一步解析本研究所提方法的应急通信传输质量。分别以文献 [1-4] 所提出的应急通信传输方法作为对比方法,测试各个方法在不同节点中的通信传输质量。以节点接收信号的信噪比为指标,分析相应方法的通信传输质量。经过测试,得到不同方法的应急通信传输质量结果如图 10 所示。

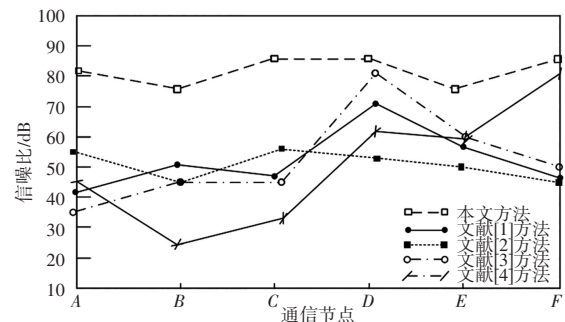


图 10 应急通信传输质量对比

Fig. 10 Comparison of emergency communication transmission quality

分析图 10 可知,在不同方法的应急通信传输中,对于各个通信节点的接收信号信噪比相比于初始信噪比,都有

着明显的提升,但提升的幅度略显不同。其中,文献[1]方法以及文献[3]方法应用下的节点接收信号的信噪比较为接近,均在节点D的接收信号质量最高,分别达到了70 dB及80 dB。而文献[2]方法应用下的节点接收信号信噪比在各个节点间虽然较为平稳,但总体信噪比数值不高。文献[4]方法在节点F处的接收信号比最高,达到了78 dB,但在节点B和节点C处信噪比较低。相比于其他几种方法,本文方法应用下的接收信号信噪比在各个节点处均比较高,且较为稳定,最高达到了85 dB,最低也有75 dB,通信传输质量较高。

由此可见,本文所提方法在应急通信环境下所实现的通信传输质量更高,有着更高的实践应用价值。

3 结论

本研究面向应急通信领域中的多个节点的通信需求,设计了基于宽带自组网路由协议的应急通信分布式传输方法。经过实验可知,该方法在实践应用中表现出了较高的通信传输质量,应用有效性较好。然而,由于时间和精力有限,本文研究内容仍有一些有待改进的研究空间。在复杂的应急通信环境中,宽带自组网路由协议可能面临着节点频繁更新的问题。考虑到这一点,在后续的研究工作中,还需针对网络路由协议中的节点自动更新方法展开深入的研究,使得路由协议能够根据实时的节点变化而自主地不断计算和更新路由信息,以保证通信传输的顺利进行。通过这一方面的优化,进一步提高应急通信分布式传输的整体质量。

参考文献

[1] 颜清华, 侯毅, 辛浪. 基于IPSec VPN和多路径传输协议融合的应

(上接第123页)

3 结论

电网协同优化调度是电力系统运营管理的核心部分,其对于电网运行安全、经济效益等均存在直接关联。因此,本文为保证电网的稳定运行,提出基于边缘计算的电网云-边协同优化调度方法。对该方法的应用效果展开相关分析后,确定该方法具备较好的应用效果,能够可靠完成电网调度,最大程度保证电网的经济效益。

参考文献

[1] 陈卫东, 吴宁, 黄彦璐, 等. 基于深度学习的微电网优化调度辅助决策方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(1):117-126.
[2] 安宝祥, 陈珍萍, 贺文, 等. 基于一致性的智能微电网多目标经济调度研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(10):86-93, 171.
[3] 郑重, 苗世洪, 李超, 等. 面向微型能源互联网接入的交直流配电网协同优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1):192-207.
[4] ANUBHAV KUMAR PANDEY, VINAY KUMAR JADOUN, JAYALAKSHMI N S. Real-time and day-ahead risk averse multi-objective operational scheduling of virtual power plant using modified Harris Hawk's optimization

急通信策略研究[J]. 信息网络安全, 2022, 22(2):47-54.
[2] 彭艺, 彭游, 杨青青, 等. 面向植被覆盖山区的无人机应急通信信道建模[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2023, 35(1):8-15.
[3] 李文峰, 朱彤, 武立文, 等. 矿用本安型应急通信终端在矿下应急通信中的应用[J]. 煤炭技术, 2023, 42(6):212-216.
[4] 孙红雨, 宋娇, 刘霞, 等. 无线网状网络路由协议在矿山应急通信中的应用研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(2):429-439.
[5] 王莉, 魏青, 徐连明, 等. 面向通信-导航-感知一体化的应急无人机网络低能耗部署研究[J]. 通信学报, 2022, 43(7):1-20.
[6] 权治, 李艳冠, 李保罡, 等. 空中应急通信网络中基于多属性的关键节点识别[J]. 无线电工程, 2022, 52(5):904-910.
[7] 钟剑峰, 王红军. 适用于无人机集群应急通信系统分簇路由协议[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(2):56-66.
[8] 王博文, 孙彦景. 基于联盟图博弈的地下空间无人机应急通信网络拓扑控制算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3):996-1005.
[9] 张宇明, 徐连明, 印思源, 等. 面向信息年龄的应急无人机网络低能耗信息采集和传输调度机制[J]. 通信学报, 2023, 44(7):1-13.
[10] 彭思敏, 张慧成, 吴铁洲, 等. 基于线性自抗扰控制的无线电恒压无通信传输方法[J]. 电源学报, 2023, 21(6):120-128.
[11] 陈丽琴, 顾静军. 基于无线传感器网络的地铁通信传输延迟优化方法[J]. 传感技术学报, 2022, 35(5):698-702.
[12] 石岩, 赵冬青, 武岳. 基于AdaBoost提升学习的次优中继选择安全传输方案[J]. 电子测量技术, 2023, 46(19):76-81.
[13] 肖华. 基于改进蜂群算法的应急通信指挥方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(10):162-166.
[14] 陈山, 吴丽莎, 张凯, 等. 基于LoRa通信的大规模用电信息采集与传输系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(10):153-157.
[15] 金芳, 郑绪刚. 基于分布式自适应选频的舰船通信传输抗干扰技术[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(14):141-143.
[16] 张广大, 任清华, 樊志凯. 多天线中继系统中基于无线携能通信的物理层安全传输方案[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(6):1856-1865.
[17] 田世坤, 唐胜达. 衰减信道下具有严格时延的P2P实时通信传输策略[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2022, 40(6):122-130.

[J]. Electric Power Systems Research, 2023(220):109285.
[5] 卫志农, 徐昊, 陈胜, 等. 基于深度学习的直流配电网分布鲁棒优化调度方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10):87-94.
[6] 戴观权, 潘凯岩, 蔡莹, 等. 基于改进灰狼优化算法的多区域虚拟电厂协调优化调度技术[J]. 可再生能源, 2024, 42(12):1681-1688.
[7] 王大鑫, 张倩, 郑诗程, 等. 考虑碳排放流和阶梯式碳交易的配电网优化调度[J]. 可再生能源, 2024, 42(12):1661-1670.
[8] 姜河, 周航, 赵琰, 等. 计及新能源消纳与碳捕集电厂的多能源系统优化调度研究[J]. 可再生能源, 2024, 42(11):1536-1545.
[9] 周振宇, 王翌, 廖海君, 等. 电力物联网5G云-边-端协同框架与资源调度方法[J]. 电网技术, 2022, 46(5):1641-1651.
[10] 周建, 石浩, 秦铭泽, 等. 基于边缘智能技术的台区线损异常自动检测研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(8):46-49, 59.
[11] 徐展鹏, 梁远升, 李海锋, 等. 柔性互联配电网故障恢复的云边协同优化算法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18):171-184.
[12] 聂涌泉, 彭超逸, 胡亚平, 等. 基于边缘计算的高渗透率微电网并行分布式优化经济调度[J]. 南方电网技术, 2023, 17(1):114-124.
[13] 冯起, 薛喜红, 任龙, 等. 考虑云端距离的科技服务边缘计算资源均衡调度算法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(8):95-98, 104.
[14] 谢石木林, 白杰, 张翔, 等. 基于5G+MEC的电网边缘计算平台任务安全性调度方法[J]. 电信科学, 2022, 38(12):78-85.