



文章编号:1671-251X(2020)04-0091-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019090038

LoRa 组网技术在胶带运输监控系统中的应用研究

陈晓晶^{1,2}

- (1. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015;
2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015)



扫码移动阅读

摘要:针对胶带运输监控系统缺少无线数据传输通道,无法实现断线后自诊断信息上传、无线传感器接入、断线应急中继通信功能等问题,提出了一种应用于胶带运输监控系统的 LoRa 无线组网技术方案。针对链式组网结构比较适合胶带运输监控系统多点延伸的特点,采用了 LoRa 链式组网模式。根据 LoRa 链式组网传输模式的要求,确定了节点间的数据访问关系,将主机节点与子节点设计为一主多从的传输方式,节点根据相邻关系进行路由规划,组成单层链式网络。为满足数据传输需求,采用巡检应答式通信机制,通信过程遵循规则时序,信道通过时分进行有序利用。根据上述方案,给出了用于胶带运输监控系统的 LoRa 无线组网传输节点设备软硬件设计,并进行了测试,结果表明:LoRa 链式组网模式传输性能可靠稳定,无线发送状态的节点功耗小于 300 mW,10 个节点组网传输时延为 1.12 s,丢包率小于 0.6%,可满足胶带运输监控系统对无线组网传输功能的需求。

关键词:带式输送机;胶带运输监控系统;LoRa 技术;无线通信;链式组网模式;巡检应答式通信机制
中图分类号:TD634 文献标志码:A

Research on application of LoRa networking technology in belt conveyor transportation monitoring system

CHEN Xiaojing^{1,2}

- (1. CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China;
2. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: In view of the lack of wireless data transmission channel in belt transportation monitoring system, it is impossible to realize functions of self-diagnosis information upload after disconnection, wireless sensor access and emergency relay communication after disconnection, a LoRa wireless networking technology scheme applied to belt conveyor transportation monitoring system was proposed. In view of characteristics that chain networking structure is more suitable for multi-point extension of belt conveyor transportation monitoring system, LoRa chain networking mode is adopted. According to requirements of LoRa chain networking transmission mode, data access relationship between nodes is determined, the host node and the child node are designed as a master multi-slave transmission method, the node is routed according to adjacent relationship, so as to form single-layer chain network. In order to meet demand of data transmission, the communication mechanism of patrol inspection and response is adopted. The communication process follows regular time sequence, and the channel is used in an orderly manner.

收稿日期:2019-09-12;修回日期:2020-01-19;责任编辑:张强。

基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项青年项目(2018-TD-QN011)。

作者简介:陈晓晶(1981—),男,江苏如东人,高级工程师,主要研究方向为煤矿自动化、数字化、智能化技术、煤矿工业控制、物联网技术等,
E-mail:chxjme@163.com。

引用格式: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.

According to the above scheme, hardware and software design of LoRa wireless networking transmission node for belt conveyor transportation monitoring system are presented and tested. The test results show that the transmission performance of LoRa chain networking mode is reliable and stable, the power consumption of nodes in wireless transmission state is less than 300 mW, the transmission delay of 10 nodes is 1.12 s, and the packet loss rate is less than 0.6%, which can meet requirements of belt conveyor transportation monitoring system for wireless networking transmission function.

Key words: belt conveyor; belt conveyor transportation monitoring system; LoRa technology; wireless communication; chain networking mode; inspection and response communication mechanism

0 引言

煤矿带式输送机一般配备有胶带运输监控系统对其运行状态进行监测并提供保护控制^[1]。现有的胶带运输监控系统通信主要依靠有线传输方式,包括 IO 控制信号、现场总线、工业以太网等^[2],线路延伸距离长,在煤矿井下环境中线路经常损坏,导致断线后自诊断数据无法上传,人工排查故障困难,缺少后备的应急通信手段^[3]。对带式输送机的关键部件进行监测,系统需要接入多种传感器,有线连接的传感器在使用时存在诸多缺点,如抗损性差、成本高、安装维护困难等^[4-5]。因此,需要引入一种便捷、高效、适合矿井环境的无线通信技术,弥补有线通信方式的不足^[1]。目前,无线通信技术在胶带运输监控系统中的应用主要以 WiFi、ZigBee 等传统无线通信技术为主,这些技术主要用作手持移动巡检或遥控终端的接入,没有扩展复杂应用^[6]。因受传输距离较近、参数配置不灵活等的限制,WiFi、ZigBee 等技术很难实现覆盖胶带运输监控系统的精简无线组网传输,现有的无线组网传输方案需要依靠有线串接的无线网关设备作为终端接入点,无法彻底摆脱对有线传输方式的依赖^[7]。LoRa 技术是一种近几年发展起来的低功耗广域网技术,具备远距离、低功耗、低速率、低成本、可大规模组网的特性^[8]。相较传统的物联网无线通信技术,LoRa 技术更适合低速率中远距离组网传输,在矿井相关的运输巷、工作面等场合和矿压、设备监测等系统中具有较好的应用前景^[9]。为此,本文提出了一种应用于胶带运输监控系统的 LoRa 无线组网技术方案,可实现胶带运输监控系统断线后自诊断数据无线上传、无线传感器接入和应急中继通信等功能,提高系统断线故障发生时的排查效率,借助无线中继跳接实现应急通信,提高了系统的可靠性、灵活性、扩展性。

1 LoRa 技术

LoRa 技术由 Semtech 公司在 2013 年发布,是一种基于线性扩频调制的通信技术,它延续了频移键控调制的低功耗特征,同时增加了通信距离,提高

了抗多径、抗干扰能力^[10]。通过对 LoRa 技术关键特点的分析,发现其对矿井环境具有较强的适应性。LoRa 技术的特点及优势见表 1。

表 1 LoRa 技术的特点及优势

Table 1 Characteristics and advantages of LoRa technology

关键特点	技术优势
高链路预算	传输距离远
Sub-GHz 频段	
线性扩频调频、前向纠错	传输稳定可靠,信道容量充足,抗干扰能力强
多种组网方式	适合不同矿井应用场景
拓扑结构简单	易于建设和部署,降低了矿井系统、设备的实施难度
休眠和接收电流低	功耗低,电池供电工作时间长,产品维护工作量少
非授权频段网络架构,成本低	成本低,与矿井 3G、4G、WiFi 等无线网络没有冲突

LoRa 技术除了在关键特点上具备诸多优势外,还具有很强的设计灵活性。LoRa 可选的工作频段覆盖 150~960 Hz 频率范围,支持全球主要的 Sub-GHz ISM 频段。LoRa 技术具备很强的可调节性,可配置 4 个物理层的主要参数,参数值可根据 LoRa 设备的部署方案选取,这些参数的组合超过 6 000 多种^[11]。通过对主要参数的调整优化,可以最大限度满足不同应用场景对传输距离、速率、功耗、时延、稳定性的设计要求。LoRa 技术架构开放,可以更方便地设计特殊工作模式。

2 LoRa 链式组网传输设计

2.1 系统拓扑结构分析

胶带运输监控系统采用全分布式控制结构,设备间采用多芯屏蔽电缆连接,采用现场总线技术建立有线传输通道。主机与闭锁装置、各类传感器进行通信,实现急停闭锁、打滑(超速)、跑偏、断带、纵撕、堆煤等多项异常保护功能^[12]。同时主机将井下控制、保护信息上传到地面集控中心,并实现地面远程控制,提高设备运行效率,降低能耗。

胶带运输监控系统设计覆盖带式输送机沿线,

主要设备从机头位置的主机向后延伸,沿带式输送机呈线性分布,每间隔 200 m 设计有语音闭锁装置,2 个语音闭锁装置中间设有急停闭锁装置。

将系统中设备的线性分布结构映射到无线网络的拓扑结构,控制主机上设计主机节点作为无线网络的中心网关,系统沿线的语音闭锁装置中设计组网传输的子节点,节点最远间隔为 200 m,按照胶带运输监控系统单组长度 2 km 设计,子节点数量为 10 个。网络节点的拓扑结构如图 1 所示。



图 1 网络节点的拓扑结构

Fig. 1 Topology of network nodes

2.2 组网传输的设计要求

- (1) 单组胶带运输监控系统的延伸距离可达 2 km,节点设备多,空间分布结构呈线性特征,主干设备节点间距统一,节点设备一致性高、分布均匀,组网方式和传输模式需要适应节点分布特征。
- (2) 组网传输主要用于系统节点自诊断数据和接入的无线传感器数据的传输,急停、闭锁等时效性要求高、涉及保护功能的信息通过有线方式传输。
- (3) 为保证采用电池供电的无线传感器的工作时长,需要尽可能降低传感器功耗,要求组网传输技术具备低功耗特性。
- (4) 应急中继通信状态下,对中继节点的无线通信数据速率、传输时延都有更高的要求。断点两侧的无线中继节点可切换到高速率传输,以满足应急通信需求。
- (5) 应用环境中存在电磁干扰和多径干扰等影响因素,需要考虑无线技术的抗干扰能力设计。

无线组网传输指标的具体要求见表 2。

表 2 无线组网传输指标要求

Table 2 Requirements for transmission indicators of wireless networking

无线传输指标	性能要求
传输速率	组网传输速率为 1~10 kbit/s 应急中继通信速率为 10~30 kbit/s
组网方式	链式跳接为主的组网方式
组网传输距离	组网覆盖范围可达 2 km 以上
组网传输延时	不大于 3 s
组网节点数据量	2~10 byte
组网节点容量	单个网络组不少于 10 个节点
功耗	低功耗,兼容电池供电模式
稳定性	抗干扰能力强,适合矿井环境
适应性	网络参数具备较强的可调性

2.3 链式组网模式

结合系统的拓扑结构、组网传输功能与性能的设计要求分析,对多种组网传输方式进行了对比研究。Mesh 组网跳接路径多变、规划管理复杂,多节点经多跳并发上报信息时延较长。在巷道环境下,星形组网存在空间分布结构的劣势,无法满足延伸距离的需求。相较于传统的 Mesh 和星形组网方式,链式组网可以支持更多的线性数据跳接扩展,具有更强的距离延伸性。相同传输距离,链式组网需要更多的跳接次数,但是协调、均衡的网络结构和传输机制可以降低节点间的传输差异和参数适配的复杂度,获取更好的适用性和整体效率。可见,链式组网结构在胶带运输监控系统这样线性多点延伸的应用场景中具有明显优势,如果结合特定传输机制,可以保证较高的传输效率,满足应用要求。因此,本文选用 LoRa 链式组网模式。

LoRa 链式组网模式具备以下功能:

- (1) 主机节点可实现对规划网络内所有子节点的通信覆盖,同时主机节点作为网关,可实现网络与其他网络的数据交互。
- (2) 信息在子节点中按照路由规则跳接传输,可实现沿规划路径向下一节点的数据转发和对上一节点数据的前向应答。
- (3) 子节点在要求的时间间隔内更新并上传状态信息,保证系统故障发生和恢复时实现状态快速反馈。
- (4) 默认状态下,无线网络工作在低功耗模式,以降低带式输送机沿线设备的功耗。
- (5) 应急通信启用模式下可以调整断点两侧节点的配置参数,切换到高速应急中继通信状态。

根据链式组网传输模式的要求,确定了节点间的数据访问关系,将主机节点与子节点设计为一主多从的传输方法。LoRa 链式网络根据相邻关系进行路由规划,组成单层链式网络。LoRa 链式网络内,通过指定路由转发规则实现网络中数据的传输和应答^[13]。LoRa 链式组网的传输方法如图 2 所示。

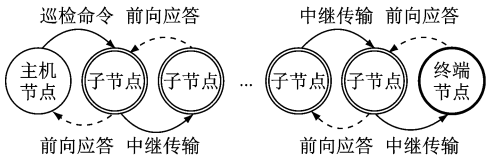


图 2 LoRa 链式组网的传输方法

Fig. 2 Transmission method of LoRa chain networking

2.4 链式组网通信机制

基于所采用的链式组网模式,设计了巡检应答式的通信机制,以满足数据传输需求。LoRa 巡检应答式的通信机制遵循规则的通信时序安排,通过

时分将信道进行了有序利用。LoRa 主机节点发送无线巡检帧,巡检帧经子节点顺序跳接传输到终端节点。终端节点发起应答流程,应答帧经子节点顺序跳接回传到主机节点。为保证更高的传输效率,数据传输采用可变长度的数据帧格式^[14],每个中继节点在转发报文时,根据协议在帧数据区域加载本节点信息,同时更新帧头部分的数据区字节长度信息。LoRa 链式组网的应答帧格式如图 3 所示。

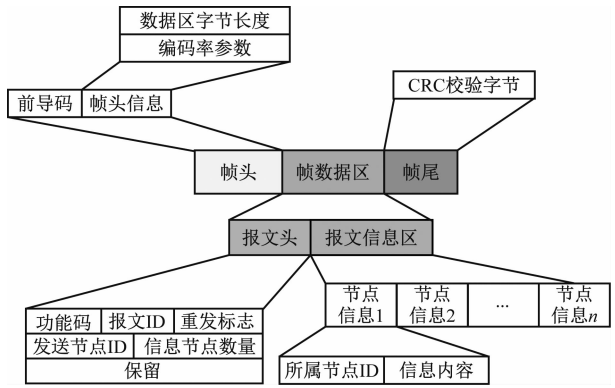


图 3 LoRa 链式组网的应答帧格式
Fig. 3 Acknowledgement frame format of LoRa chain networking

LoRa 节点会按照自身所处网络拓扑位置进行异常判断,下级节点发送的续传数据也是对本节点的应答,本节点应答数据接收超时后,触发数据重传,多次重传失败后,将下一节点判定为掉线,并尝试连接更下一级的节点,进行网络修复。网络修复失败后,当前 LoRa 节点转换为终端节点。主机 LoRa 节点接收到异常信息后启动检查流程,尝试对网络进行诊断和重构。主机上报异常信息,同时维持当前可用节点的正常连接^[15-16]。

主机节点对网络内节点的管理功能是通过发送控制命令来实现的。控制命令发送流程与巡检命令的流程相似,子节点接收到控制命令后,先将控制命令转发出去,接收到下一节点的转发数据后再更改本节点的网络参数。节点发送控制命令时,均采用连续 2 次发送的方法,以提高传输可靠性。若某一节点出现网络参数调整失败,尝试重复多次发送,一旦触发延时保护机制,各网络节点将自发回退到原来的网络配置。

2.5 LoRa 参数研究

LoRa 技术主要工作在 Sub-GHz 频域范围,可选择常规的 433、915 MHz 的 ISM 频段。考虑到煤矿井下环境的特殊性,对频段选择进行了对比研究。通过 Matlab 构建了一个宽为 4.5 m、高为 3 m 的典型胶带运输巷传输信道模型,仿真 433 MHz 和 915 MHz 频段水平和垂直方向极化波空间传导的大尺度衰落情况,仿真结果如图 4 所示。图中 Ev

表示垂直极化波仿真结果,Eh 表示水平极化波仿真结果。从图 4 可知,915 MHz 频段的传输衰减低于 433 MHz 频段,因此,针对 LoRa 技术在矿井环境中的应用,选取了 915 MHz 工作频段,以获得更远的可靠传输距离。

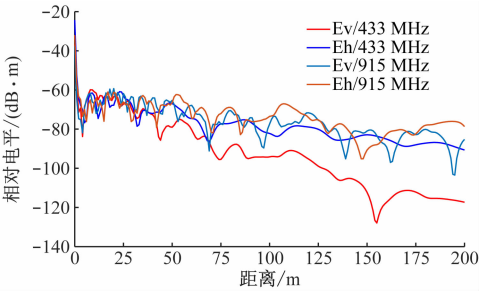


图 4 不同频率和极化方向的接收电平随传输距离的变化曲线
Fig. 4 Change curves of reception level at different frequencies and polarization directions with transmission distance

LoRa 的数据传输速率 D 的计算公式如下^[17]：

$$D = S(B/2^S)C \tag{1}$$

式中： S 为扩频因子； B 为带宽； C 为编码率。

S, B, C 是影响 LoRa 传输性能的 3 个重要可选参数。 $S \in [7, 12]$, D 与 S 成反比关系, S 加 1, D 会降低到原来的 $S/(2S-1)$, 但接收信噪比要求降低 2.5 dB, 接收抗噪能力增强^[18-19]。相同数据传输速率情况下, 高带宽可以增强抗干扰能力, 低带宽可以拥有更好的接收灵敏度。数据传输速率的增加, 会降低传输的链路裕度, 从而影响传输距离, 应用中需要在数据传输速率、链路裕度、抗干扰能力之间进行权衡。

设计中考虑到系统数据传输速率和时延控制要求较高, 选择了 250 kHz 或 500 kHz 的较大频带宽度参数, 再根据 D 选择 S 值。同时选择和使用较高的编码率, 以保障较高的数据传输速率。

2.6 抗干扰设计

巷道空间中存在胶带支架、水管、巡检人员等, 会对无线信号的传输造成遮挡, 也会增加多径干扰。LoRa 的 Sub-GHz 频段绕射性能优于传统的 2.4 GHz 频段, 且扩频调制方式抗多径干扰能力更强。但为了保证传输可靠性, 实际应用中在接收侧需要预留一定的功率裕度。

变频器、电动机在一定的频谱范围内会产生较强的电磁干扰, 但随着频率的升高, 高次谐波的能量减小, 电磁辐射干扰会减弱。变频器的电磁辐射干扰在小于 200 MHz 的频带内强度较大, 电动机的电磁辐射干扰则集中在小于 10 MHz 的频带内, 应用中应尽量避免干扰源, 选择远高于 200 MHz 的频段。

3 技术实现

3.1 硬件实现

结合胶带运输监控系统的现有接口条件和组网传输要求,设计了用于胶带运输监控系统的 LoRa 无线组网传输节点设备,LoRa 节点设备基于 MKL15 系列低功耗 MCU 控制器,集成了 LoRa 无线通信接口、RS232 通信接口、锂电池充放电等功能电路,后备电池可以在断电情况下维持正常的无线通信功能。LoRa 模块的配置管理、收发控制等功能均在 MCU 控制器上编程实现。硬件设计方案如图 5 所示。

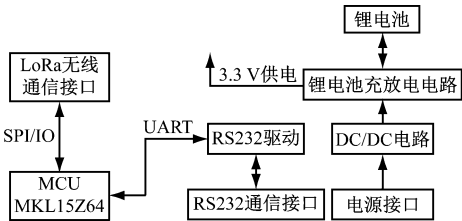


图 5 LoRa 节点设备硬件

Fig. 5 Hardware of LoRa node device

核心的 LoRa 无线通信接口电路基于 SX1262 芯片设计,SX1262 芯片是最新一代的 LoRa 芯片组产品,最大射频发送功率可达 $22\text{ dB}\cdot\text{m}$,支持 $150\sim 960\text{ MHz}$ 范围内 Sub-GHz 的 ISM 频段。射频开关选用了 PE4259,插入损耗为 0.35 dB ,射频隔离为 30 dB ,切换时间为 $1.5\text{ }\mu\text{s}$ 。LoRa 芯片通过 SPI 接口与 MCU 控制器进行通信,MCU 控制 LoRa 芯片进行配置和数据收发,完成相关的无线通信功能。基于 SX1262 芯片的 LoRa 无线通信接口电路如图 6 所示^[13]。

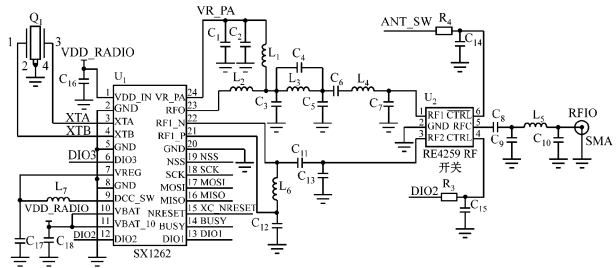


图 6 基于 SX1262 芯片的 LoRa 无线通信接口电路

Fig. 6 LoRa wireless communication interface circuit based on SX1262

3.2 软件实现

在 LoRa 无线组网节点设备的 MCU 控制器内实现组网传输技术的软件功能。无线节点启动后,首先完成硬件接口的初始化,然后配置 LoRa 相关参数,设置 LoRa 节点工作在低速监测模式。主机 LoRa 节点发起网络访问,查询网络内节点数量和信号情况,判断网络内节点在线的数量和质量,如网

络存在连接不良,则通过约定的协议进行网络优化,再次监测节点数量和信号质量,达到最优的传输效果。

网络状态调整完成后,由主机 LoRa 节点发起组网传输。主机可控制网络切换到应急中继通信状态,该模式一旦触发,主机按照应急通信的要求控制修改网络内断点两侧节点的参数,通过两节点实现应急通信。网络调整完成后,除中继节点外,其他节点还是采用巡检应答的数据传输机制。LoRa 组网传输软件流程如图 7 所示。

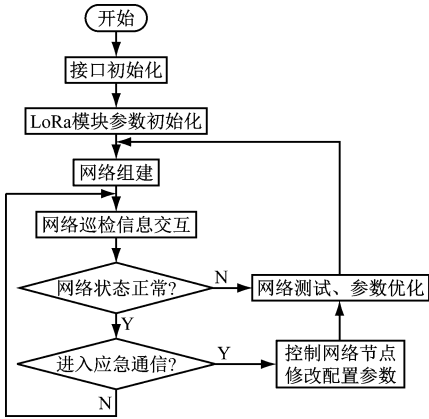


图 7 LoRa 组网传输软件流程

Fig. 7 Software flow of LoRa networking transmission

4 测试验证分析

依托 LoRa 组网传输设备对 LoRa 链式组网的传输性能进行测试,在不同的网络参数配置下测试与实际应用密切相关的功耗和时延情况。通过分析测试的结果对 LoRa 链式组网传输技术进行验证。

4.1 节点功耗测试分析

对 LoRa 节点设备进行功耗测定,对比测试了不同发射功率条件下 LoRa 节点设备数据发送功耗,见表 3。

表 3 不同发射功率条件下 LoRa 节点设备数据发送功耗
Table 3 Power consumption of LoRa node device sending data at different emission power conditions

实验序号	射频发射功率/(dB·m)	设备数据发送功耗/mW
0	1	143
1	2	156
2	3	178
3	8	208
4	11	246
5	14	294
6	17	351
7	20	411

由表 3 可知,节点设备发送功耗随射频发射功率的增大而增大。序号为 4—7 的实验数据显示,射频发射功率增加 3 dB·m,设备数据发送功耗的增长率小于 20%,远低于射频发射功率约为 100% 的增长率,因此,应尽量选择更高的射频发射功率。

在多个不同类型的带式输送机沿线环境进行 2 个节点间距为 300 m 的组网通信测试,结果表明,发射功率在 8 dB·m 以上可保证 20 kbit/s 无线空口速率下的数据可靠传输。

考虑到带式输送机沿线设备的供电限制要求,在 LoRa 组网传输模式下,无线发送状态的节点功耗应该控制在 300 mW 以内,相应的发射功率应不大于 14 dB·m,并在此功率限制条件下,进行了后续相关传输性能的研究。

4.2 节点间传输时延测试分析

LoRa 节点之间的传输时延由空中时间(Time on Air, ToA)和 MCU 控制器处理时延决定,ToA 值主要取决于无线空口速率和帧长度,每一帧包含固定长度的帧头以及可变长度的数据区。实际测试了几种不同数据传输速率、不同数据长度的单帧数据传输时延,不同数据传输速率和数据长度下的传输时延如图 8 所示。

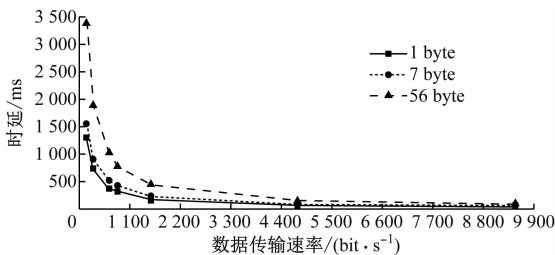


图 8 不同数据传输速率和数据长度下的传输时延

Fig. 8 Transmission delay at different data transmission rates and data lengths

从图 8 可看出,传输时延随数据传输速率的提高而降低,对比 1,7,56 byte 三种不同长度数据包的发送时延,数据包长度越长,数据发送效率越高。为获得要求的数据传输速度和效率,需要选择较高的 LoRa 数据传输速率、较大的数据包封装进行传输。根据组网传输时延小于 3 s 的技术要求,结合图 8 中数据进行计算,组网传输需要选择 4 750 bit/s 以上的数据传输速率。

按照设计的 LoRa 组网传输方法,搭建了链式组网测试环境。使用 9 501 bit/s 的无线空口速率,每节点传输 10 byte 数据,对 10 个节点的传输时延进行测试,单巡检传输周期的时延为 1.12 s,完全满足组网传输时延方面的要求。相同网络条件下,若使用 Mesh 组网模式,全部节点完成数据上传的一个周期时长超过 2.3 s。而星形组网模式下,要满

足 2 km 距离传输,需要限制数据传输速率不高于 656 bit/s,该速率下传输延时非常高,无法满足设计需求。

4.3 组网传输性能测试

为验证组网传输性能,测试了不同间距和不同网络节点数量下 LoRa 链式组网传输的丢包率,如图 9 所示。

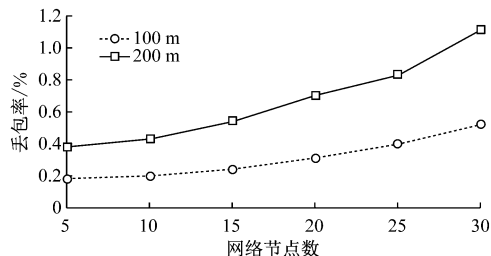


图 9 不同间距和网络节点数量下 LoRa 链式组网传输丢包率

Fig. 9 Packet loss rate in LoRa chain networking transmission at different interval distance and number of network nodes

从图 9 中可看出,200 m 间距组网传输的丢包率高于 100 m 间距组网传输的丢包率,随着组网节点数量的线性增加,组网传输的丢包率逐渐增大。链式组网模式中,小于 30 个节点数量的组网传输丢包率均小于 1.2%,结合所设计的确认和重发机制,可保证数据通信的可靠性,满足组网传输的误码率要求。对比测试星形组网模式,子节点与主节点的距离超过 400 m 后丢包率会急剧增加,无法满足所需的稳定覆盖距离要求。

5 结论

(1) 提出的 LoRa 链式组网传输技术使用了适合矿井环境的 915 MHz 频段、250/500 kHz 带宽,采用特殊的链式组网网络拓扑和巡检应答式的传输机制,可以实现胶带运输监控系统自诊断数据上传、无线传感器接入、应急中继通信功能。

(2) 测试结果表明:组网节点发送状态的功耗小于 300 mW,10 级节点组网传输时延为 1.12 s,丢包率小于 0.6%,能够满足胶带运输监控系统对无线通信时延、功耗、可靠性等方面的要求。

(3) LoRa 的链式组网传输技术还可以扩展应用到煤矿生产的其他方面,未来也将针对传输特性优化、批量无线传感器接入开展进一步研究。

参考文献(References):

[1] 王金华. 井下带式输送机煤流控制系统现状及发展趋势[J]. 工矿自动化, 2015, 41(3): 32-34.
WANG Jinhua. Current situation and development

- trend of coal flow control system of belt conveyor[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(3): 32-34.
- [2] 王中华. 矿井煤流输送系统优化控制关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- WANG Zhonghua. Key technology research of optimization control on mine coal flow conveyor system[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [3] 蒋伟, 吴高镇. 煤矿主运输煤流线信息支撑系统设计[J]. 工矿自动化, 2018, 44(10): 1-5.
- JIANG Wei, WU Gaozhen. Design of information support system of coal flow line of coal mine main transportation[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(10): 1-5.
- [4] 张丽. 带式输送机滚筒温度检测装置设计[J]. 工矿自动化, 2017, 43(7): 86-89.
- ZHANG Li. Design of temperature detection device for drum of belt conveyor[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(7): 86-89.
- [5] 万雪芬, 崔剑, 杨义, 等. 用于煤矿设备信息化升级的无线数据传输节点[J]. 工矿自动化, 2019, 45(6): 37-41.
- WAN Xuefen, CUI Jian, YANG Yi, et al. Wireless data transmission node for informatization upgrade of coal mine equipment [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(6): 37-41.
- [6] 王亭亭. 矿用带式输送机安全监测系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- WANG Tingting. Research on safety monitoring system for mine belt conveyor[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [7] 魏传臻. 胶带运输系统的物联网监测技术应用研究[D]. 廊坊: 华北科技学院, 2019.
- WEI Chuazhen. Application research on Internet of things monitoring technology of belt transportation system [D]. Langfang: North China Institute of Science and Technology, 2019.
- [8] 张新. 煤矿井下远程监控终端设计[J]. 工矿自动化, 2018, 44(12): 97-101.
- ZHANG Xin. Design of remote monitoring terminal in coal mine underground [J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(12): 97-101.
- [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] 赵静, 苏光添. LoRa 无线网络技术分析[J]. 移动通信, 2016, 40(21): 50-57.
- ZHAO Jing, SU Guangtian. Analysis on LoRa wireless network technology [J]. Mobile Communications, 2016, 40(21): 50-57.
- [11] 蔡青松, 林佳. 提升 LoRa 网络性能的终端参数动态选择方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(3): 113-120.
- CAI Qingsong, LIN Jia. Research on dynamic selection method of end parameter for improving LoRa network performance [J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(3): 113-120.
- [12] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
- State Administration of Work Safety, National Coal Mine Safety Administration. Coal mine safety regulations [M]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 2016.
- [13] Semtech. SX1261/2 long range, low power, sub-GHz RF transceiver [EB/OL]. [2019-08-30]. <https://www.semtech.com>.
- [14] ABRARDO A, POZZEBON A. A multi-hop LoRa linear sensor network for the monitoring of underground environments: the case of the medieval aqueducts in Siena, Italy [J]. Sensors, 2019, 19(2): 402.
- [15] JAWHAR I, MOHAMED N. A hierarchical and topological classification of linear sensor networks [C]//IEEE Wireless Telecommunications Symposium, 2009.
- [16] LIAO C H, ZHU G, KUWABARA D, et al. Multi-hop LoRa networks enabled by concurrent transmission [J]. IEEE Access, 2017, 5: 21430-21446.
- [17] 赵文举. 低功耗广覆盖 LoRa 系统的研究与应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- ZHAO Wenju. Research and application of LoRa system with low power and wide area[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [18] 赵旭, 李洪强, 张玉冰, 等. LoRa 调制及其在衰落信道下的性能分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(6): 580-585.
- ZHAO Xu, LI Hongqiang, ZHANG Yubing, et al. Performance analysis of LoRa modulation on fading channel[J]. Journal of CAEIT, 2019, 14(6): 580-585.
- [19] 刘琛, 邵震, 夏莹莹. 低功耗广域 LoRa 技术分析与应用建议[J]. 电信技术, 2016(5): 43-46.
- LIU Chen, SHAO Zhen, XIA Yingying. Analysis and application suggestions of low power wide area LoRa technology [J]. Telecommunications Technology, 2016(5): 43-46.