



文章编号:1671-251X(2019)06-0037-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019030037

用于煤矿设备信息化升级的无线数据传输节点

万雪芬^{1,2,3}, 崔剑³, 杨义⁴, SARDAR Muhammad Sohail⁴

(1. 华北科技学院 计算机学院, 河北 廊坊 065201; 2. 华北科技学院 河北省
物联网监控工程技术研究中心, 河北 廊坊 065201; 3. 北京航空航天大学
工程训练中心, 北京 100083; 4. 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)



扫码移动阅读

摘要:针对现有煤矿无线数据传输技术存在多径效应显著、传输距离短、耐噪特性较差和灵敏度较低等不足,以及煤炭行业大规模设备信息互联互通的需求,设计了用于煤矿设备信息化升级的无线数据传输节点。该节点通过 LoRa-CSS 技术建立设备间的可靠无线数据通道,利用基于 IP 核结构的可编程片上系统 PSoC 灵活适配各种煤矿设备的数据接口,并采用统一规格化数据格式进行指令和数据信息交互。电磁隔离特性测试结果表明,该节点具有较强的隔离特性,不受冲击电压影响,可以有效地将短时高强度浪涌信号降到设备容限值以下。实际应用结果表明,各无线数据传输节点与上位机和煤矿设备之间的数据通信效果较为理想,可以有效地构建由中心站到设备的稳定数据传输通道。

关键词:煤矿设备; 信息化升级; 无线数据传输节点; LoRa-CSS 技术; 可编程片上系统; PSoC
中图分类号:TD67 文献标志码:A

Wireless data transmission node for informatization upgrade of coal mine equipment

WAN Xuefen^{1,2,3}, CUI Jian³, YANG Yi⁴, SARDAR Muhammad Sohail⁴

(1. College of Computer, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China;
2. Hebei Engineering Technology Research Center for IoT Data Acquisition & Processing, North
China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China; 3. Engineering Training Centre,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
4. College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: In view of shortcomings of existing coal mine wireless data transmission technologies, such as significant multipath effect, short transmission distance, poor noise resistance and low sensitivity, and demand for large-scale equipment information interconnection in coal industry, a wireless data transmission node for informatization upgrade of coal mine equipment was designed. The node establishes a reliable wireless data channel between devices through LoRa-CSS technology, uses PSoC, a programmable system-on-chip based on IP core structure, to flexibly adapt data interfaces of various coal mine equipments, and uses unified normalized data format for command and data information interaction. The electromagnetic isolation characteristic test results show that the node has strong isolation characteristic and is not affected

收稿日期:2019-03-13;修回日期:2019-05-11;责任编辑:胡娟。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61671143);国家安全生产监督管理总局安全生产重大事故防治关键技术科技项目(zhishu-0016-2017AQ);中国煤炭工业协会科学技术研究指导性计划项目(MTKJ2017-311);河北省物联网监控工程技术研究中心项目(3142016020)。

作者简介:万雪芬(1979—),女,江苏连云港人,讲师,硕士,研究方向为物联网技术,E-mail:calmerd@ncist.edu.cn。通信作者:杨义(1978—),男,四川成都人,副教授,硕士研究生导师,研究方向为物联网技术,E-mail:yyang@dhu.edu.cn。

引用格式: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.

by impact voltage, and can effectively reduce short-time high-intensity surge signal to the value below device tolerance. The actual application results show that the data communication between each node and the host computer and the coal mine equipments is ideal, and the node can effectively construct a stable data transmission channel from the central station to the equipment.

Key words: coal mine equipment; informatization upgrade; wireless data transmission node; LoRa-CSS technology; programmable system-on-chip; PSoC

0 引言

对煤炭开采、储运、加工等环节中的设备进行信息化升级改造,是提高煤炭产业生产力、竞争力的有效手段^[1-2]。但是由于受资金投入有限、老旧设备存量、设备体系和型号繁杂等因素所限,我国煤炭行业现阶段规模化信息交互能力略有不足,由此产生的信息孤岛对产业的进一步升级造成了不利影响^[3-5]。

由于煤炭行业生产环境复杂,有线传输方式在布线成本、使用便捷性、建设周期等方面存在不足,所以可考虑采用覆盖范围大、传输可靠性高的无线传输作为设备间信息互联的主要方式。在无线数据传输领域,2.4 GHz ISM 频段、ZigBee/IEEE 802.15.4 协议应用较为广泛^[6-7]。但是在具体煤矿生产环境中,2.4 GHz 无线信号传输存在多径效应显著、传输距离短、耐噪特性较差和灵敏度较低等不足,需要在节点布局与天线等方面进行针对场景的匹配优化设计^[8-9]。相较于 2.4 GHz 无线信号,433,915 MHz 等频段的无线信号在穿透性及传输距离上有一定优势,但是在这些频段上未形成主流商用协议,为节点通用化设计带来了不便。WiFi 无线传输方式具有传输速率较高、组网便捷、支持移动智能设备等优势,但不适用于节点能耗受限的情况^[10],单网规模与可靠性也劣于 ZigBee 方案。GPRS、3G/4G 等基于移动基站的通信方式需要额外建设专用基站,建设成本较高且持续产生数据服务费用^[11],不适用于煤矿井下。

面向下一代物联网海量终端互联应用、基于啁啾扩频技术(Chirp Spread Spectrum, CSS)的长距离(Long Range, LoRa)低功耗广域网技术(LoRa-CSS)在通信距离、抗噪声能力、网络拓扑、支持终端数量等方面具有显著优势^[12-14],有望满足煤炭行业大规模设备信息互联互通的需求。而利用功能集成度高、成本低、可靠性高的可编程片上系统(Programmable System-on-Chip, PSoC)在一个硅片上实现定制功能的数模混合嵌入式系统,可灵活地适配不同设备的信息传输需求,实现基于 IP 核设计重用技术的快速研发及功能适配^[15-16]。本文结合 LoRa-CSS 与 PSoC 技术,设计了一种用于煤矿设备信息化升级的无线数据传输节点,该节点利用

可编程片上系统 PSoC 灵活适配煤矿设备的数据接口,通过 LoRa 无线通道进行较大范围内的可靠无线信息交互,从而构建煤炭物联网规模化无线信息传输通道。

1 严重多径环境下的 LoRa-CSS 传输

来自物体的反射、边缘上的衍射及粗糙表面的散射等都会造成无线信号多径效应。由于煤矿环境较复杂,无线信号传输受多径效应影响尤为严重^[17]。LoRa-CSS 信号的抗多径性能与其信息承载能力直接相关,为了实现不同场合的高效数据传输,需要依据 LoRa-CSS 传输特点设定对应信息承载结构。

与大多数传统二进制 CSS 方法不同,LoRa-CSS 传输具有多态性,即在每个符号位上传递 7~12 bit 数据。每个啁啾调制后频率都对应一个承载的数据状态,每个编码的啁啾(多态啁啾调制)实际上是参考信号的循环移位,如第 k 个数据状态对应的频率 f_k 可表示为

$$f_k = f_0 + k \frac{B}{2^F} \quad (1)$$

式中: f_0 为初始信道频率; B 为信道频谱宽度; F 为扩频因子。

LoRa 信号的实时频率可表示为

$$f(t) = \begin{cases} f_c + \frac{B}{T_s} \left(t - \frac{k}{T_s} \right) + B & -\frac{T_s}{2} \leq t < \frac{k}{B} \\ f_c + \frac{B}{T_s} \left(t - \frac{k}{T_s} \right) & \frac{k}{B} \leq t < \frac{T_s}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_c 为啁啾载波频率; T_s 为啁啾信号周期; t 为时间。

基于上述实时 CSS 扩频信号,LoRa 采用格雷编码方式获得最大汉明距离,以提高接收端探测纠错能力。编码率 $C \in [1, 2, 3, 4]$,用于前向纠错的编码效率 R 可由式(3)得到:

$$R = \frac{4}{4+C} \quad (3)$$

LoRa-CSS 信道比特率 L 可用式(4)计算:

$$L = FRT_s = \frac{4F}{4+C} + \frac{B}{2^F} \quad (4)$$

由式(1)一式(4)可以看出,LoRa-CSS 的信道比特率由扩频因子、编码效率、啁啾信号周期共同确定。严重多径环境中的 LoRa-CSS 信号传输实验表

明,仅扩频因子对多径条件下的信号传输有显著影响。当扩频因子 $F \in [10, 11, 12]$ 时,基本可实现多径免疫。但是较大的扩频因子会造成传输速度下降,不利于设备信息互联互通。而较高的编码效率有助于实现相对较大的数据传输带宽。因此,令扩频因子处于多径免疫区的下边界处,即 $F=10$ 作为系统的主扩频因子。而编码效率及带宽则取允许范围的上边界值,即 $R=0.8, B=500\text{ kHz}$ 。

2 无线数据传输节点设计

2.1 节点结构设计

无线数据传输节点用于煤矿设备间或设备与上位机之间的信息交互。节点由 PSoC、LoRa 无线通信模块、隔离接口部分及供电部分组成,如图 1 所示。节点围绕 PSoC 设计,采用 CY8C3866AXI-040 型 PSoC 芯片,该芯片内置工作频率高达 67 MHz 的固核高速微控制单元 (Microcontroller Unit, MCU),利用其内部通用数字块 (Universal Digital Block, UDB) 阵列,结合原生 IP 核,可灵活适配不同煤矿设备的数据接口规范。此外, CY8C3866AXI-040 还负责节点管理调度及供电监测等功能。LoRa 无线通信模块选用 SX1278 芯片。该模块发射功率为 $27\text{ dB} \cdot \text{m}$,接收灵敏度为 $-130\text{ dB} \cdot \text{m}$ 以上。节点无线传输可选择 $410 \sim 441\text{ MHz}$ 的 32 个离散信道之一。LoRa 无线通信模块通过通用异步收发传输器 (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART) 接口与 CY8C3866AXI-040 连接。

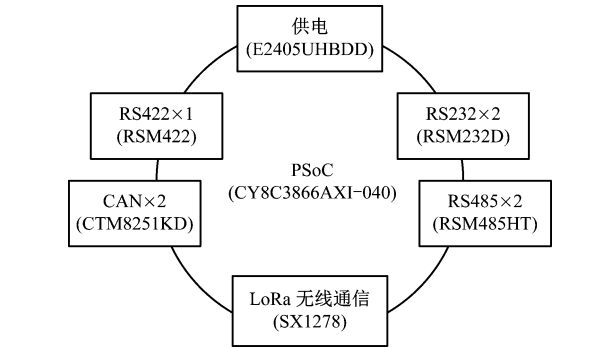


图 1 无线数据传输节点结构

在现有煤炭行业设备中,部分设备已经具有 RS232、RS485、CAN 等总线数据接口,有的可通过 PLC 升级或增加辅助信息装置实现上述接口。因此,重点面向行业主流的数字总线接口类型,采用 RSM232D、RSM485HT、RSM422、CTM8251KD 嵌入式隔离收发器连接 CY8C3866AXI-040 对应端口及设备数据接口。

在煤矿设备工作环境中,往往会遇到较强的电磁冲击,因此在接口部分还需增加电磁隔离及抗浪

涌功能。本文采用 CAN 总线保护器 SP00S12 抑制数据接口可能出现的浪涌。

为了兼顾转换效率及隔离特性,供电部分选择 E2405UHBDD 宽压输入隔离稳压模块,其满载效率高达 83%,隔离电压为 DC1 500 V,负载调整率小于 1%,可充分满足节点供电需求。

节点开发过程中,在 PSoC 原生 IP 核的基础上,使用 Verilog HDL 开发面向具体应用的结构并加以封装。在不同的应用场景中不需要针对多样化的煤矿设备而改变硬件设计,通过功能 IP 核的调配增删即可实现相应功能,大大降低了开发复杂度,实现了功能复用。高集成度、高灵活性的 PSoC 结合接口模块,使得节点具有十分简洁的结构,如图 2 所示。该结构大幅度地降低了成本,提高了可靠性,此外简洁的布局也有助于降低机械振动等不利因素对节点的影响。

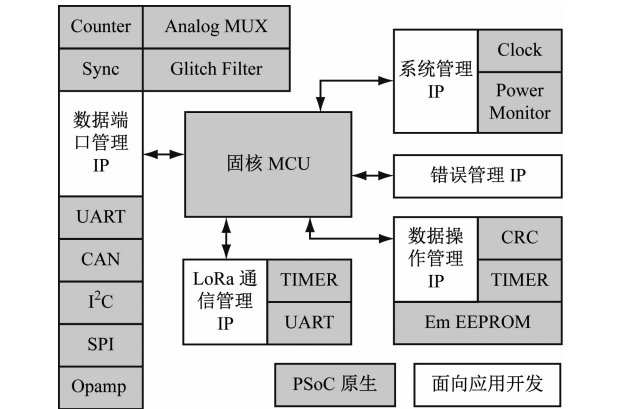


图 2 基于 PSoC 开发的节点功能结构

Fig. 2 Node functional structure based on PSoC development

2.2 节点工作流程

节点可工作于轮询模式和自主时序模式。在轮询模式下,节点响应上位机发来的轮询指令并将指令传给设备,将当次轮询周期内收集到的设备数据置于可变长度的 Payload 容器中发往上位机。在自主时序模式下,节点收集设备数据,当满足传输触发条件(存储区将满或要求实时性等)后通过 Payload 容器发送数据,并持续侦听 LoRa 信道,实时接收上位机发来的设备指令并传递给设备。轮询模式的时序由上位机确定,自主时序模式的时序由设备确定,用户可根据需要自行选择工作模式。节点工作流程如图 3 所示。

节点将 PSoC 中的原生 IP 核与针对具体应用开发的设备接口适配 IP 核相结合,以匹配不同煤矿设备数据接口的通信协议及数据格式。此外,在 PSoC 内部存储空间中为每个接口安排了一个设备数据缓存区及上位机指令缓存区,以提高数据传输稳定性和可靠性。

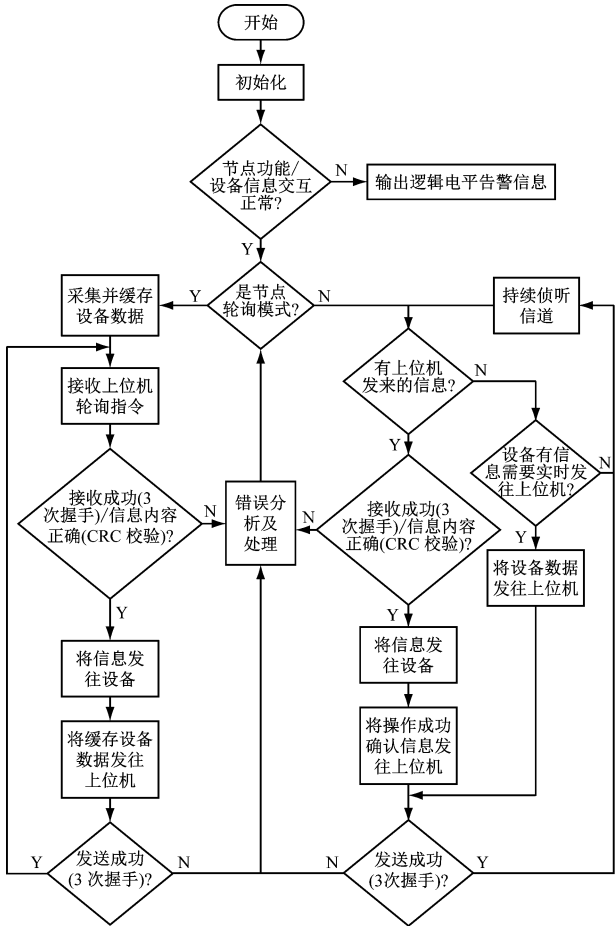


图 3 无线数据传输节点工作流程

Fig. 3 Workflow of wireless data transmission node

节点支持最长 128 byte 的 Payload 容器。用户可根据实际数据传输要求,通过修改 PSoc 中的 LoRa 传输 IP 核(由 UART 原生 IP 核及基于 UDB 开发的 LoRa 传输管理 IP 核构成),实现针对不同数据的承载封装。每个 LoRa 网络中的节点都具有其唯一网内 ID,通过该网内 ID 可实现可靠的网内数据传输。

2.3 规格化数据格式

为了便于设备进行信息交互,节点采用统一规格化的数据格式,如图 4 所示。其中“ID”用于标志具体节点或上位机,“拼接标志”用于在信息及辅助标志的长度超出 LoRa 容器所允许长度时进行序列信息拼接,“方向”用于标志信息上下行方向,“长度”用于标志该条数据中指令数据所占长度,“校验”用于循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check,CRC)。在轮询模式下,“指令及数据”由一系列带时间戳的指令和数据构成,并分别用带序号的指令标志及数据标志进行分割及指示;而在自主时序模式下,指令和数据都为实时发送,所以“指令及数据”仅含单条由对应类型标志指示的指令或数据。

3 测试分析

对无线数据传输节点的电磁隔离特性进行测

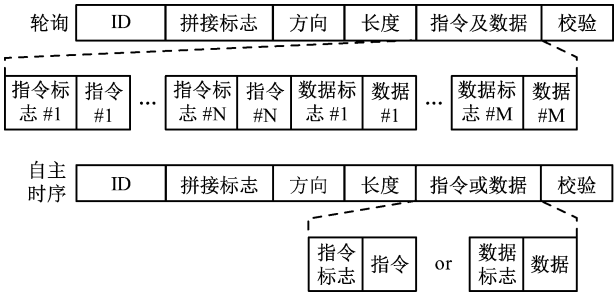


图 4 LoRa 容器中的规格化数据格式

Fig. 4 Normalized data format in LoRa payloads

试。使用 RK2670AM 型耐压测试仪以 60 s 为周期分别在个接口上施加 DC2 000 V 高冲击电压,加压 300 次。测试结果显示,各设备接口未有击穿、短路、飞弧等现象,加压过程对各设备接口的工作特性未造成影响,体现了较强的隔离特性。此外,对供电部分施以 500 次以 60 s 为周期的 DC1 500 V 高冲击电压,结果显示,其工作特性良好,亦未受冲击电压影响。测试中还观察到设备接口上的浪涌干扰抑制模块可以有效地将短时高强度浪涌信号降到设备容限值以下。

在冀东某煤炭储运区对节点实际使用效果进行测试。测试中节点用于连接带式输送机及粉尘监测设备。用于带式输送机的节点采用自主时序模式,而连接粉尘传感器的节点采用轮询模式。带式输送机的 RS485 接口与节点的 RS485 接口使用屏蔽线相连。带式输送机的数据经过 RS485/UART 协议转换,由节点内数据端口管理 IP 核及数据操作管理 IP 核进行缓存、纠错、校验信息等相关操作(通过应用程序编程接口(Application Programming Interface,API)调用对应的功能 IP 核实现,无需再根据应用场景进行针对性编程)。节点与上位机之间的 LoRa 通信由 LoRa 通信管理 IP 核实现,仅需按照预设 API 接口规范设定通信模式与置入/取出数据,即可实现节点-上位机间基于规格化数据格式的相互通信。而对节点管理,亦通过系统管理 IP 核实现。IP 核重用功能将逻辑功能实现过程简化为一系列基于 API 的调用,不需进行针对设备的专有性开发。粉尘传感器的功能实现与带式输送机相同,二者使用相同的功能 IP 核和节点硬件结构(IP 核和硬件结构的重用),仅在 API 的具体调用参数上基于传感器 I²C 接口及轮询模式的特点有所调整。

节点与中心站之间的距离为 400~900 m。节点与中心站之间的菲涅尔区存在一定程度由煤堆及机械设备造成的遮挡。测试中频率为 429 MHz,天线增益为 3 dBi。采用式(5)所给出的数据包传输成功率(Packet Success Rate,PSR)在 1 h 内的平均值作为传输效果的衡量依据^[18]：

$$PSR = \frac{P_s}{P_t} \times 100\% \tag{5}$$

式中 P_s 和 P_t 分别为接收数据包数和发送数据包数。

需要注意的是,该 PSR 值为计入 3 次握手失败及 CRC 校验失败后的值。测试得到的 PSR 均值、最优 PSR 及 PSR 劣化下边界结果如图 5 所示。

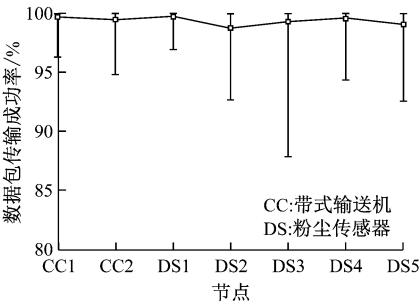


图 5 节点 PSR 测试结果

Fig. 5 PSR test results of the nodes

由图 5 可以看出,各节点与上位机之间的数据通信效果较为理想,PSR 均值在 98.5% 以上,大多数时间 PSR 稳定在 100%。降雨及车辆对节点传输能力偶有影响,布设在路边的粉尘传感器受车辆运动影响较大,如布设于停车位附近的 3 号粉尘传感器,当附近有车辆频繁停靠时,其 PSR 值较 PSR 均值降低了近 10%。通过改进场区车辆停靠规划后,这一问题得到了较好的解决。在测试周期内获得的监测数据还显示,节点与设备的数据交互良好,未发现在节点-设备接口处出现数据丢失或错误现象。外部电动机等产生的强电磁干扰亦没有影响节点正常工作。测试结果表明,所设计的无线数据传输节点稳定可靠,可以有效地构建由中心站到设备的稳定数据传输通道。

4 结语

通过结合 LoRa-CSS 低功耗广域网技术及基于 IP 核开发的可编程片上系统技术,设计了一种用于煤矿设备信息化升级的无线数据传输节点,介绍了节点的结构设计、工作流程及统一规格化数据格式。该节点可以有效地构筑稳定可靠的无线数据传输通道,且具有较强的抗电磁干扰能力。测试结果表明,该节点具有较强的隔离特性,工作性能稳定可靠,可为煤炭企业设备信息化升级提供有效的技术手段。

参考文献(References):

[1] 谭章禄,李睿哲. 煤炭企业管理信息化系统建设研究[J]. 煤炭技术,2016,35(12):319-320.
TAN Zhanglu, LI Ruizhe. Research on management information system of coal enterprise [J]. Coal Technology, 2016, 35(12): 319-320.

[2] 刘建,郜彤,刘传安. 煤矿安监执法信息管理平台设计研究[J]. 煤矿安全,2018,49(3):245-248.
LIU Jian, GAO Tong, LIU Chuan'an. Research on design of coal mine safety supervision information management platform[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(3): 245-248.
[3] 毛善君.“高科技煤矿”信息化建设的战略思考及关键技术[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1572-1583.
MAO Shanjun. Strategic thinking and key technology of informatization construction of high-tech coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1572-1583.
[4] 谭章禄,陈晓. 煤炭企业信息化建设现状及发展对策探讨[J]. 工矿自动化,2016,42(7):63-65.
TAN Zhanglu, CHEN Xiao. Discussion on situation and development countermeasures of coal enterprise informatization construction [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(7): 63-65.
[5] 何敏. 智慧矿山重要特征与实现途径[J]. 工矿自动化,2018,44(3):31-35.
HE Min. Important characteristics and realization ways of wisdom mine [J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(3): 31-35.
[6] 张文栋,薛晨阳. 煤矿机械工作状态监测系统研究[J]. 振动. 测试与诊断,2018,38(5):883-889.
ZHANG Wendong, XUE Chenyang. Research on working state monitoring system of coal mine machinery[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(5): 883-889.
[7] CHENG B, ZHAO S, WANG S, et al. Lightweight mashup middleware for coal mine safety monitoring and control automation[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(2): 1245-1255.
[8] MORIDI M A, KAWAMURA Y, SHARIFZADEH M, et al. An investigation of underground monitoring and communication system based on radio waves attenuation using ZigBee [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43(7): 362-369.
[9] 霍羽,郑红党,胡延军,等. 矿用天线在矩形巷道中应用的最佳波束指标[J]. 煤炭学报,2017,42(10): 2776-2782.
HUO Yu, ZHENG Hongdang, HU Yanjun, et al. Optimum beam index of mine antenna used in rectangular tunnels[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2776-2782.
[10] 王军,顾义东,曾苛. WiFi 通信技术在煤矿信息化中的应用分析[J]. 工矿自动化,2017,43(7):90-93.
WANG Jun, GU Yidong, ZENG Ke. Application analysis of WiFi communication technology in coal mine informatization [J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(7): 90-93.
[11] 张立亚. 全矿井融合通信系统研究[J]. 工矿自动化,

2018,44(3):12-16.

ZHANG Liya. Research on mine integrated communication system [J]. Industry and Mine Automation,2018,44(3):12-16.

[12] AUGUSTIN A, YI J, CLAUSEN T, et al. A study of LoRa: long range & low power networks for the Internet of things [J]. Sensors,2016,16(9):1466.

[13] HAXHIBEQIRI J, VAN D A F, MOERMAN I, et al. LoRa scalability: a simulation model based on interference measurements[J]. Sensors,2017,17(6): 1193.

[14] 万雪芬,崔剑,杨义,等. 地下 LoRa 无线传感器网络的传输测试系统研究[J]. 华南农业大学学报,2018, 39(3):118-124.

WAN Xuefen,CUI Jian,YANG Yi,et al. Research on transmission measurement system for LoRa wireless underground sensor network [J]. Journal of South China Agricultural University,2018,39(3):118-124.

[15] LIU X, FENG S, CHEN X, et al. Design of a detection system for projected capacitive touch screen based on PSoC [J]. International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology, 2016, 17(11):161-164.

[16] FELGUEIRAS M C, MACEDO J, FIDALGO A, et al. How to use remote labs for enhancing e-learning on PSoCs [J]. International Journal of Online Engineering, 2016,12(4):61-63.

[17] TANGHE E, GAILLOT D P, LIENARD M, et al. Experimental analysis of dense multipath components in an industrial environment [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62 (7): 3797-3805.

[18] 万雪芬,崔剑,杨义,等. 基于智能手机的 LoRa 无线传输效能测试研究[J]. 现代电子技术,2018,41(21): 7-11.

WAN Xuefen, CUI Jian,YANG Yi, et al. Study on smartphone-based performance test of LoRa wireless transmission [J]. Modern Electronics Technique, 2018,41(21):7-11.