

文章编号:1671-251X(2021)12-0068-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2021070067

三维露天矿山场景中异构分簇组网协议研究

张洪光¹, 刘亭亭¹, 吕秀莎¹, 张莹¹, 聂剑红², 李青²

(1. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876;
2. 华北科技学院 河北省矿山设备安全监测重点实验室, 河北 廊坊 065201)



扫码移动阅读

摘要:露天矿山组网是智慧矿山的基础关键技术之一,然而露天矿山通信环境复杂、多种异构节点移动性差异大,导致通信链路不稳定。针对该问题,提出了一种异构分簇组网协议(HCNP)。HCNP 支持静止太阳能 LoRa 中继设备的随时接入,可以随采矿深度的变化进行灵活布置。HCNP 应用最短路径树形成从静止设备和静止中继设备到基站的静止骨干网。HCNP 按照节点是否移动、能量是否受限、到基站的跳数和距离划分优先级,基于节点的不同优先级完成簇头选择和成簇过程,形成静止骨干网和动态分簇的异构组网模式,实现数据的可靠转发。仿真结果表明:与按需平面距离向量路由协议(AODV)、优化链路状态路由协议(OLSR)、贪婪周边无状态路由协议(GPSR)、基于节点位置的三维地理路由协议(AB3D)相比,HCNP 具有较高的成功传输率,较低的端到端时延和较低的能耗,当仿真时间和节点数量变化时,成功传输率始终高于 83%,端到端时延低于 20 ms,并且能量消耗不超过 0.66 J。这说明静止骨干网和考虑节点优先级的分簇策略适用于环境复杂的三维露天矿山,满足矿山设备和人员数量动态变化适应性的需求。

关键词:三维露天矿山;阶梯状矿坑;异构设备组网;静止骨干网;静止节点;移动节点;端到端时延;动态分簇

中图分类号:TD655 文献标志码:A

Research on heterogeneous clustering networking protocol in 3D open-pit mine scenario
ZHANG Hongguang¹, LIU Tingting¹, LYU Xiusha¹, ZHANG Ying¹, NIE Jianhong², LI Qing²
(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. Hebei Key Laboratory of Safety Monitoring of Mining Equipment, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China)

Abstract: Open-pit mine networking is one of the basic key technologies of intelligent mines. However, the complex communication environment in open-pit mines and the large mobility difference of various heterogeneous nodes lead to unstable communication links. In order to solve this problem, a heterogeneous clustering networking protocol (HCNP) is proposed. HCNP supports the access of static solar LoRa relay equipment at any time, and can be flexibly arranged with the change of mining depth. HCNP uses the shortest path tree to form a static backbone network from static devices and static relay devices to base stations. HCNP divides the priority according to whether the node moves, whether the energy is limited, the number of hops and the distance to the base station. The cluster head selection and clustering process are completed based on the different priorities of the node, and a heterogeneous networking mode of static backbone network and dynamic clustering is formed so as to realize the reliable

收稿日期:2021-07-23;修回日期:2021-10-28;责任编辑:张强。
基金项目:河北省矿山设备安全监测重点实验室开放课题(SM202003);国家自然科学基金项目(61876199)。
作者简介:张洪光(1978—),男,吉林白城人,副教授,博士,主要研究方向为智能算法与智能网络,E-mail:hongguang-zhang@bupt.edu.cn。
通信作者:聂剑红(1975—),男,湖北武汉人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为风险管控一体化,E-mail:jianhongnie@126.com。
引用格式:张洪光,刘亭亭,吕秀莎,等. 三维露天矿山场景中异构分簇组网协议研究[J]. 工矿自动化,2021,47(12):68-74.
ZHANG Hongguang,LIU Tingting,LYU Xiusha,et al. Research on heterogeneous clustering networking protocol in 3D open-pit mine scenario[J]. Industry and Mine Automation,2021,47(12):68-74.

forwarding of data. The simulation results show that compared with Ad hoc on-demand distance vector routing (AODV), optimized link state routing protocol (OLSR), greedy peripheral stateless routing protocol (GPSR), and node location-based 3D geographical routing protocol (AB3D), HCNP has higher successful transmission rate, lower end-to-end delay and lower energy consumption. When the simulation time and the number of nodes change, the successful transmission rate is always higher than 83%, the end-to-end delay is lower than 20 ms, and the energy consumption does not exceed 0.66 J. This shows that the static backbone network and the clustering strategy considering node priority are suitable for 3D open-pit mines with complex environment, and meet the requirements of dynamic adaptability of mine equipment and personnel number.

Key words: 3D open-pit mine; ladder pattern mines; heterogeneous equipment networking; static backbone network; static node; mobile node; end-to-end delay; dynamic clustering

0 引言

与地下管道状的矿井不同,露天矿山通常按照矿层厚度划分为多层,使用采矿设备自上而下逐层开采。各层工作面之间有高度差,呈现阶梯状,进而形成三维露天阶梯状矿坑结构。露天矿山通常包含3类设备:第1类设备是能量不受限的静止设备,比如基站、露天穿孔、采掘及装载设备等,这类设备通常由国家电网或柴油机供电,能量不受限。第2类设备是能量相对不受限的移动节点,比如各种露天运输设备,这类设备通常也由柴油机供电,能量相对不受限。第3类设备是能量受限的移动设备,比如移动人员便携式安全帽,这类设备通常由电池供电,能量受到电池容量约束^[1]。在复杂的矿山环境中,这些设备往往分布在各层阶梯。鉴于上述设备的多样性、异构性特点,在露天矿山中要实现数据采集、调度、监控等多设备协同工作是一项挑战。自组网为这项挑战提供了一种解决途径,通过组网的方式可实现各层节点与基站之间的通信。

根据露天矿山实际环境特点,目前所采用的组网方式如下:① 部署无线专网和无线基站来覆盖整个矿山网络,通过优化二维平面内移动节点的位置来提高通信链路质量^[2]。② 部署移动基站并结合5G技术解决露天矿山地形持续变化带来的有线设备部署困难的问题,部署移动基站既能确保网络安全,又能保证网络容量;采用5G通信技术,降低了网络延迟^[3]。③ 支持灵活、快速部署的 Mesh 或 LoRa 组网方式。在 Mesh 组网方式中,固定基站充当中继节点,移动基站负责将设备信息回传到控制中心^[4],适用于解决由矿山设备回传数据多造成的网络拥塞问题。此外,低能量自适应聚簇分层协议(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)^[5]、支持节点移动性的改进 LEACH 协议

(LEACH-Mobile)^[6]和带有缓存策略的 LEACH 中继协议(LEACH Relay with Cache Strategy, LEACH-R)^[7]等多种分簇路由协议相继被提出,以降低网络能耗。在 LoRa 组网方式中,采用线性调频扩频技术提高网络的通信覆盖范围,不存在 Mesh 组网中受限於通信距离而无法大规模组网的问题,同时 LoRa 组网还具有功耗低和抗干扰能力强等优点^[8-10],适用于设备数量多、施工环境复杂的露天矿山场景。

智慧矿山是未来矿山发展的重要方向之一,而露天矿山是与智慧矿山技术可直接对接的、最重要的应用场景。随着露天矿山设备的种类越来越多,智能化水平不断进步,现有的研究成果依然面临如下问题:① 应用场景需要扩展到三维场景。现有大多数研究考虑的是二维应用场景,其通常只能够覆盖部分三维应用,尤其是露天矿山挖掘后矿坑形状绝大部分是非规则的,有时矿坑深度达到 1 000 m 以上,这使得研究三维露天矿山应用场景非常必要。② 需要提高矿山设备的可部署性。在露天矿山中,设备部署面临一定困难,随着矿坑深度不断增加,部署移动式通信设备的布线难度、安装和施工难度不断加大,不易于形成稳定的网络链路。③ 需要重视设备数量和移动性差异。随着露天矿山采矿需求不断变化,矿坑中设备数量也会随之发生变化,而且,随着矿山设备种类不断增多,各种设备移动性差异较大,这种移动性的差异容易导致更多不稳定链路。

针对上述三维露天矿山中存在的问题,提出了一种异构分簇组网协议(Heterogeneous Clustering Networking Protocol, HCNP)。HCNP 支持 LoRa 协议栈,无需人为配置 LoRa 中继设备就可以实现静止太阳能 LoRa^[11]中继设备的随时接入。LoRa 设备具有能耗低、工作寿命长、无需布线及安装的特点,可以随采矿深度的变化进行灵活布置。HCNP

应用最短路径树,形成从静止设备和静止中继设备到基站的静止骨干网,从而有效扩展基站的覆盖范围。HCNP 按照节点是否移动、能量是否受限、到基站的跳数和距离划分优先级,基于节点的不同优先级完成簇头选择和成簇过程,形成静止骨干网和动态分簇的异构组网模式,实现数据的可靠转发。

1 网络模型

本文研究的网络为三维阶梯状网络。将三维露天矿山实际场景抽象为三维阶梯状网络,在网络中部署各类节点模拟矿山中的各种设备,并为节点设置相应的通信模型、移动模型、能耗模型。假设基站、静止节点和移动节点均支持 LoRa 协议栈,并且安装了全向天线,在各个方向具有相同的收发能力,而且具有相同的通信半径。

基站和静止节点具有固定位置,移动节点随机生成初始位置。三维露天矿山阶梯状矿坑剖面图如图 1 所示,在这个阶梯状矿坑中,位于不同层的节点具有不同的高度属性。在每层网络的二维平面上,移动节点使用随机路点移动模型^[12]。应用该移动模型,可以在仿真中生成移动设备的运动轨迹。移动节点的最小和最大速度分别设置为 15 m/s 和 20 m/s。在随机路点移动模型中,移动节点在当前位置随机选择一个目标位置和移动速度。到达目标位置后,移动节点会停留一段时间。暂停时间结束后会随机选择下一次移动的目标位置和速度。在实际场景中,移动节点(如运输设备)会在某个位置短暂停留进行装卸货操作,然后移动到下一个位置。因此,移动节点应用这种随机暂停时间和随机目的地的移动模型模拟实际露天矿山中各种移动设备的工作情况。

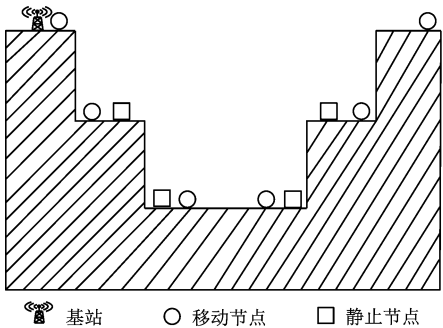


图 1 三维露天矿山阶梯状矿坑剖面图

Fig. 1 Profile of 3D open-pit ladder pattern mines

所有设备的能耗模型使用自由空间信道和多路径衰减信道,在距离 d 上发送和接收信号所需的能量公式为

$$E_{Tx} = \begin{cases} lE_{elec} + \epsilon_{fs}d^2 & d \leq d_0 \\ lE_{elec} + \epsilon_{mp}d^4 & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{Rx} = lE_{elec} \quad (2)$$

式中: E_{Tx} 、 E_{Rx} 分别为发送、接收信号所需能量; l 为发送、接收数据的大小; E_{elec} 为每发送或者接收 1 bit 数据所需能量; ϵ_{fs} 和 ϵ_{mp} 分别为自由空间信道和多路径衰减信道中电磁波传播系数; d_0 为 d 的阈值, $d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs}/\epsilon_{mp}}$,当 $d \leq d_0$ 时,使用自由空间信道,当 $d > d_0$ 时,使用多路径衰减信道。

2 HCNP 设计

HCNP 旨在保障链路稳定性,提高数据包成功传输率及优化网络端到端时延。

2.1 HCNP 框架

考虑节点优先级的 HCNP 框架如图 2 所示。

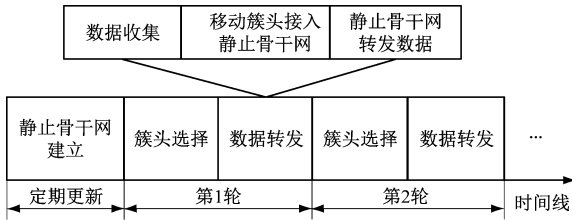


图 2 考虑节点优先级的 HCNP 框架

Fig. 2 HCNP framework considering node priority

(1) 通过广播构建静止骨干网。HCNP 支持静止太阳能 LoRa 中继设备的随时接入,因此需要静止节点定期广播以更新静止骨干网结构。

(2) 每轮分簇包括簇头选择和数据转发 2 个阶段:在簇头选择阶段,根据节点类型、节点能量和节点到基站的距离进行优先级排序,完成簇头选择。在数据转发阶段,簇头已完成簇内节点的数据收集,此时,如果簇头为静止节点,则直接通过静止骨干网发送数据到基站;反之,如果簇头为移动节点,簇头会按照最小跳数、最短距离的优先级将数据转发给静止骨干网,降低丢包率,优化端到端时延。

2.2 静止骨干网构建

通过广播和最短路径树,基站和静止节点形成静止骨干网,构建静止骨干网过程如伪码 1 所示。基站广播自己的位置信息,收到此广播的静止节点(不含移动节点)会附上自己的节点 ID、节点位置和到基站的跳数,然后继续广播此包。通过静止节点向外广播,构建静止骨干网。由于静止节点的能量不受限制,广播开销并不会影响网络寿命。在静止骨干网中,数据包会沿着到基站跳数最小(如果跳数相同,选择距离最近)的路径进行传输。

当静止骨干网建立后,静止节点和移动节点均

会维护自己的邻居信息表,见表1。

伪码 1:构建静止骨干网

输入:剩余节点集合(所有节点构成的集合)

输出:每个节点的邻居信息表、每个节点到基站的跳数

1. 基站广播

2. 遍历剩余节点集合中接收到的广播包的每一个节点

3. 如果是静止节点

4. 将广播节点插入邻居信息表,并遍历邻居信息表,找到距离基站的最小跳数,将该最小值加1作为当前节点距离基站的跳数值,然后继续广播

5. 如果是移动节点

6. 将广播节点插入邻居信息表,并遍历邻居信息表,找到距离基站的最小跳数,将该最小值加1作为当前节点距离基站的跳数值

7. 将当前节点从剩余节点集合中移除

8. 不断重复步骤2—步骤7,直至剩余节点集合中不包含静止节点

表 1 邻居信息表

Table 1 Neighbor information table

邻居节点 ID	到基站跳数	到基站距离/m	是否第 1 次收到广播
21	1	15.36	是
96	2	248.29	否
58	1	80.44	是

静止节点 A 到基站的数据传输链路如图 3 所示。移动节点不参与静止骨干网的构建,它只接收广播和维护自身的邻居信息表,因此,降低了网络拓扑动态改变与矿山开采中不确定性因素的影响。在三维露天矿山阶梯状矿坑中,建立静止骨干网具有以下优势:

(1) 简化了三维网络拓扑结构。静止骨干网将网络中的静止节点与移动节点进行网络拓扑分层管理,简化了三维网络拓扑复杂度,提高了网络管理的健壮性。

(2) 降低了端到端时延。在静止骨干网中,静止节点 A 会选择到基站为 2 跳的通信链路 I,而不会选择到基站为 3 跳的通信链路 II 进行数据转发。通过选择最短路径的通信链路,降低了平均端到端时延。

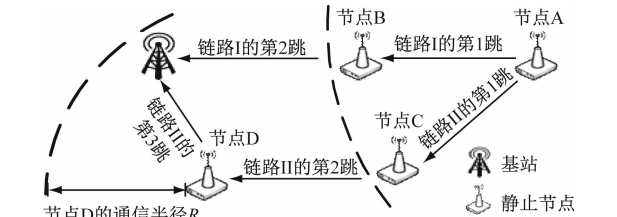


图 3 静止节点 A 到基站的数据传输链路

Fig. 3 Data transmission link from static node A to base station

(3) 提高了网络吞吐量。静止骨干网扩展了基站通信覆盖范围,提高了通信链路的稳定性,从而保障了数据包的可达性和网络的吞吐量。

2.3 簇头选择

HCNP 根据节点类型、节点能量和节点到基站的距离的优先级顺序进行簇头选择,见表 2。簇头选择及成簇过程如伪码 2 和图 4 所示。

表 2 簇头选择优先级

Table 2 Cluster head selection priority

节点类型	能量	位置	跳数	优先级
静止节点	太阳能	靠近基站	少	最高
		远离基站	多	较高
能量不受限移动节点	柴油发电机	靠近基站	少	高
		远离基站	多	低
能量受限移动节点	电池	靠近基站	少	较低
		远离基站	多	最低

伪码 2:簇头选择和成簇过程

输入:剩余节点集合(所有节点构成的集合)

输出:成簇结果

1. 剩余节点集合中所有静止节点广播自身为簇头的身份信息,并将自身从剩余节点集合中移除

2. 收到广播的未成簇节点根据邻居信息表查找到基站跳数最小(最小跳数相等时选择到基站距离最近)的静止节点,并向其发送加入请求

3. 收到加入请求的静止节点回复确认消息和进行成簇,并将发送请求节点从剩余节点集合中移除

4. 剩余节点集合中所有能量不受限的移动节点广播自身为簇头的身份信息及到基站的跳数、距离,并将自身从剩余节点集合中移除

5. 收到广播的未成簇节点选择到基站跳数最小(最小跳数相等时选择到基站距离最近)的簇头节点并发送加入请求

6. 收到加入请求的能量不受限移动节点回复确认消息和进行成簇,并将发送请求节点从剩余节点集合中移除

7. 剩余节点集合中所有能量受限的移动节点广播自身剩余能量信息

8. 剩余节点集合中的节点收到广播后建立能量表存储邻居能量

9. 遍历剩余节点集合中的每一个节点

10. 计算当前节点能量表内所有节点的平均剩余能量

11. 如果当前节点的剩余能量大于平均剩余能量,广播自身为簇头节点的身份信息及到基站的跳数、距离,并将自身从剩余节点集合中移除

12. 收到广播的节点选择到基站跳数最小(最小跳数相等时选择到基站距离最近)的簇头节点并发送加入请求

13. 收到加入请求的能量受限移动节点回复确认消息和进行成簇,并将该节点从剩余节点集合中移除

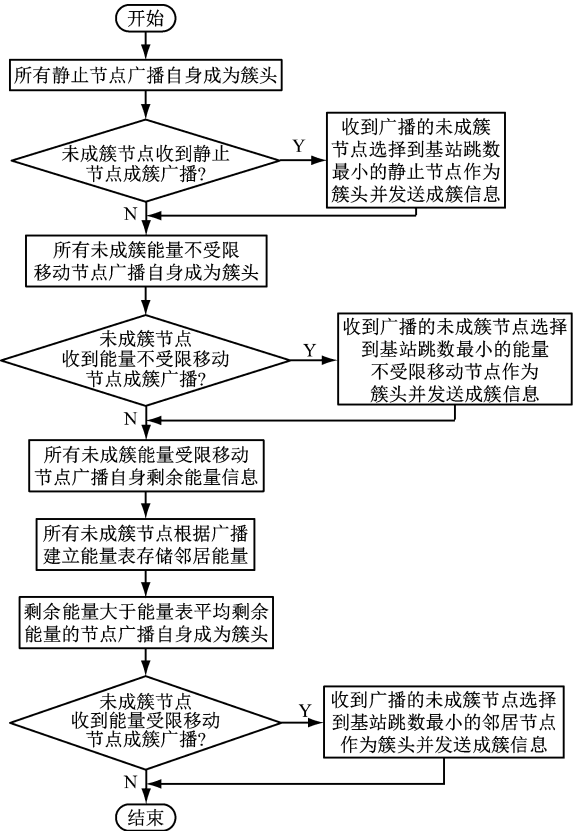


图 4 簇头选择和成簇过程

Fig. 4 Cluster head selection and clustering process

- (1) 在节点类型上, 优先选择静止节点, 而不是移动节点作为簇头, 这能够提高数据包可达率。
- (2) 在节点能量上, 优先选择能量不受限的, 然后选择剩余能量高的节点, 有利于提高能量受限的移动节点寿命。
- (3) 在位置和跳数上, 优先选择到基站跳数少、距离更近的节点作为簇头。簇头选择方式决定了成员节点可以与簇头直接进行通信。在此基础上优先选择到基站跳数少、距离更近的节点作为簇头, 可以降低数据包传输到基站过程中的能量消耗。

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真环境及参数设置

利用 NS-3 网络仿真工具对 HCNP 在成功传输率、端到端时延、能量消耗方面的性能进行对比和分析。在 NS-3 仿真中, 为所有节点分配具有高度属性的位置参数, 模拟三维的三层阶梯状矿坑网络, 如图 5 所示。共设置 4 种对比协议: 按需平面距离向量路由协议 (AODV)^[13] 和优化链路状态路由协议 (OLSR)^[14], 这 2 种经典路由协议不仅可用于二维场景, 而且可以用于三维场景; 贪婪周边无状态路由协议 (GPSR)^[15] 和基于节点位置的三维地理路由协议 (AB3D)^[16] 是地理路由协议的代表。

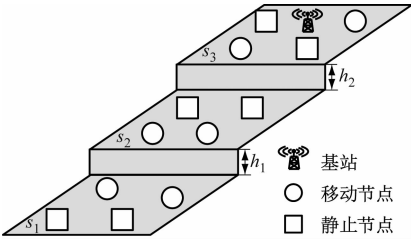


图 5 三维露天矿山阶梯状矿坑网络

Fig. 5 3D open-pit ladder pattern mines network

网络和场景仿真参数设计见表 3。首先设置了网络参数, 即基站与所有节点的通信半径均为 225 m, 网络中传输的数据包大小均为 512 byte。其次, 给出了能耗模型 (式 (1) 和式 (2)) 中的各项参数。然后, 设置了每层网络空间大小以及层与层之间的高度差, 这些三维场景仿真参数与图 5 所示场景一致。最后, 给出了网络中 3 类节点的数量。

表 3 网络和场景仿真参数

Table 3 Network and scenario simulation parameters

网络参数	数值	场景参数	数值
通信半径/m	225	第 1 层尺寸 s_1	500 m×500 m
数据包大小/byte	512	第 2 层尺寸 s_2	1 000 m×500 m
初始能量/J	10	第 3 层尺寸 s_3	1 500 m×500 m
$E_{elec}/(nJ \cdot bit^{-1})$	50	层间高度差 $h_1, h_2/m$	10
$\epsilon_{fs}/(pJ \cdot bit^{-1} \cdot m^{-2})$	10	静止节点个数	30
$\epsilon_{mp}/(pJ \cdot bit^{-1} \cdot m^{-4})$	0.001 3	能量受限	60
移动模型	随机路	移动节点个数	30
	点模型	能量不受限	

3.2 仿真时间对网络性能的影响

改变仿真时间可以用来探究 HCNP 在工作过程中的有效性, 仿真时间变化对网络性能的影响如图 6 所示。从图 6(a)可看出, HCNP 具有较高的成功传输率, 最高成功传输率达到了 86.86%。相比于 GPSR, HCNP 的成功传输率提高了 68.8%, 性能明显优于所有对比协议, 原因是 HCNP 中静止节点与基站建立的静止骨干网保证了数据包的可靠传输。从图 6(b)可看出, HCNP 端到端时延始终最低, 为 13.22~14.04 ms。仿真时间为 200 s 时, GPSR 的时延结果与 HCNP 接近, 然而随着仿真时间的增加, GPSR 的时延逐渐增加。相比于 4 种对比协议, HCNP 能够保持稳定的低时延, 这得益于 HCNP 使用最短路径树来选择到基站最短的通信链路, 降低了数据包在多跳传输过程中的网络时延。从图 6(c)可看出, HCNP 的能量消耗为 0.16~0.66 J, 在所有结果中都低于其他 4 种对比协议。此外, HCNP 能耗增加的斜率也最小, 这是因为 HCNP 采用了考虑节点优先级的分簇策略。簇头

将簇成员的数据包统一传输,从而降低了网络的能量消耗。综上所述,HCNP在三维阶梯状网络中性

能优异,兼顾了高成功传输率、低时延和节能的需求,符合在露天矿山实际环境中的应用需求。

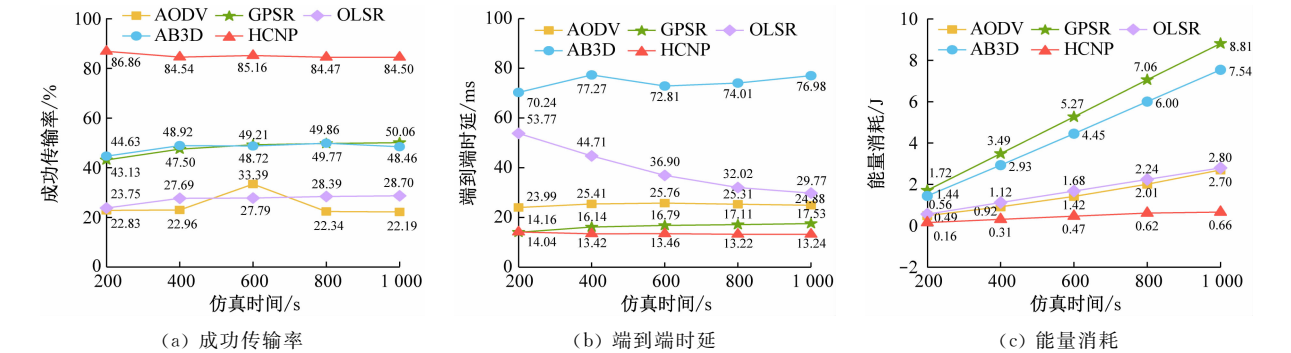


图6 仿真时间对网络性能的影响
Fig. 6 Effect of simulation time on network performance

3.3 节点数量对网络性能的影响

在实际工作场景中,随着采矿工作的不断推进,露天矿山设备和工作人员的数量将不断增加,这可对应于仿真中节点数量的不断增多。节点数量变化对网络性能的影响如图7所示。从图7(a)可看出,随着节点数量的增加,HCNP的成功传输率保持在83%以上,几乎不受节点数量变化的影响。而在节点数量较少时表现较好的AODV、GPSR和AB3D协议的成功传输率随着节点数量的增加都有不同程度的下降。这说明静止骨干网的建立能够很好地对抗节点数量的变化,始终维持通信链路的稳定。从图7(b)可看出,节点数量的增加使5种协议的端到端时延均增大,这是因为节点数量的增加导致了数

据包传输到基站所经历的跳数增多。然而,HCNP的端到端时延始终优于所有对比协议,这证明了由最短路径树建立静止骨干网的有效性。从图7(c)可看出,在节点数量变化过程中,HCNP的能量消耗始终保持稳定,为0.39~0.48 J,并且始终低于所有的对比协议。这是因为分簇策略提高了数据包传输的能量效率,同时能量受限节点竞选簇头的优先级较低,避免了簇头节点由于传输大量数据包而过早死亡,保障了分簇策略的可持续性。综上所述,HCNP不仅能够适应节点稀疏的网络环境,还能够适应规模相对较大的网络环境。因此,能够满足网络对露天矿山设备和人员数量动态变化适应性的需求。

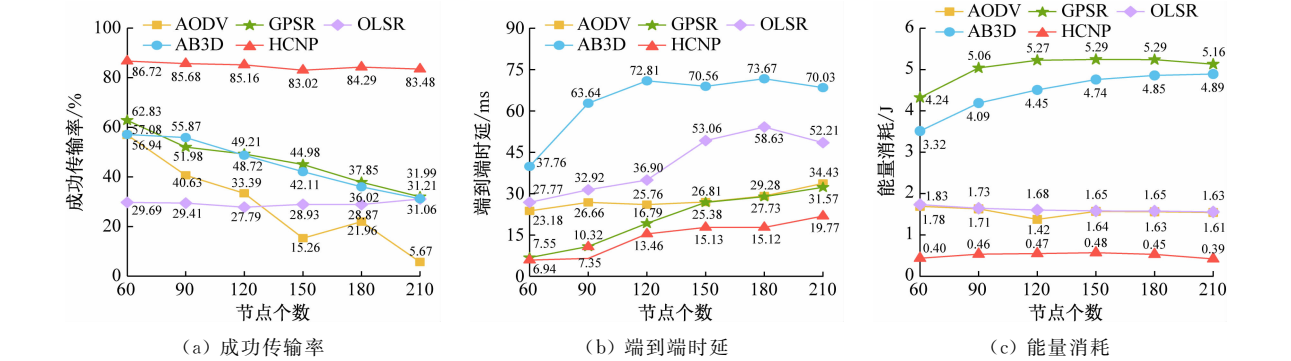


图7 节点数量对网络性能的影响
Fig. 7 Effect of node number on network performance

4 结论

(1) 结合三维露天矿山阶梯状矿坑的实际需求,考虑露天矿山设备的多样性、异构性特点,提出了一种HCNP。HCNP可支持静止太阳能LoRa中继设备的随时接入,有效地支持了不断变化的露天矿山采矿需求,比如开采位置及方向调整导致的设备及人员变动。HCNP应用最短路径树构建了静止骨干网,考虑异构节点移动性、能量、到基站跳数等因素,基于节点优先级选择簇头。这使得HCNP

可以在通信方面长期有效地支持露天矿大型设备、矿车、人员的闭环管理,推动智慧矿山发展。
(2) 使用NS-3网络模拟器对比HCNP与4种对比协议的性能。与AODV、OLSR、GPSR、AB3D相比,HCNP具有较高的成功传输率、较低的端到端时延和较低的能耗。当仿真时间和节点数量变化时,HCNP成功传输率始终高于83%,端到端时延低于20 ms,并且能量消耗不超过0.66 J。这表明静止骨干网和考虑节点优先级的分簇策略适用于环境复杂的三维露天矿山,满足矿山设备和人员数量

动态变化适应性的需求。

(3) 与同类的 ZigBee、NBloT 等技术相比, LoRa 具有低速率、多连接、抗干扰的优点。而且, LoRa 基站不需要接入移动核心网, 数据隐私性比较好, 适合三维露天矿山的低速率数据传输。但是, 基于 LoRa 技术的自组网协议并不适用于智慧矿山的高速率视频监测传输。在这类协议中, 节点发送的广播和数据包会在三维露天矿坑中形成较强的多径反射和干扰, 这些多径干扰会影响信道稳定性。针对三维露天矿山的高速率自组网应用场景, 基站按需下发传输指令, 让节点受控地分批或分时传输视频监测数据, 这可以有效降低三维露天矿坑中的多径干扰, 保证信道稳定性, 这种受控模式下的视频传输方案是可行的。在今后的研究中, 将研究基于自组网的受控模式下的视频监测传输协议。

参考文献 (References):

[1] 祁浩. 露天采矿技术及其采矿设备的发展思考[J]. 设备管理与维修, 2020(14): 7-9.
QI Hao. Development of open pit mining technology and mining equipment [J]. Plant Maintenance Engineering, 2020(14): 7-9.

[2] 王凤舞. 智慧矿山中无线网络节点部署方案研究[J]. 世界有色金属, 2019(18): 30.
WANG Fengwu. Research on deployment scheme of wireless network node in intelligent mine[J]. World Nonferrous Metals, 2019(18): 30.

[3] 龙永祥, 王健. 露天煤矿网络发展与智慧矿山建设的关系[J]. 露天采矿技术, 2020, 35(1): 119-121.
LONG Yongxiang, WANG Jian. Relationship between network development and construction of intelligent mine in open-pit coal mine [J]. Opencast Mining Technology, 2020, 35(1): 119-121.

[4] 张国祥, 崔凤, 胡国华. Mesh 网络技术在露天矿山调度系统的应用[J]. 包钢科技, 2014, 40(6): 64-66.
ZHANG Guoxiang, CUI Feng, HU Guohua. Applications of Mesh network technology in dispatching system of open-pit mine[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2014, 40(6): 64-66.

[5] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, 2000: 1-10.

[6] KIM D S, CHUNG Y J. Self-organization routing protocol supporting mobile nodes for wireless sensor

network [C]//First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences, Hangzhou, 2006: 622-626.

[7] ZHANG Ying, LIU Tingting, ZHANG Hongguang, et al. LEACH-R: leach relay with cache strategy for mobile robot swarms [J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2021, 10(2): 406-410.

[8] 周德胜. 基于 LoRa 的矿用无线通信系统设计[J]. 煤矿安全, 2021, 52(4): 170-173.
ZHOU Desheng. Design of mine wireless communication system based on LoRa technology[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(4): 170-173.

[9] 霍振龙. LoRa 技术在矿井无线通信中的应用分析[J]. 工矿自动化, 2017, 43(10): 34-37.
HUO Zhenlong. Application analysis of LoRa technology in mine wireless communication [J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(10): 34-37.

[10] 陈晓晶. LoRa 组网技术在胶带运输监控系统中的应用研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(4): 91-97.
CHEN Xiaojing. Research on application of LoRa networking technology in belt conveyor transportation monitoring system [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(4): 91-97.

[11] 陈锦铭, 栾静. 基于 LoRa 技术的低功耗广域网通信应用设计[J]. 信息技术, 2021(4): 59-63.
CHEN Jinming, LUAN Jing. The LoRa application design of LPWAN technology [J]. Information Technology, 2021(4): 59-63.

[12] CAMP T, BOLENG J, DAVIES V, et al. A survey of mobility models for ad hoc network research [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2002, 2(5): 483-502.

[13] PERKINS C E, ROYER E M. Ad-hoc on-demand distance vector routing [C]//Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, Los Angeles, 1999: 90-100.

[14] JACQUET P, MUHLETHALER T, CLAUSEN T, et al. Optimized link state routing protocol [C]//IEEE International Multi Topic Conference, Lahore, Pakistan, 2001: 62-68.

[15] FU Junsong, CUI Baojiang, WANG Na, et al. A distributed position-based routing algorithm in 3-D wireless industrial Internet of things [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(10): 5664-5673.

[16] ABDALLAH A E, FEVENS T, OPATRNY J. High delivery rate position-based routing algorithms for 3D ad hoc networks [J]. Computer communications, 2008, 31(4): 807-817.