

基于LoRa的 γ 辐射监测系统的设计及应用

张迪¹ 程懋松^{2,3} 戴志敏^{2,3} 施成龙¹

1(上海理工大学 上海 200093)

2(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

3(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 核能科学与技术和人们的生活联系紧密,但同时核辐射也可能危害人们的身体健康,因此需要加强对核辐射的监测。有线核辐射监测系统布线复杂、施工周期长、成本较高,且移动性差、故障排查较为困难。为了满足便捷测量 γ 辐射环境的需求,基于LoRa无线通信技术,设计了 γ 辐射监测系统。该系统的主要功能包括数据采集、数据处理及数据传输,采用硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier, SiPM)闪烁体探测器进行数据采集,STM32单片机作为核心处理器对采集的数据进行处理、打包,由LoRa无线通信模块进行数据传输。针对可能存在的因复杂电磁环境、传输距离等因素导致监测系统断线及数据传输频繁时造成的区域内信道拥堵问题,设计了动态最优路径通讯算法,通过筛选中继节点,寻找最优重连路径以及实现数据发送的优先级分配。实际测试结果表明:闪烁体探测器测试辐射数据结果可靠,且基于LoRa的 γ 辐射监测系统数据传输稳定性达到99.57%以上。该系统具有组网灵活、传输距离远、成本低、拓展性强等优点,具有广泛的应用前景。

关键词 SiPM, γ 辐射, 核辐射监测, LoRa无线通信

中图分类号 TL812

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090402

Design and application of gamma radiation monitoring system based on LoRa

ZHANG Di¹ CHENG Maosong^{2,3} DAI Zhimin^{2,3} SHI Chenglong¹

1(University of Shanghai Science and Technology, Shanghai 200093, China)

2(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

3(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] Nuclear science and technology are closely related to the lives of people. However, nuclear radiation may harm the health of the general public; hence, nuclear radiation monitoring must be strengthened. A wired nuclear radiation monitoring system has the characteristics of complex wiring, a long construction period, high cost, poor mobility, and more difficult troubleshooting. [Purpose] This study aims to address the demand for convenient measurement and monitoring of gamma radiation fields. [Methods] Based on the LoRa wireless communication technology, a γ radiation monitoring system using silicon photomultiplier (SiPM) tube-scintillator detector was designed. The main functions of the system included data collection from the detector, data processing and transmission using a STM32 single-core processor. The collected data packaging and transmission were processed in STM32 microcontroller using the LoRa wireless communication module. Considering the possible channel congestion in the monitoring system and the frequent data transmission, a dynamic optimal path communication algorithm was designed to find the optimal reconnection path and realize the priority allocation of

第一作者: 张迪, 女, 1997年出生, 2020年毕业于牡丹江师范学院, 现为硕士研究生, 研究领域为核辐射监测

通信作者: 戴志敏, E-mail: daizhimin@sinap.ac.cn

收稿日期: 2022-12-09, 修回日期: 2023-04-26

First author: ZHANG Di, female, born in 1997, graduated from Mudanjiang Normal University in 2020, master student, focusing on nuclear radiation monitoring

Corresponding author: DAI Zhimin, E-mail: daizhimin@sinap.ac.cn

Received date: 2022-12-09, revised date: 2023-04-26

data transmission. [Results & Conclusions] The test results show that the data transmission stability of γ radiation monitoring system based on LoRa is higher than 99.57%, and has the advantages of flexible networking, a further distance of transmission, low cost, and substantial expansion, hence has a broad reference prospect.

Key words SiPM, Gamma radiation, Nuclear radiation monitoring, LoRa wireless communication

随着核技术的不断发展与进步,使用核设备的实验场所越来越多,放射性污染成为了一个不可忽视的环境污染问题,且超标的辐射量会对人体造成严重的损伤,因此,核辐射带来的问题越来越受到社会的关注^[1]。核辐射探测器是通过使核辐射在气体、液体或者固体中发生电离效应、发光现象、物理变化或化学变化来监测核辐射的仪器^[2]。闪烁体探测器利用电离辐射在某些物质中产生的闪光进行探测,是目前应用最多、最广泛的电离辐射探测器之一。相比硅二极管、光电倍增管,硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier, SiPM)结构紧凑、增益高、响应快速、工作电压低、灵敏度高且具有极佳的磁场兼容性。SiPM是近年来兴起的一种由大量工作在盖革模式下的雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)集成的新型光电探测器^[3],不仅在性能上满足各种弱光监测应用需求,并且具有明显的技术优势,能够更好地满足探测器数字化、功能化、智能化的发展需求。被广泛应用在医学成像、激光探测与测量、辐射探测和精密分析等领域。SiPM具有从近紫外到近红外的光谱响应范围、出色的光子计数能力、单光子级别灵敏度、皮秒级快速响应能力、出色的时间分辨率和较高的光子探测效率等优异特性,并兼具固体探测器对磁场不敏感、能抵抗高强度机械冲击和不会因为入射光饱和而老化的优点,满足复杂园区环境对核辐射探测器的要求。但SiPM存在增益受温度影响大的缺点,温度每上升10℃增益约下降 5×10^5 ,可以通过温度补偿电源对SiPM的增益特性进行补偿。

实际园区环境中存在大量建筑物及植被,传统的有线核辐射监测系统移动性差、成本高、部署和维修困难,在遭遇大量障碍物时信号幅度衰减,进而导致数据损失^[4]。无线通信建设工程周期短、成本低、便于维护,可有效解决有线核辐射监测系统存在的问题。LoRa^[5]技术是一种长距离无线通信技术,与同类技术相比,可以提供更远的通信距离。LoRa调制属于物理层(PHY)调制,因此也可将其用于不同的协议(LoRa协议、LoRaWAN协议、CLAA协议、LoRa私有协议等)和不同网络架构中(如Mesh、星型、点对点等)。LoRa无线通信技术采用了扩频调制技术,数据衰减较小,从而延伸了系统监测范围;LoRaMesh混合网络拓扑结构不存在区段隔离,系统

全部节点集中在网关范围内,因而能提高系统数据传输的稳定性。针对可能存在的因复杂电磁环境、距离等因素导致监测系统断线及数据传输频繁时造成的区域内信道拥堵问题,设计了动态最优路径通讯算法,通过筛选中继节点,寻找最优重连路径以及实现数据发送的优先级分配,从而解决了上述问题。基于LoRa无线传输技术,结合SiPM-闪烁体探测器,设计动态最优路径通讯算法,开发了 γ 辐射监测系统,并对系统进行了通信及稳定性测试。

1 系统架构

基于LoRa的 γ 辐射监测系统由终端节点、网关和上位机集中监控平台三部分组成。系统结构示意图如图1所示。

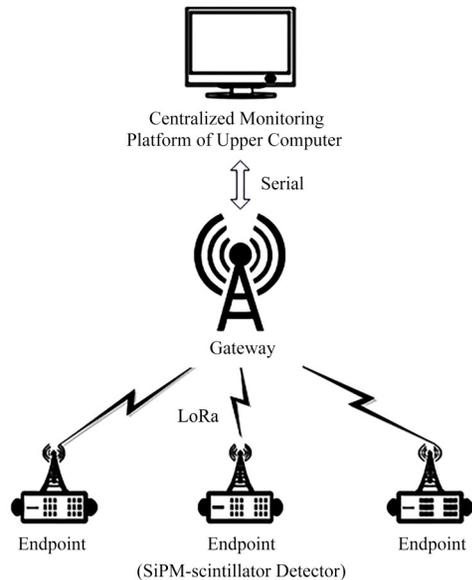


图1 系统结构示意图
Fig.1 Diagram of system structure

终端节点由SiPM-闪烁体探测器、LoRa无线通信模块及其他外围电路组成,SiPM-闪烁体探测器功耗低、光子检测效率高、对磁场不敏感且是离散的,可以满足辐射监测系统对于探测器的需求。终端节点分布放置在园区内,上电后,自动寻找网关请求加入监测网络,入网后进行系统初始化,读取Flash中的配置参数,进入低功耗模式等待开机唤醒,低功耗模式配置成待机模式此时模式系统会关闭所有的时钟以及外设。终端节点实时采集园区内

的 γ 辐射信息, 触发 A/D 转换器, 模拟信号转数字信号, 并通过 LoRa 无线通信模块发送至网关。终端节点与网关通信流程如图 2 所示, SiPM-闪烁体探测器持续采集数据发送至存储模块, 定时器每隔 30 s 产

生一个中断, 进入中断服务程序后, 退出低功耗模式, 唤醒 LoRa 无线通信模块, 打包并校验数据, 由 LoRa 无线传输至目标节点。若辐射剂量率超过事先设定的阈值, 点亮报警灯。

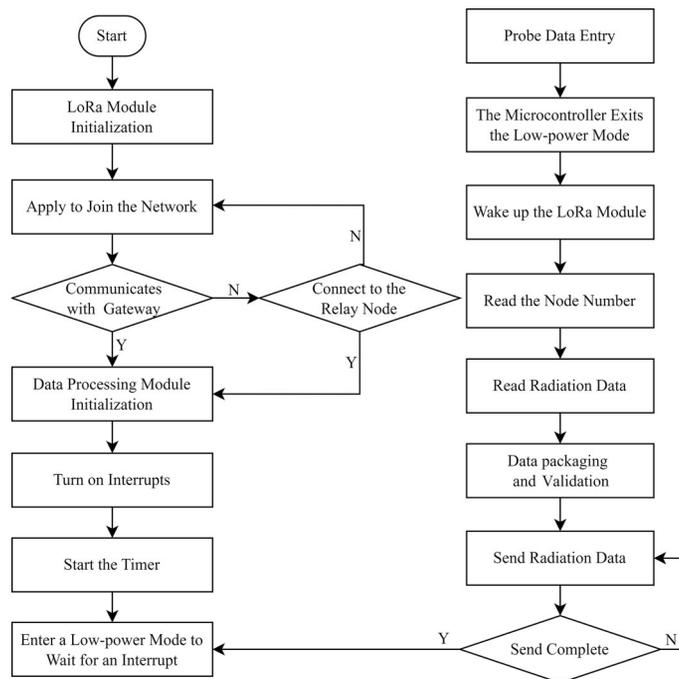


图2 终端节点与网关通信流程
Fig.2 Flow chart of terminal node and gateway communication process

网关是系统的核心, 维持网络整体的信息传输并通过串口通信模块与上位机集中监控平台通信。由串口通信模块及 LoRa 无线通信模块组成, 主要功能是接收、解析、校验和转发终端节点发送的数据, 同时与上位机通过串口收发程序通信, 实现监控主机控制命令的接收和转发^[6]。网关数据收发流程如图 3 所示。网关上行通信: 首先扫描接收数据队列, 进行目的 ID 查询, 读取数据帧并校验数据长度; 随后查询命令判断信息类型属于数据信息或状态信息, 若属于数据信息, 网关优先创建应答事件发出应答信息, 并提高抢占优先级, 打断其他正在执行的中断; 最后对数据信息进行封装, 加入发送至上位机的事件队列, 设置发送等待, 发送完毕后, 设置下一次发送的延时。网关下行通信: 首先创建接收数据包, 扫描接收数据队列, 进行目的 ID 查询, 读取数据帧并校验数据长度; 随后查询命令判断事件类型属于确认事件或中继转发事件, 对需要中继转发的数据进行封装, 加入发送缓存区。若此时有数据包正在发送, 则等待其发送结束; 若此时有重传数据, 则提高重传数据的抢占优先级。

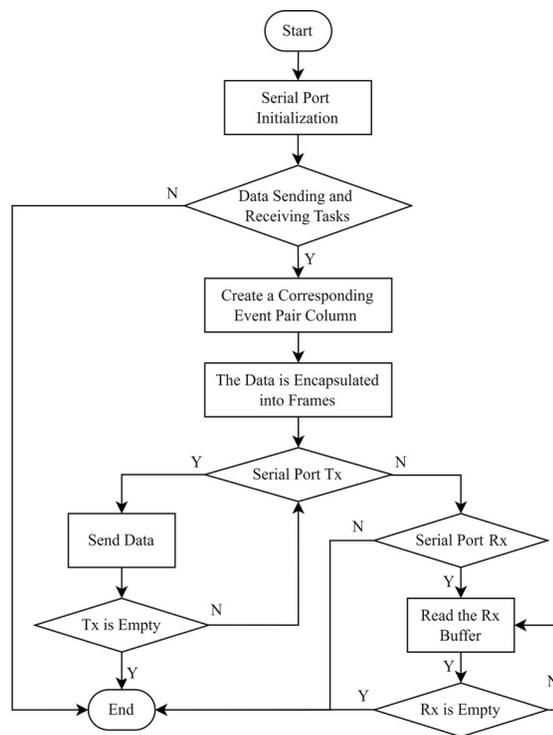


图3 网关的数据收发流程图
Fig.3 Flow chart of sending and receiving data of the gateway

上位机集中监控平台的主要功能是接收网关发送的数据,远程监测终端节点及系统的运行状态,实时显示辐射数据。

系统采用 LoRaMesh 混合网络拓扑结构,在组建的网络中,终端节点之间、终端节点与网关之间均可以实现双向通信。当节点没有工作任务进入休眠状态时,拓扑结构不会受到影响,系统结构稳定。

2 部件设计

2.1 SiPM-闪烁体探测器

SiPM^[7]的基本结构单位(像素)是由工作在盖革模式的雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)串联淬灭电阻构成。多个像素点同时检测到光子,输出幅值是多个脉冲的叠加,若光强度使所有像素点同时发生雪崩,器件达到饱和状态,输出幅值不再随光照强度的增大而增大。多个像素并联连接,构成二维的阵列式结构,并共用一个电源端和一个输出端。当APD外加偏置电压高于雪崩击穿电压阈值时,由入射光子激发产生的电子空穴对在电场作用下往PN结漂移,在漂移过程中经耗尽层雪崩区间(此区间电场强度与材料掺杂浓度有关)的碰撞电离效应激发更多电子空穴对产生一个信号电流,使得APD具有内部增益。随着电流的增大,淬灭电阻两端的电压增大,PN结耗尽层分压减少,APD输出一个瞬时脉冲后停止,每个像素单元产生的电流累加起来形成SiPM的输出电流^[8]。SiPM内部原理示意图如图4所示。

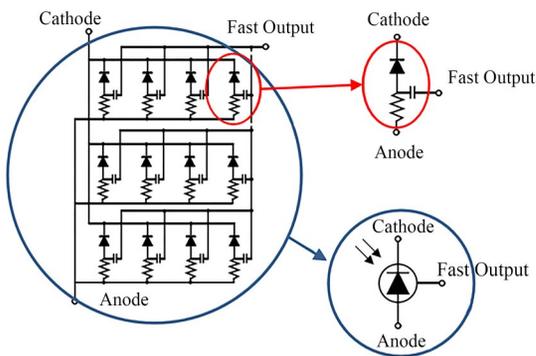


图4 SiPM内部原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of the internal principle of SiPM

γ 辐射探测器组成部分包括NaI(Tl)闪烁晶体、SiPM和放大器等。

NaI(Tl)晶体有效原子序数为50,密度为 $3.67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,最大发光波长为415 nm,发光衰减时间为230 ns。本课题采用 $\varnothing 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的NaI(Tl)晶体。选用湖北京邦科技TP6050型SiPM,

感光面积 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,探测效率能够达到35%,内部增益达到 2.1×10^6 ,上升时间为1 s,暗计数率典型值为 $140 \text{ kHz}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。实物图如图5所示。光子波长与探测效率的关系如图6所示。

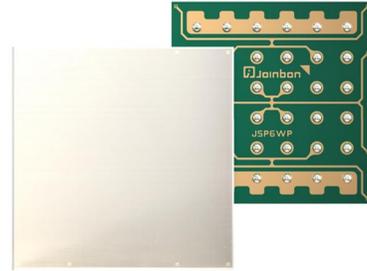


图5 JSP-TP6050-SMT实物图

Fig.5 Physical drawing of JSP-TP6050-SMT

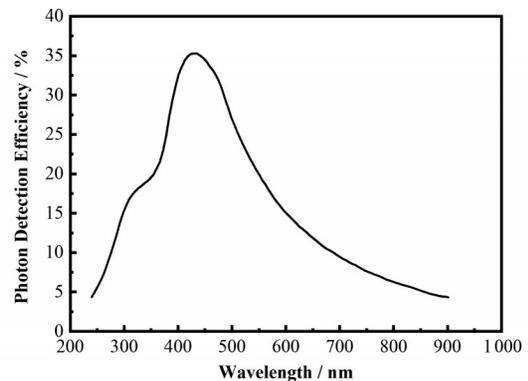


图6 光子波长与探测效率的关系

Fig.6 Relationship between photon wavelength and detection efficiency

SiPM为半导体器件,温度特性无法忽视。SiPM增益随温度变化可以等效表示为:

$$G(\Delta V) = \frac{C(V_{\text{bias}} - V_{\text{bo}} - k\Delta T)}{e} \quad (1)$$

式中: $G(\Delta V)$ 为SiPM在过偏压为 ΔV 时的等效增益; C 为等效节电容; V_{bias} 为反向偏置电压; V_{bo} 为参考温度为 T_0 时的击穿电压; k 为击穿电压温度系数; ΔT 表示对于 T_0 的温度变化量。由式(1)可知,SiPM的增益与温度变化量呈线性关系。

针对SiPM增益漂移的修正方法主要有调节前置放大器放大倍数、低温制冷和电压补偿。16通道PET探测模块通过调节前置放大器放大倍数来解决增益漂移的问题,这种方法提高了电路的复杂性。低温制冷方法能使SiPM工作温度稳定在一特定值,并且具有降低暗计数的效果,但是低温制冷装置体积大且成本高。因此,采用LPTC型热敏电阻KTY83/110作为反馈电阻,设计了具有温度补偿功能的SiPM探测器电源电路。

LPTC型热敏电阻KTY83/110是镍铜合金的热敏电阻, R 在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 标准值为 $1 \text{ k}\Omega$,工作温度为

-55 °C~+175 °C,最大工作电流为8 mA。各温度下电阻阻值如图7所示,KTY83/110热敏电阻的阻值与温度呈正相关。温度补偿电源设计原理图如图8所示。

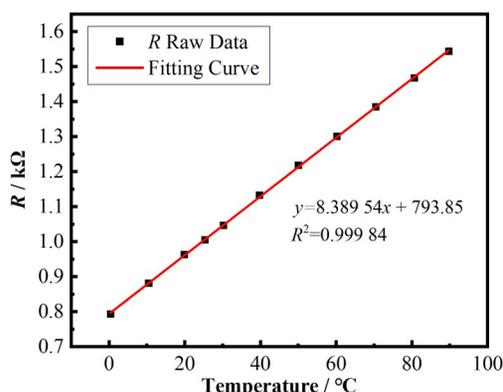


图7 KTY83/110阻值随温度变化图

Fig.7 KTY83/110 resistance change with temperature

SiPM-闪烁体探测器耦合过程如下:首先,使用无水乙醇清洗NaI(Tl)闪烁晶体与SiPM的交界面;其次,在交界面填充全透明光学硅脂,排净空气,降低荧光光子在交界面产生全反射的概率;最后,用铝箔包裹避免环境干扰。

当 γ 射线射入到NaI(Tl)闪烁晶体中,会使其电离而发射荧光。荧光进入SiPM后,在其阳极形成电流脉冲,经电阻取样得到一个电压脉冲信号。经过NaI(Tl)闪烁晶体和SiPM输出的信号往往较弱,需要增加前置放大器,主要作用是提高系统的信噪比,减小信号传输时外界环境的干扰,实现阻抗转换和匹配。脉冲信号经放大、整形至适配A/D转换器的输入电压范围。ADC选用可以提供高分辨率和低

噪声的12位、8通道、采样率1 MSPS(Mega-Samples per Second)的AD7991芯片,它的ENOB为11位,功耗为7 mW,价格较为经济,输入电压范围为0~3.3 V。然后,将脉冲信号送到脉冲峰值采样电路进行峰值采样,当脉冲下降沿到来时,峰值采样电路输出采样完毕信号,触发A/D转换器,将连续变化的模拟信号转换成离散的数字信号,通过I2C(Integrated Circuit)接口将数据传输给核心处理器^[9]。

能量分辨率是SiPM-闪烁体探测器的一个重要指标,表征探测器识别能量相近的 γ 射线特征峰的能力。SiPM-闪烁体探测器的能量分辨率与光电倍增器中的单光子响应、闪烁体的光输出等因素密切相关。当光子倍增器的增益越高,单光子响应越好时,探测器的能量分辨率会更好。计算公式如下:

$$n = \frac{\text{FWHM}}{E_{\gamma}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:FWHM为半宽高,即 γ 射线全能峰高度的一半处所对应的峰的能量宽度,MeV; E_{γ} 为全能峰峰位所对应的能量,即放射性核素的特征峰能量,MeV。使用放射性核素¹³⁷Cs的662 keV的特征峰对 γ 射线探测器的能量分辨率进行测试,能量分辨率为7.7%,小于9%的行业标准。NaI能量分辨率测试谱线如图9所示。

探测效率是评估SiPM-闪烁体探测器的又一重要指标,受到闪烁体的面积、厚度、密度等因素的影响。一般来说,探测器的探测效率越高,其信噪比和能量分辨率也会相应提高。最常使用的是全能峰效率,全能峰是指 γ 光子进入闪烁体后与闪烁晶体发生相互作用时损失全部能量,产生类似高斯分布的全能脉冲。全能峰效率 $\varepsilon_p(E_{\gamma})$ 是指对于能量为 E_{γ} 且

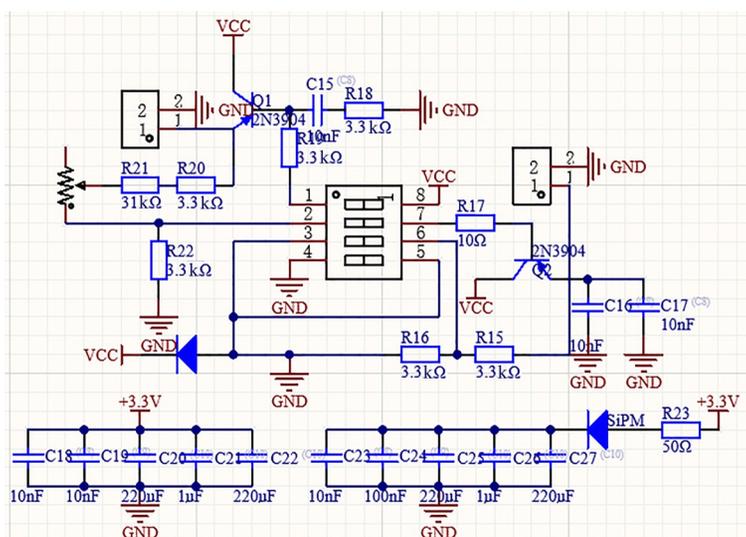


图8 温度补偿电源电路图

Fig.8 Temperature-compensated power supply circuit diagram

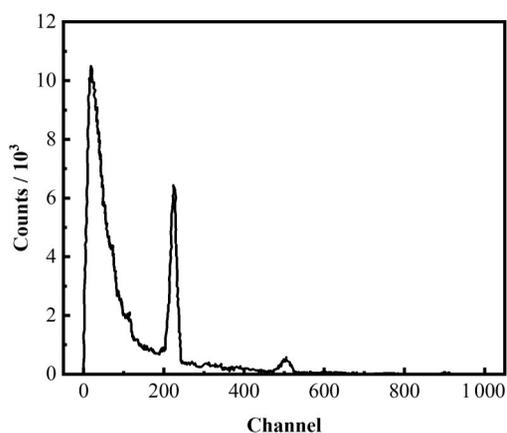


图9 NaI能量分辨率测试谱线

Fig.9 Spectral curve of NaI energy resolution test

各向同性的单能 γ 射线,全能峰内的光子数与放射源全部的 γ 光子数的百分比,如式(3)所示:

$$\varepsilon_p(E_\gamma) = \Omega \varepsilon_1(E_\gamma) \cdot R(E_\gamma) = \Omega \varepsilon_{ip}(E_\gamma) \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_p(E_\gamma)$ 为全能峰效率; Ω 为立体角; $\varepsilon_1(E_\gamma)$ 为本征效率; $R(E_\gamma)$ 为峰总比; $\varepsilon_{ip}(E_\gamma)$ 为本征全能峰效率。探测效率曲线如图10所示。

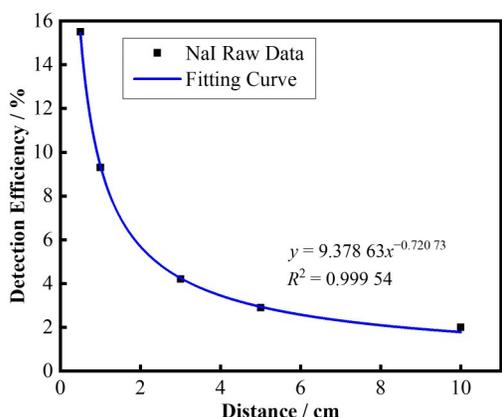


图10 NaI探测器的探测效率曲线

Fig.10 Detection efficiency curve of NaI detector

2.2 数据处理控制系统

STM32F103处理器具有较强的运算性能,支持三种不同的模式,每种模式都满足低功耗设计要求。数据处理控制系统设计采用STM32F103VET6作为核心处理器,内有32位Cortex的ARM微控制器,多个可供使用的IO(Input/Output)端口,3个16位定时器,2个I2C接口,5个USART(Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter)接口,2个SPI(Serial Peripheral Interface)同步串行接口,一个USB通信接口。通过设定不同的处理器工作模式,可以优化整个系统的功耗。

数据处理控制系统的主要功能是对采集到的信号进行处理、存储及数据传输,核心处理器对数字信号进行滤波、降噪等处理后,将采集的 γ 数据根据通信协议将数据封装成帧,存储在由SPI控制的2 M \times 8 bit FLASH存储器中,最终将数据及节点序号打包成数据包,核心处理器将打包好的数据发送给LoRa无线通信模块,经LoRa无线信号进行传输。接收端的LoRa无线通信模块将接收到的数据进行解码、去除校验码等处理后,将数据传输给接收端核心处理器^[10]。核心处理器可以通过IO端口控制蜂鸣器、LED灯来实现声光报警^[11]。

2.3 动态最优路径通讯算法

为解决终端节点因复杂电磁环境、传输距离等因素导致监测系统断线及终端节点与网关数据传输频繁时造成的信道拥堵问题,充分考虑协作通信的可用性^[12],综合最短路径长度及最大节点度,设计了动态最优路径通讯算法,通过筛选最优链路实现断线重连,以及优化队列调度缓解信道拥堵,减少进程的响应时间和周转时间。

终端节点上电后若与网关通信失败且达到自动重连上限,根据通信协议将自动搜寻邻居节点作为中继节点^[13],从中继节点的多条通信链路中筛选最优路径替换无法通信的链路,继而将数据传输至网关。如图11所示,终端节点B自动搜寻与之邻近且可用的终端节点A,此时终端节点A充当中继节点。筛选最优路径流程如下:首先将未标记的终端节点以无序的形式存放于未确定最短路径节点集中,数据量过大会限制计算速度,影响时效性,因此将未扫描的节点按其链路质量进行排序;随后设置List数组储存各点到达的权值,Boolean数组判断节点是否被确认过最短长度,int数组记录距离;然后断线的终端节点从未标记的节点中依次筛选最优节点直到选出最优路径。

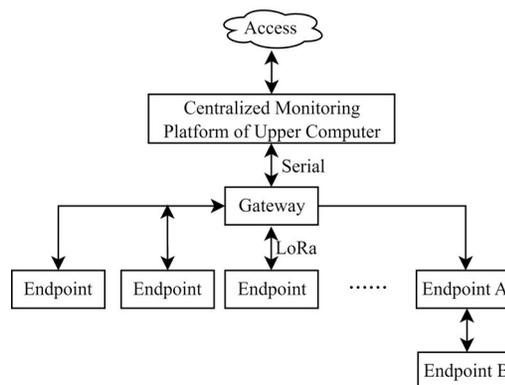


图11 中继节点示意图

Fig.11 Schematic diagram of relay node

发生信道拥堵时,对节点内部信道进行队列检测:若最高优先级队列空闲,则将所有进程调度至最高优先级队列;若最高优先级队列有进程未完成,则被调度至次高优先级队列,更新进程的执行时间,队列优先级依次降低。当进程被放至最低优先级队列后,将剩余进程根据所需的执行时间调度到对应队列,剩余执行时间越少的进程匹配到队列的优先级越高。

3 系统性能测试

3.1 信号强度测试

在远距离通信中,周围环境(如建筑、天气、电磁等)都会影响到通信效果,为满足实际需求,在中国科学院上海应用物理研究所进行测试,该研究所坐落于上海市科技卫星城(嘉定区),占地面积 $2.53 \times 10^5 \text{ m}^2$,其中绿地面积 $1.36 \times 10^5 \text{ m}^2$,绿地率达53.7%,植被长势好,且大树多,存在大量建筑物^[14]。采用相同传输速率和带宽,对仅由LoRa节点构建的系统与加入LoRa中继节点、结合动态最优路径通讯算法构建的系统分别进行入网测试,每一个节点对应唯一地址,在系统上电后,以1 s为周期发送入网请求帧,直到网关判断数据有效后,返回携带地址信息的应答帧到终端节点,完成入网。

节点入网请求帧数据传输方式设置为定向传输,以16进制数据显示。将入网请求帧分别发送给仅由LoRa节点构建的系统 and 加入LoRa中继节点、结合动态最优路径通讯算法构建的系统,在获得监测系统的应答帧时,同时接收到监测信号强度(Received Signal Strength Indication, RSSI)。设置多个节点由不同距离返回监测强度,经多次测试,节点入网信号强度对比如图12所示,加入LoRa中继节点、结合动态最优路径通讯算法构建的系统节点入网信号强度更稳定。

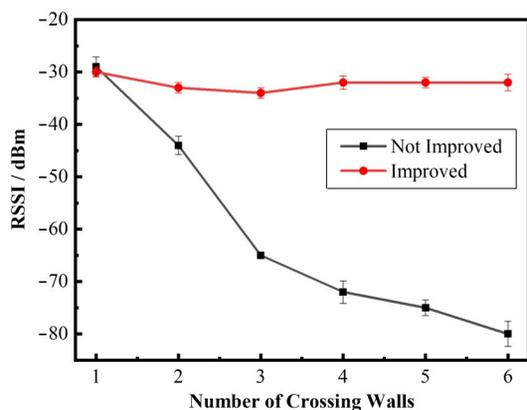


图12 节点入网信号强度对比

Fig.12 Signal strength comparison of node network access

3.2 稳定性测试

中继节点在系统中与发送端和接收端均能实现双向通信,网关会对接收到的数据进行循环冗余校验,判断是否有错误发生,当网关发现接收到的数据存在误码现象时,将含有该误码的包丢掉,接收终端就会出现整个包丢失的情况。

为测试系统传输的稳定性,以30 s为采样周期进行,LoRa终端沿最短路径持续向上位机发送数据。通过多次实验,计算得出接收数据的丢包率和误码率,丢包率是指数据传输过程中数据包丢失的比率,以一段时间内丢失的数据包数量与发送的数据包数量的比值作为衡量标准,公式如下:

$$PLR = \frac{P_l}{P_s} \times 100\% \quad (4)$$

式中:PLR(Packet Loss Rate)为丢包率; P_l 表示丢失的数据包数量; P_s 表示发送的数据包数量。误码率是衡量数据传输精准性的指标,是数据在网络信道上出现的错误,数据包的大小、误码的分布都会影响误码率,以一段时间内传输过程中的误码与所传输的总码数的比值作为衡量标准,公式如下:

$$BER = \frac{B_l}{B_s} \times 100\% \quad (5)$$

式中:BER(Bit Error Rate)为误码率; B_l 表示传输过程中的误码; B_s 表示传输的总码数,计算结果如表1所示。实验在1 000 m处取5组数据列出,计算其丢包率,结果如表2所示,在1 000 m外,随着距离的增加,无线通信的丢包率和误码率逐渐增大;在1 000 m范围内单次丢包率不高于0.43%。本系统数据传输稳定性不低于99.57%,与文献[15]中节点与网关通信距离为1 000 m时数据接收率为93.00%相比有所提升。

3.3 γ 辐射监测剂量测试

在探测器工作中,计数率和能谱是两个重要的参数,需要将其转换为剂量单位进行分析和比较。探测效率是指探测器在不同能量下探测器对放射性核素的检测效率,它受到探测器结构、辐射类型、探测器与辐射源之间的距离等多个因素的影响。因此,需要通过模拟方法获得计数模式标准曲线进行修正,探测器的计数率乘以探测效率曲线对应的比例系数,即可得到相应的剂量率。计数率是指探测器单位时间内接收到的辐射粒子数,通常以每秒计数(s^{-1})为单位。剂量率是指单位时间内辐射剂量的量,通常以每小时吸收剂量($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)为单位。计数率与剂量率关系如图13所示,标定10个参考点,直线拟合程度超过98%。

表1 LoRa通信性能测试结果
Table 1 LoRa communication performance test results

距离 Distance / m	终端节点发送速率 Terminal node transmission rate / kB	网关节点接收速率 Network joint point reception rate / kB	测试次数 Number of test	误码率 Error rate / %	丢包率 Packet loss probability / %
300	20	20	10 ⁹	0	0
500	20	20	10 ⁹	1.5	1
1 000	20	20	10 ⁹	2.2	1.2
1 500	20	20	10 ⁹	5	2.7
2 000	20	20	10 ⁹	8.5	5.1

表2 通信距离为1 000 m实验数据
Table 2 Communication distance was 1 000 m for the experimental data

实验编号 Number	终端节点发送速率 Terminal node transmission rate / kB	网关节点接收速率 Network joint point reception rate / kB	发送/组 Send / group	接收/组 Receive / group	丢包率 Packet loss probability / %
1	20	20	10 000	10 000	0.00
2	20	20	10 000	9 962	0.38
3	20	20	10 000	10 000	0.00
4	20	20	10 000	9 983	0.17
5	20	20	10 000	9 957	0.43
6	20	20	10 000	10 000	0.00
7	20	20	10 000	9 964	0.36
8	20	20	10 000	9 980	0.20
9	20	20	10 000	9 975	0.25
10	20	20	10 000	10 000	0.00

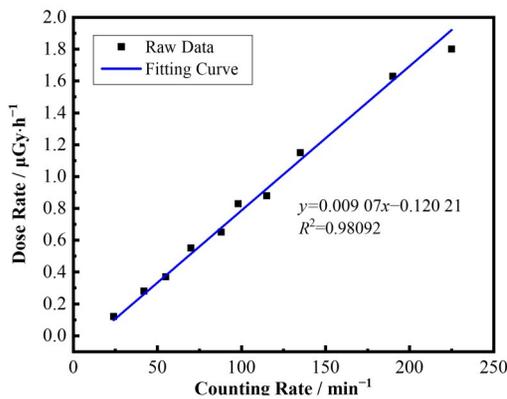


图13 计数率与剂量率关系
Fig.13 Relationship between counting rate and dose rate

按照《环境地表 γ 辐射剂量测定规范》(GB/T14583-93)^[16]的有关要求,将本监测系统置于中国科学院上海应用物理研究所及周边地区测试环境 γ 辐射空气吸收剂量率,选取10个测试点多次测试,结果如表3所示,中国科学院上海应用物理研究所园区及周边环境 γ 辐射空气吸收剂量率处于上海市室外天然辐射本底水平正常范围内。

表3 环境 γ 辐射空气吸收剂量率测量结果
Table 3 Results of air absorption dose rate measurement of ambient gamma radiation

监测点 Monitoring points	最大值 Max / $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$	最小值 Min / $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$	平均值 Average / $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$
1	0.075	0.072	0.073 5
2	0.078	0.071	0.074 5
3	0.076	0.072	0.074 0
4	0.077	0.073	0.075 0
5	0.078	0.071	0.074 5
6	0.076	0.072	0.074 0
7	0.074	0.070	0.072 0
8	0.076	0.072	0.074 0
9	0.075	0.071	0.073 0
10	0.073	0.070	0.071 5

3.4 中断机制测试

以1 min为周期进行辐射数据传输实验,网关收集到终端节点的数据,并通过串口传输给上位机,上位机集中监测平台实时显示。利用Fine Report编写上位机显示界面,如图14所示,断开1号、2号终端节点,节点自动开启动态重连算法,重连成功页面自动更新。

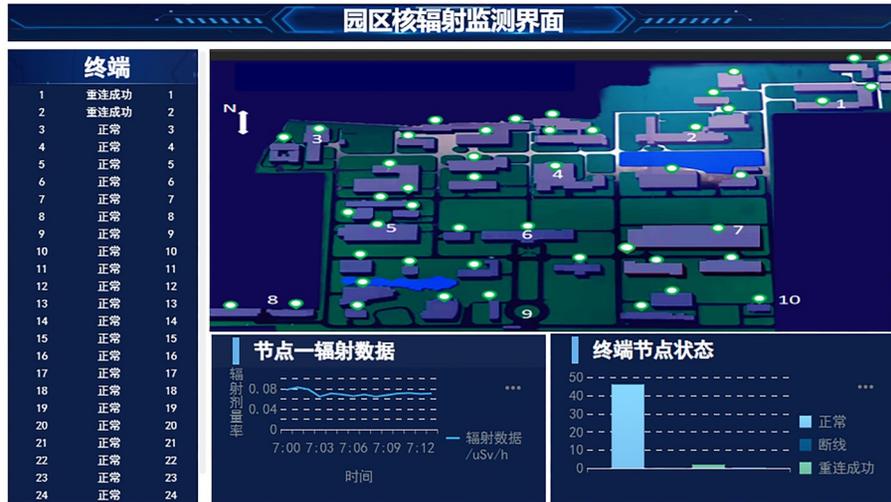


图14 上位机集中监控平台显示界面
Fig.14 Display interface of the upper-computer centralized monitoring platform

4 结语

基于环境辐射监测的特点,开展了 γ 辐射监测系统设计与分析。通过对比、总结相关核辐射监测系统的特点,结合实际情况,针对有线核辐射监测系统布线复杂、施工周期长、成本较高、且移动性差、故障排查较困难等问题,结合SiPM-闪烁体探测器,构建了基于LoRa无线通信技术的 γ 辐射监测系统,具备监测、数据传输、报警、自动重连等功能。对其主要性能进行测试,证明节点入网信号强度较强,可稳定连续工作,实现了对 γ 辐射剂量的准确测量。可以应用在范围广、远距离的区域环境辐射监测。实验结果表明,本系统的传输稳定性达到99.57%以上,实现了系统稳定性的提高和系统监测范围的有效延伸。

作者贡献声明 张迪、程懋松负责研究的提出及设计;张迪负责实验数据的收集及整理;程懋松、戴志敏负责项目的监督和管理;张迪、程懋松、施成龙负责文章的起草及最终版本的修订。

参考文献

- 郭承站. 我国核与辐射安全监管现状及对策[J]. 核安全, 2013, 12(S1): 1 - 14. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2013.s1.002.
- GUO Chengzhan. The Current status and countermeasures of nuclear and radiation safety regulation in China[J]. Nuclear Safety, 2013, 12(S1): 1 - 14. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2013.s1.002.
- 许可. 核辐射探测仪器和技术的发展趋势[J]. 科技创新导报, 2016, 13(34): 68 - 69. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-

098X.2016.34.068.

- XU Ke. Development trend of nuclear radiation detection instruments and technologies[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 13(34): 68 - 69. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2016.34.068.
- 刘翎箭. 基于硅光电倍增管的 γ 闪烁谱仪研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2017.
- LIU Lingjian. Study on γ -scintillation spectrometer based on silicon photomultiplier tube[D]. Hengyang: University of South China, 2017.
- 盖昊宇, 张震, 朱炼, 等. 基于LoRa技术的半导体厂房环境实时监测系统[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2022, 38(4): 14 - 19. DOI: 10.3969/j.issn.1007-984X.2022.04.003.
- GAI Haoyu, ZHANG Zhen, ZHU Lian, *et al.* Design of semiconductor plant environment real-time monitoring system based on LoRa technology[J]. Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition), 2022, 38(4): 14 - 19. DOI: 10.3969/j.issn.1007-984X.2022.04.003.
- Sinha R S, Wei Y Q, Hwang S H. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT[J]. ICT Express, 2017, 3(1): 14 - 21. DOI: 10.1016/j.ict.2017.03.004.
- 陈琛. 基于ZigBee的区域环境核辐射监测系统[D]. 衡阳: 南华大学, 2014.
- CHEN Chen. Regional environmental nuclear radiation monitoring system based on ZigBee[D]. Hengyang: University of South China, 2014.
- 王鲍. 基于SiPM的 γ 探测器设计与实现[D]. 抚州: 东华理工大学, 2022. DOI: 10.27145/d.cnki.gghddc.2022.000394.

- WANG Bao. Design and implementation of gamma detector based on SiPM[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2022. DOI: 10.27145/d.cnki.ghddc.2022.000394.
- 8 刘翎箭, 许浒, 陈祥磊, 等. 硅光电管-闪烁体探测器 γ 谱仪研制[J]. 核电子学与探测技术, 2016, **36**(10): 1049 - 1052. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.10.014.
- LIU Lingjian, XU Hu, CHEN Xianglei, *et al.* Development of gamma-ray spectrometer based on SiPM-scintillation detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, **36**(10): 1049 - 1052. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.10.014.
- 9 张健雄, 张进, 姚洪略. 一种便携式天然 γ 能谱测量仪及其稳谱原理[J]. 核技术, 2005, **28**(8): 637 - 640. DOI: 10.3321/j.issn:0253-3219.2005.08.016.
- ZHANG Jianxiong, ZHANG Jin, YAO Honglue. A portable natural gamma spectrometer with a special spectrum-stabilization technique[J]. Nuclear Techniques, 2005, **28**(8): 637 - 640. DOI: 10.3321/j.issn:0253-3219.2005.08.016.
- 10 蒋盼盼, 李焯, 王亚刚. 基于无线传感器网络的核辐射监测系统[J]. 信息技术, 2014, **38**(2): 113 - 116. DOI: 10.13274/j.cnki.hdzt.2014.02.017.
- JIANG Panpan, LI Ye, WANG Yagang. Design of nuclear radiation monitoring system based on wireless sensor network[J]. Information Technology, 2014, **38**(2): 113 - 116. DOI: 10.13274/j.cnki.hdzt.2014.02.017.
- 11 杨松, 张晓泉, 邓长明, 等. 便携式多功能辐射检测仪设计[J]. 核技术, 2022, **45**(11): 110403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110403.
- YANG Song, ZHANG Xiaoquan, DENG Changming, *et al.* Design of portable multi-function radiation detection system[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(11): 110403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110403.
- 12 郑弈, 谢亚琴. 基于Dijkstra算法改进的飞行器航迹快速规划算法[J]. 电子测量技术, 2022, **45**(12): 73 - 79. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2208918.
- ZHENG Yi, XIE Yaqin. Improved fast aircraft path planning algorithm based on Dijkstra algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, **45**(12): 73 - 79. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2208918.
- 13 巫朋键, 高飞, 邢传玺, 等. 无线网络协作路由算法设计与分类综述[J]. 通信技术, 2018, **51**(6): 1239 - 1247. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0802.2018.06.001.
- WU Pengjian, GAO Fei, XING Chuanxi, *et al.* A overview on design and classification of cooperative routing algorithms for wireless networks[J]. Communications Technology, 2018, **51**(6): 1239 - 1247. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0802.2018.06.001.
- 14 葛秀萍, 严培明, 朱培华, 等. 单位景观改造方法初探: 以中国科学院上海应用物理研究所景观改造为例[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2006, **24**(1): 104 - 107. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9964.2006.01.022.
- GE Xiuping, YAN Peiming, ZHU Peihua, *et al.* Study on reconstruction of landscape in corporation-a case of Shanghai institute of applied physics, Chinese academy sciences[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science), 2006, **24**(1): 104 - 107. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9964.2006.01.022.
- 15 严朝阳, 方飞, 曹侯, 等. 基于LoRa的物联网数据传输系统研究与设计[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, **33**(3): 354 - 363. DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.201906050214.
- YAN Zhaoyang, FANG Fei, CAO Bin, *et al.* Research and design of Internet of Things data transmission system based on LoRa[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, **33**(3): 354 - 363. DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.201906050214.
- 16 国家环境保护局, 国家技术监督局. 环境地表 γ 辐射剂量率测定规范: GB/T 14583—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China, State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Norm for the measurement of environmental terrestrial gamma-radiation dose rate: GB/T 14583—1993[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.