

基于LoRa和GPRS的山区输电线路监测信号无线传输方案

刘宇¹, 胡上茂², 刘刚², 胡泰山², 廖民传²

(1. 广州供电局有限责任公司, 广州 510630; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510000)

摘要:文中针对偏远山区输电线路状态监测系统巡检与维修难度较大的现状,提出一种基于LoRa的山区输电线路在线监测方案。根据LoRa无线传输的特性以及山区监测环境,设计了基于GPRS和LoRa的山区输电线路传输架构。利用多目标优化算法优化山区输电线路拓扑结构中的LoRa传输分组并平衡传输模块的通信延时与传输能耗。仿真实验结果表明,监测系统数据传输成功率最高可达99%。与国内外现有输电线路状态监测系统相比,所提方案具有高可靠性传输、低成本以及长期监测的优点,适用于山区输电线路监测信号。

关键词:山区输电线路; 在线监测; LoRa动态分组; 多目标优化算法

Wireless Transmission Scheme of Transmission Line Monitoring Signals in Mountainous Area Based on LoRa and GPRS

LIU Yu¹, HU Shangmao², LIU Gang², HU Taishan², LIAO Minchuan²

(1. China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510630, China; 2. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: In view of the difficult patrol inspection and maintenance of condition monitoring system of transmission line in remote mountainous areas, a kind of on-line monitoring scheme for transmission lines in mountainous areas based on LoRa is proposed in this paper. According to the characteristics of LoRa wireless transmission and monitoring environment in the mountainous area, the transmission architecture of mountainous transmission line based on GPRS and LoRa is designed. The multi-objective optimization algorithm is used to optimize the LoRa transmission group in the linear topology of mountainous transmission lines and balance the communication delay and transmission energy consumption of transmission module. The simulation experimental results show that the data transmission success rate of the monitoring system is up to 99%. The proposed proposal, compared with the existing monitoring system of transmission line both at home and abroad, has such advantages as high reliability transmission, low cost and long-term monitoring, and is suitable for transmission line monitoring signals in mountainous areas.

Key words: transmission line in mountainous area; on-line monitoring; LoRa dynamic grouping; multi-objective optimization algorithm

0 引言

电网是国民经济重要的基础设施,输电线路是电网的重要组成部分^[1],电网输电的可靠性在很大程度上取决于输电线路工作状态的可靠性。在建立高效电力物联网的过程中相比于人口密集的城市地区,偏远山区因地理位置特殊,监测及运维

难度大,提供精准的输电线路及其周边地质稳定情况监测数据尤为重要,对监测与运维方案的成本控制起着决定性作用。

传统输电线路检测采用人工巡检方式,这种方式不仅费时费力,而且准确性较低。文[2-4]提出使用机器人与无人机方式自动巡检线路,相比于人工巡检方式具有成本低、速度快等优点,但无法对输

收稿日期:2022-09-13; 修回日期:2022-11-17

基金项目:南方电网公司科技项目(ZBKJXM20190058);国家自然科学基金资助项目(51767006)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid(ZBKJXM20190058), National Natural Science Foundation of China(51767006)。

电线路状态进行实时监测且在山区环境下难以正常工作。输电线路在线监测系统的出现弥补了输电线路状态监测实时性的不足,通常分为有线监测与无线监测。有线通信技术虽然具有容量大、速率快等优点^[5-6],然而在山区环境下昂贵的前期安装和后期维护成本限制了其进一步发展。无线传输技术拥有传输距离远、网络建设成本低等优点,文[7]提出基于移动蜂窝网络的输电线路在线监测技术,该技术具有无线传输范围广、速率高、容量大等优点^[8],然而移动蜂窝网络的通信成本昂贵,且该网络无法覆盖整条输电线路,在部分环境恶劣的偏远山区几乎无法传输数据。无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)作为一种全新的信息获取和处理技术,凭借其部署简单、布置密集、低成本、通信免费和无需现场维护等优点,自其出现便迅速取代常用的状态监测方法。在输电线路状态监测领域,国内外也开展了大量基于WSN技术的导线舞动^[9]、覆冰预警^[10]、杆塔倾斜^[11]等在线监测技术研究,然而WSN技术的传输距离短,模块寿命低,难以适用于山区输电线路长期监测。

低功耗广域网(low power wide area network, LPWAN)是一种新兴的物联网通信技术,是移动蜂窝技术与WSN的互补。与WSN相比,LPWAN技术的工作寿命更长(可达10年),通信距离更大(可达10 km)^[12],因此被认为是5G物联网时代的主流通信技术^[13]。窄带物联网(NB-IoT)和远程无线电(LoRa)是LPWAN的两种典型技术。NB-IoT建立在蜂窝网络上,在授权频谱中工作^[14];LoRa工作在未授权频谱中,可构建自组通信网络^[15]。文[16]提出了一种基于LoRa的海上监测系统,实现了最大传输距离为8.33 km的高可靠传输。虽然NB-IoT可以提供更高的服务质量^[17],但由于蜂窝移动网络存在通信盲区的问题,LoRa比NB-IoT更适合在山区输电线路监测系统。文[18]提出了一种蜂窝移动网络和LoRa相结合的信息监控方法,不仅提高了传输距离,而且降低了监控系统的运行成本,但是其通信架构依赖移动蜂窝网络,不适用于山区监测环境。相比于平原输电线路监测方案,山区输电线路监测方案在方案选择、测量精度、日常监测运行维护、实施等方面存在较大差异^[19]。单一的通信方式与工作模式难以满足山区输电线路在线监测系统的要求^[20]。

文中提出了一种基于LoRa的山区输电线路在线监测方案。针对不同的故障率,提出了山区输电线路的3个监测状态。根据系统能耗和时延要求,设计了基于LoRa和GPRS混合网络的山区输电

路在线监测架构。通过采用多目标优化算法对系统的能耗和时延进行优化,得到适合于山区监测的工作模式,通过工作模式之间的转换不仅加强了数据传输的稳定性,而且能有效降低系统能耗以延长系统使用寿命,实现长期稳定监测。

1 监测系统方案设计

根据对山区输电线路故障率的分析^[21-22],文中定义了3种山区输电线路监测状态:低风险状态、高风险状态和故障维修状态。输电线路在线监测系统故障发生率低时,系统进入低风险状态;故障发生率高时进入高风险状态;当输电线路已确认发生故障,正在等待定位检修时为故障维修状态。显然,3种监测状态对通信质量的要求不同,单一工作模式的监测系统无法解决系统的数据传输问题。

文中提出了一种山区输电线路在线监测系统并根据山区监测环境建立了监控系统的时延模型、能量模型和路径损耗模型见图1。通过多目标优化算法可以得到平衡时延和能量的最优解。将基于路径损耗模型建立的LoRa传输模型与优化算法的最优解相结合,得到LoRa动态分组模型。最后,将不同监测状态的通信需求输入到LoRa动态分组模型中可得到适用于各个监测状态的组网方式。

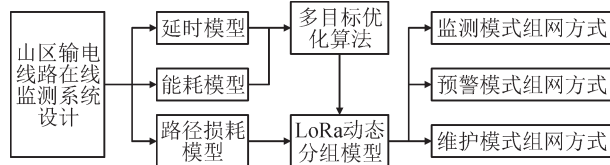


图1 系统方案设计流程

Fig. 1 System scheme design process

文中根据山区环境使用了1种3层混合网络搭建山区输电线路在线监测架构。第1层网络传输主要采用LoRa作为低成本,低速率链路的无线传感器网络,利用GPRS组成第2层中价位高但数据速率高的数据传输网络;第3层利用现有的SCADA链路在变电站和监控中心之间进行通信,并利用GPRS网络将数据从某些传输塔直接传输到控制中心。

输电线路监测网络架构见图2,该网络架构由监控中心、变电站与输电杆塔组成,监测网络中LoRa主要负责汇聚数据,将输电杆塔的传感器信息传输至汇聚节点;GPRS主要负责传输汇聚数据,减缓汇聚节点在后续传输中的数据累积,使用高服务质量的网络传输以降低系统的延时;监控中心汇总的输电杆塔信息主要由变电站和GPRS获得,监控中心拥有庞大的计算资源,能够高效处理和分析数

据并下发控制指令,最终将数据与分析结果呈现给用户。

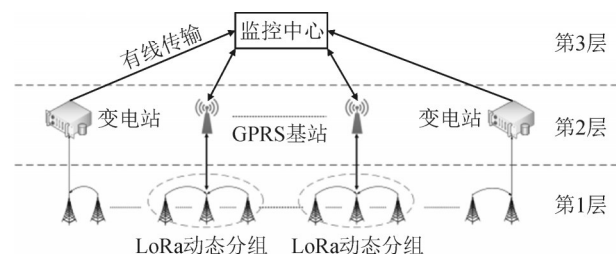


图2 山区输电线路监测网络架构

Fig. 2 Monitoring network structure of transmission line in mountainous area

2 模型建立

2.1 路径损耗模型

Okumura-Hata模型主要以准平坦地形大城市地区的场强中值路径损耗作为基准,对不同的传播

$$\alpha(h_m) = \begin{cases} (1.1 \lg f - 0.7)h_m - (1.56 \lg f - 0.8) & \text{中、小型城市} \\ 8.29(\lg 1.54h_m)^2 - 1.1 & \text{当 } f \leq 300 \text{ MHz, 大城市} \\ 3.2(\lg 11.75h_m)^2 - 4.97 & \text{当 } f > 300 \text{ MHz, 大城市} \end{cases} \quad (2)$$

C_{cell} 是区域类型校正因子,具体参数为

$$C_{\text{cell}} = \begin{cases} 0 & \text{城市} \\ -2(\lg f/28)^2 - 5.4 & \text{郊区} \\ -4.78(\lg f) - 18.33 \lg f - 40.98 & \text{开阔地区} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 网络分组模型

将输电线路架构设计进行数学建模,通过算法找出在满足规定延时条件下GPRS无线传输模块的最佳安装位置与使用数量,并能在不同的系统能耗与延时的约束下实现不同的组网方式,实现LoRa动态分组与系统工作模式的转换。

将网络架构图建模为数据有向图见图3,靠近变电站的输电杆塔能够直接通过LoRa传输模块实现端到端数据传输,因此该有向图主要考虑需要通过GPRS模块传输数据的输电杆塔。假设一条输电线路包含 N 个输电线路杆塔,其中 i 代表输电杆塔间的端到端数据传输链路, j 代表杆塔通过GPRS通信的数据传输链路,因此,任意一个数据传输链路都可表示为向量 (i, j) , P 是所有无线传输通信链路的集合,即所有的通信链路向量 (i, j) 都包含在 P 中, $\forall (i, j) \in P$ 。本模型的目的是为每个使用的通信路径找到一个可行的通信链路,并使所有链路多产生的延时最小,同时考虑每个链路的成本约束。

首先,需要限制任何一个使用的通信链路中产生的延时限制为小于或者等于需要的最大通信延时,见式(4)

$$\sum_{(i,j) \in P} D_{i,j,k} M_{i,j,k} \leq D_{\max} \quad \forall k \in N \quad (4)$$

环境和地形条件等因素用校正因子加以修正,适用于工作频率在150~1500 MHz范围内,传播距离在1~20 km,发射器天线高度范围在30~200 m的无线信号路径损耗的计算。当前,国家电网输电线路中输电杆塔塔高为10~40 m,各杆塔之间距离在0.5~1.5 km,LoRa的无线传输距离为2~8 km。因此,Okumura-Hata模型适用于计算LoRa在输电线路上的路径损耗。

Okumura-Hata模型的路径损耗公式为

$$L_b = 69.55 + 26.16 \lg f - 13.82 \lg h_b - \alpha(h_m) + (44.9 - 6.55 \lg h_b) \lg d + C_{\text{cell}} \quad (1)$$

式(1)中: f 为无限信号的工作频率; h_b 与 h_m 分别是发射器天线与接收器天线的高度; d 表示发射器天线与接收器天线之间的水平距离; $\alpha(h_m)$ 为天线修正因子,其主要与工作频率以及收发距离等因素有关,具体关系为

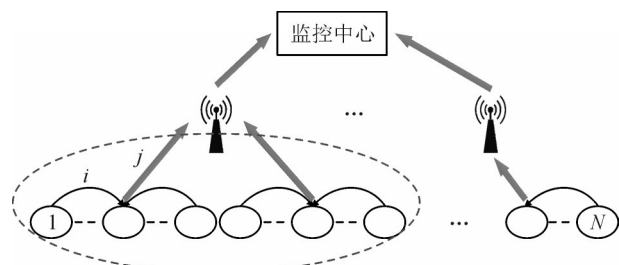


图3 网络数据传输有向图

Fig. 3 Principle of wireless signal diffraction

式(4)中: $D_{i,j,k}$ 表示通信节点 k 使用数据链路 (i, j) 是产生的延迟; $M_{i,j,k}$ 为二进制变量,如果节点 k 使用数据链路 (i, j) 为通信链路,则 $M_{i,j,k}=1$,否则为0; $D_{\max}$ 代表系统管理员要求的最大传输延时。

$$\sum_{i=1}^N (G_i - L_i) \leq 0 \quad (5)$$

式(5)确保无论采用任何传输方式都存在使用GPRS模块的杆塔。其中 G_i 和 L_i 为二进制变量,如果第 i 号杆塔使用GPRS模块,则 $G_i=1$,否则为0;若第 i 号杆塔使用LoRa传输模块,则 $L_i=1$,否则为0。

$$M_{i,j,k} - O_{i,j} \leq 0 \quad \forall (i,j) \in P, \forall k \in N \quad (6)$$

式(6)确保每一条通信链路在重复使用的同时,链路成本最多被计算一次。其中 $O_{i,j}$ 为二进制变量,如果数据传输链路 (i, j) 被使用, $O_{i,j}=1$,否则为0。

$$M_{i,j,k}, L_i, G_i, O_{i,j} \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in P, \forall k \in N \quad (7)$$

式(7)确定决策变量 $M_{i,j,k}$, G_i , L_i 以及 $O_{i,j}$ 为二进制变量。

网络的延时函数由式(4)~(7)组成,式中的二进

制变量均为决策变量, O_{ij} 表示该链路至少被一个节点使用, 其中可能是 $L_i=1$, 即使用 LoRa 传输, 也可能是 $G_i=1$, 即使用 GPRS 传输。如果节点 k 选择链路 (i, j) 作为其传输路径时, $M_{ijk}=1$, 而当有延时约束时, 第 i 号输电杆塔的 GPRS 传输路径 j 使用频率明显多于其他输电杆塔, 则必须在此杆塔安装 GPRS 模块。所以网络延迟函数见式(9):

$$D(M_{ijk}, L_i, G_i, O_{ij}) \quad \forall (i, j) \in P, \forall k \in N \quad (8)$$

$$E(G_i, L_i) = \sum_{i=1}^N (dG_i + bL_i) + \sum_{(i,j) \in P} C_{ij} O_{ij} + L_b \quad (9)$$

式(8)、(9)中: $f(G_i, L_i)$ 为网络能耗函数; d 和 b 分别代表单个 GPRS 模块和 LoRa 传输模块的能耗; C_{ij} 表示数据链路 (i, j) 上产生的通信能耗。该能耗函数主要包括传输模块能耗与无线通信能耗, 其中无线通信能耗中必定包含路径损耗函数 L_b 。如式(10)所示, 系统能耗是整个运营期内用于数据传输的所有通信能耗和在选定塔上安装 LoRa 传输模块或 GPRS 模块的能耗以及路径损耗之和。

由上述公式可知山区输电线路 LoRa 动态组网模型见式(10)

$$F[D(i, j, k), E(i, j)] \quad \forall (i, j) \in P, \forall k \in N \quad (10)$$

2.3 多目标优化算法

多目标优化问题的数学模型可描述为

$$\begin{cases} \min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_Q(x)]^T \\ \text{s.t. } g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, M \\ x^L \leq x \leq x^U \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: $f(x)$ 为目标函数; $g(x)$ 为约束函数; Q 和 M 为目标函数和约束函数的数量; x^L 和 x^U 为设计变量 x 的上下限。网络设计中, 设计变量往往存在波动和不确定性, 相比确定性优化, 可靠性优化可以减小响应的波动, 使确定性优化解远离约束条件边界, 降低响应在设计点上的敏感度。基于可靠性优化的数学模型可以描述为

$$\begin{cases} \min \mu(f_q(x)) & q = 1, 2, \dots, Q \\ \text{s.t. } P(g_j(x) \leq 0) \geq R_j & j = 1, 2, \dots, M \\ x^L \leq x \leq x^U \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: μ 为目标函数均值; $P(g_j(x) \leq 0)$ 为满足第 j 个约束的概率; R_j 为约束函数的期望可靠度^[23]。

将网络分组模型中的延时约束与能耗约束输入到多目标优化算法中, 得到的最优解集可通过加权分析进一步得到最佳组网参数。

3 仿真测试与分析

文中以中国西南山区某 500 kV 同塔双回线路为实验目标, 该输电线路铁塔位于 60 mm 重冰区段

高山阴坡面, 最高海拔 2 600 m, 线路周边植被茂密, 常年雨雾笼罩, 视线不良, 线路监测可选路径有限。假设输电杆塔间固定相隔 1 km, 每个输电杆塔上安装一传感器组, 实验使用的 LoRa 模块的传输速率为 5~30 kb, 传输距离为 1~5 km, 传输距离与传输速率成反比, 使用的蜂窝无线传输模块传输速率为 100 Mb/s, 传输距离不计, 蜂窝链路因状态转换延迟、访问延迟和切换等而产生的延迟取 50 ms^[24]。

实验仿真中根据第 2 节中建立 Okumura-Hata 的数学模型, 分别以开阔地区、郊区、城市地区以及山区进行仿真分析。设置的 LoRa 工作频率为 474 MHz, 收发天线高度为 40 m, 发射功率为 27 dBm, 发射天线与接收天线增益分别为 5 dB 和 2 dB, 馈线损耗为 0.5 dB。将上述的仿真参数带入式(1)~(3)来评估输电线路杆塔在应用 LoRa 传输模块组网时的路径损耗, 通过实验仿真得到的路径损耗与 LoRa 发射端与接收端之间距离的关系见图 4。

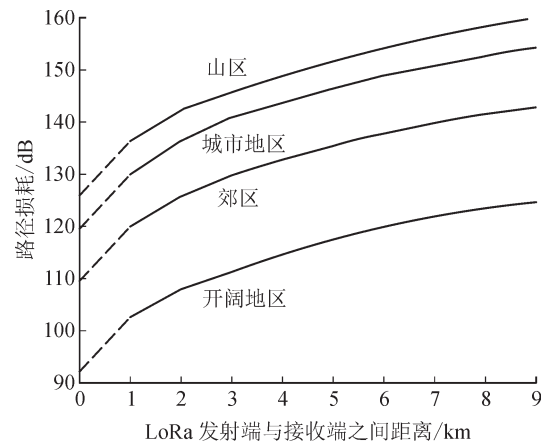


图4 Okumura-Hata模型路径损耗曲线

Fig. 4 Path loss curve of Okumura-Hata model

当 LoRa 发射器与接收器之间的距离小于 1 km 时, Okumura-Hata 模型计算的路径损耗易受电磁干扰的影响而出现较大波动, 因此文中在实验中以线性回归分析距离小于 1 km 的路径损耗并以虚线标出。由图 4 所示, 山区环境中, LoRa 信号的传输容易受到电磁干扰、山体遮挡以及植被反射和吸收等因素的影响, 路径损耗实际高于任何区域类型, 因此, 文中通过 MATLAB 软件中的 Simulink 的曲线拟合工具箱, 在确定天线修正因子 $\alpha(h_m)$ 不变的情况下, 得到区域类型校正因子 C_{cell} 的误差拟合式为

$$C_{cell} = 1.32(\lg f) + 7.62 \quad (13)$$

在进行多目标优化时, 将延时模型与能耗模型作为个体进行优化, 仍然以最大延时和瓶颈能量作为延时模型和能耗模型的体现, 采用 MATLAB 2016a 软件建立仿真平台来计算最优解集, 得到解集图见图 5。

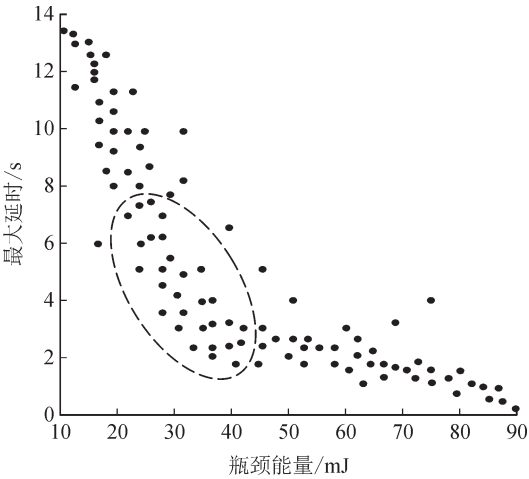


图5 多目标优化解集

Fig. 5 Solution set of multi-objective particle swarm optimization

如图5所示,延时模型与能耗模型之间存在着矛盾关系,也可称之为最大延时与瓶颈能量呈反比,但在多目标优化中不存在单目标最优的情况,需要权衡延时和能耗并找出符合目标函数的最优解集,通过对延时模型和能耗模型的优化,圈中即为所需的最优解集。

为在系统时延和能量消耗的最优解集中找到适合上述3种监测状态的参数,需要对系统的通信收益进行评估。因此,文中采用间接约束优化方法,通过引入权重 ω 来构造目标函数。通信收益函数可以表示为

$$Q(x_k)=\sqrt{\omega D(x_k)^2+(1-\omega)E(x_k)^2} \quad k\in N \quad (14)$$

为了分析监测模式、预警模式以及维护模式中权重 ω 对多目标算法中最优解集的影响,文中采用SX1272CalculatorUI模拟仿真软件进行不同 ω 下网络参数以及最大延时和瓶颈能量的变化。结果见表1。

表1 不同权重 ω 下网络参数监测节点传感器参数

Table 1 Sensor parameters of network parameters monitoring node under different weights ω

权重 ω	SF	BW/kHz	传输距离/km	D_M/S	E_B/mJ	$Q(x_k)$
0.1	12	125	1.0	9.22	12	10.84
0.2	11	125	1.5	5.10	16	13.62
0.3	10	125	2.0	2.83	25	24.84
0.4	8	125	2.6	0.93	34	25.56
0.5	7	125	3.0	0.54	48	33.23
0.6	8	250	3.5	0.47	50	32.27
0.7	6	125	4.0	0.33	61	32.87
0.8	7	250	4.5	0.28	71	31.32
0.9	6	250	5.0	0.16	75	24.04

由表1得出的结果,根据文[20]的要求,在国家电网可接受的延时范围内,将最低瓶颈能量的权重 $\omega=0.2$ 选定为监测模式的权值,增益函数值最大的权重 $\omega=0.5$ 为预警模式的权值,系统最大延时最低的权重 $\omega=0.9$ 为维护模式的权值。在选定工作模式的权值后使用OMNET++网络仿真工具对输电线路传输网络进行仿真,结果见图6。

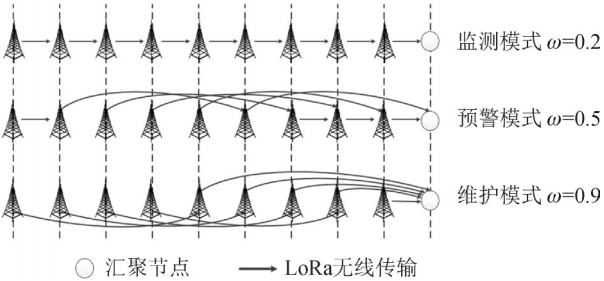


图6 不同工作模式下的系统组网方式

Fig. 6 System networking mode under different working modes

从图6可以看出,当 $\omega=0.2$ 时,系统优先考虑能耗约束,为了达到最小的能量消耗,每个终端节点必须选择最短的通信路径。因此,监控模式的组网方式为LoRa逐点传输。当 $\omega=0.9$ 时,系统优先考虑延迟约束,为了最小化时延,终端节点增加了蜂窝移动传输功能,每个终端节点以最大传输距离进行点对点传输。因此,系统在维护模式下的组网方式是GPRS和LoRa点对点传输的混合传输模式。当 $\omega=0.5$ 时,系统同时考虑了时延和能耗约束,为了获得最高的系统收益,每个终端节点通过LoRa多跳传输方式向具有GPRS传输功能的终端节点发送数据。因此,预警模式下系统的网络模式是GPRS和LoRa多跳传输的混合传输模式。

无线通信中,丢包率表示数据通信过程中数据包丢失的数量与发送的数据包数据之间的比率,丢包率与数据包长度、数据发送频率以及通信距离有关,是检测无线网络数据传输性能的一项重要指标。在同时发送1 000个16字节数据包的情况下对3种系统工作模式经行测试,测试结果见表2。测试结果表明通过3种工作模式的转换能够将系统传输丢包率控制在5%以内。

由表2实验结果表明,监控模式的丢包率最高,达到6%,而维护模式的丢包率最低,仅为1%。文中提出的监控系统可以根据监控状态改变工作模式。监控模式虽然丢包率高,但通信质量需求低,数据在规定的延迟内可以成功传输;维护模式的通信质量高,因此系统的丢包率最低,可达到99%的通信成功率,可以满足系统的通信要求。

表2 3种系统工作模式通信测试结果

Table 2 Communication test results of three working modes of the system

工作模式	通信距离/km	接收数据包	丢包率/%
监测模式	1.5	940	<6
	1.5	957	<5
	1.5	959	<5
预警模式	3.0	982	<3
	3.0	985	<3
	3.0	980	<3
	5.0	998	<1
维护模式	5.0	997	<1
	5.0	995	<1

以2011—2013年中国国家电网西南山区输电线路年跳闸率的数据分析文中提出的在线监测系统的通信质量与能耗得到优化结果。若3年内西南山区每100 km的输电线路跳闸次数平均为0.188,综合分析山区气象信息以及实验中收集的温湿度数据的时空分布后,文中优化方法的监测模式、预警模式和维护模式的工作时间占比为83%:13%:4%。文中提出的基于LoRa的山区在线监测系统与其他在线监测系统的对比见表3。

表3 不同在线监测系统性能对比

Table 3 Performance comparison of different on-line monitoring systems

在线监测系统	平均通信成功率/%	通信收益	终端寿命/a
文[25]	99.98	5.44	8.00
文[26]	98.95	17.63	11.00
文中	98.54	16.59	16.31

文中以通信成功率、通信收益以及终端寿命为在线监测系统的评价指标。文[25–26]提出的在线监测系统都采用单一工作模式,所以其系统通信收益函数中的权重 ω 都取0.5。通过对比可知,虽然文中提出的在线监测系统的平均通信成功率不如文[25–26]中通过移动蜂窝和WSN组成的在线监测网络,但是文中提出的在线监测系统拥有灵活更换工作模式的功能,能够在任意监测时段满足系统的通信需求。不仅能够弥补系统平均通信成功率不如文[25–26]中通过移动蜂窝和WSN组成的在线监测网络的不足,而且能使系统的通信收益达到最高。由于文中所提的在线监测系统83%的时间工作在低功耗的监测模式,所以系统总共能耗消耗最低,因此终端使用寿命可长达16.31年。通过分析可知,文中所提的基于LoRa的在线监测系统在山区环境输电线路监测方面性能优异。

4 结语

文中针对偏远山区输电线路状态监测系统巡检与维修难度较大的现状,首次提出一种基于LoRa和GPRS的山区输电线路长期在线监测方案。根据不同故障率提出3种山区输电线路监测时段,并依据能耗与延时的要求设计了基于LoRa与GPRS的山区输电线路在线监测架构,建立的LoRa动态分组组网模型可实现不同监测时段下不同的组网模式;最后利用多目标算法优化系统能耗与延时,得出适用于3种监测时段的工作模式。文中提出的监测方案能够自适应山区输电线路监测环境并选择最佳的状态监测工作模式,在可靠传输监测数据的同时最小化监测系统能耗,实现了山区输电线路长期监测的目标。仿真实验结果表明,通过工作模式之间的转换监测系统数据传输成功率最高达到99%,监测系统寿命可达16.31年,与国内外现有输电线路状态监测系统相比,所提方案具有在山区环境高可靠性传输、高通信收益以及长期监测的优点。

参考文献:

- [1] 李岩,滕云,冷欧阳,等.数据驱动的输电线路在线监测装置可靠性评估[J].中国电机工程学报,2018,31(15):4410-4419.
LI Yan, TENG Yun, LENG Ouyang, et al. Reliability evaluation of on-line monitoring device over transmission line based on data driven concept[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 31(15):4410-4419.
- [2] JIANG S, JIANG W, HUANG W, et al. UAV-based oblique photogrammetry for outdoor data acquisition and offsite visual inspection of transmission line[J]. Remote Sensing, 2017, 9(3):278.
- [3] 黄山,吴振升,任志刚,等.电力智能巡检机器人研究综述[J].电测与仪表,2020,57(2):31-43.
HUANG Shan, WU Zhensheng, REN Zhigang, et al. Review of intelligent inspection robot for electric power[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(2): 31-43.
- [4] ZHAO X, TAN M, HUI X, et al. Deep-learning-based autonomous navigation approach for UAV transmission line inspection[C]//IEEE international conference on advanced computational intelligence.[S.l.]:IEEE, 2018:455-460.
- [5] 施孟佑,秦开宇,李凯,等.高压输电线路多无人机自主协同巡线设计与测试[J].电力系统自动化,2017,41(10):117-122.
SHI Mengjie, QIN Kaiyu, LI Kai, et al. Design and test of high voltage transmission line inspection by multi UAVs[J].

- Power System Automation, 2017, 41(10): 117-122.
- [6] BOUCOUVALAS A C, PAPAGEORGIOU C, GEORGANTZOS E, et al. Elliptical fibre dielectric waveguides: A transverse transmission line analysis[J]. IET Optoelectronics, 2020, 14(1): 1-9.
- [7] LAZAROPOULOS A G. Wireless sensor network design for transmission line monitoring, metering, and controlling: Introducing broadband over power lines - enhanced network model (BPLeNM)[J]. International Scholarly Research Notices, 2014(2): 1-22.
- [8] JANECEK A, VALERIO D, HUMMEL K A, et al. The cellular network as a sensor: From mobile phone data to real-time road traffic monitoring[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(5): 2551-2572.
- [9] 曾健. 架空输电线路导线舞动原因及防范对策[J]. 通信电源技术, 2020, 37(5): 171-172.
- ZENG Jian. Causes and countermeasures of conductor galloping of overhead transmission line[J]. Communication Power Supply Technology, 2020, 37(5): 171-172.
- [10] 余鲲, 杨俊杰, 楼志斌, 等. 基于支持向量机和模糊控制的输电线路覆冰状态评估模型[J]. 电测与仪表, 2016, 53(21): 82-88.
- YU Kun, YANG Junjie, LOU Zhibin, et al. Evaluation model of transmission line icing condition based on support vector machine and fuzzy control[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2016, 53(21): 82-88.
- [11] 周文峰, 杜志叶, 张力, 等. 地质灾害对超高压输电线路杆塔杆件失效影响分析[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 16-22.
- ZHOU Wenfeng, DU Zhiye, ZHANG Li, et al. Effect of geological disasters on the failure of UHV transmission line tower members[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(7): 16-22.
- [12] 陈永波, 汤奕, 艾鑫伟, 等. 基于LPWAN技术的能源电力物联专网[J]. 电信科学, 2017(5): 448.
- CHEN Yongbo, TANG Yi, AI Xinwei, et al. Energy and power IOT private network based on LPWAN technology[J]. Telecommunication Science, 2017(5): 448.
- [13] RAZA U, KULKARNI P, SOORIYABANDARA M. Low power wide area networks: An overview[J]. IEEE Commun. Surv. Tutor., 2017(19): 855-873.
- [14] 田成立, 赵强. NB-IoT低速率窄带物联网通信技术现状及发展趋势[J]. 中国新通信, 2018(4): 121.
- TIAN Chengli, ZHAO Qiang. Status quo and development trend of NB-IoT low speed narrow band Internet of things communication technology[J]. China New Communications, 2018(4): 121.
- [15] PETAJAJARVI J, MIKHAYLOV K, HAMALAINEN M, et al. Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring[C]//In Proceedings of the 2016 International Symposium on Medical Information and Communication Technology. Worcester, MA, USA: [s.n.], 2016: 153-165.
- [16] PARRI L, PARRINO S, PERUZZI G, et al. Low power wide area networks (LPWAN) at sea: Performance analysis of off-shore data transmission by means of LoRaWAN connectivity for marine monitoring applications[J]. Sensors, 2019(19): 3239.
- [17] BEYENE Y, JANTTI R, RUTTIK K, et al. On the performance of narrow-band internet of things (NB-IoT)[C]//In Proceedings of the 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2017: 1-6.
- [18] KONG P, LIU C, JIANG J. Cost-efficient placement of communication connections for transmission line monitoring[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2017(64): 4058-4067.
- [19] 张敏, 戴栋, 谢从珍, 等. 基于激光雷达技术的输电线路山火监测方法研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(15): 123-129.
- ZHANG Min, DAI Dong, XIE Congzhen, et al. Research on monitoring method of transmission line wildfire based on lidar technology[J]. Electrical measurement and instrumentation, 2015, 52(15): 123-129.
- [20] 石鑫, 朱永利. 面向输电线路监测的无线传输网络QoS保障技术研究[J]. 中国电力, 2015(3): 53-57.
- SHI Xin, ZHU Yongli. Research on wireless transmission network QoS guarantee technology for transmission line monitoring[J]. China Electric Power, 2015(3): 53-57.
- [21] 彭子平, 刘波, 陈清江. 输电线路故障率模型研究[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(2): 51-57.
- PENG Ziping, LIU Bo, CHEN Qingjiang. Research on fault rate model of transmission line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(2): 51-57.
- [22] 赵淳, 陈家宏, 谷山强, 等. 山区复杂地形条件下输电线路雷击跳闸故障分析方法[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 136-141.
- ZHAO Chun, CHEN Jiahong, GU Shanqiang, et al. Analysis method of lightning trip fault of transmission line under complex terrain in mountainous area[J]. Power Grid Technology, 2011, 35(12): 136-141.
- [23] 刘建昌, 李飞, 王洪海, 等. 进化高维多目标优化算法研究综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 879-887.
- LIU Jianchang, LI Fei, WANG Honghai, et al. Review of evolutionary high dimensional multi-objective optimization algorithm[J]. Control and Decision Making, 2018, 33(5): 879-887.
- [24] CENTENARO M, VANGELISTA L, ZANELLA A, et al. Long-range communications in unlicensed bands: The ris-

- ZHAO Jiankang, FAN Youbing. Study of the design and process of the buffer in HV power cables[J]. Wire and Cable, 2010(3):17-20.
- [14] 杨帆, 朱宁西, 刘晓东, 等. 基于阻抗评估电缆缓冲层间隙状况的实验与分析[J]. 广东电力, 2018, 31(12): 93-98.
- YANG Fan, ZHU Ningxi, LIU Xiaodong, et al. Experiment and analysis of evaluating buffer layer gap condition of cable based on impedance[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(12):93-98.
- [15] 汪传斌, 金海云. 高压 XLPE 绝缘电力电缆缓冲层与金属护层结构设计仿真计算与优化[J]. 电线电缆, 2018(3):16.
- WANG Chuanbin, JIN Haiyun. The structural design simulation and optimization of high voltage XLPE insulation power cable buffer layer and metal sheath[J]. Wire and Cable, 2018(3):16.
- [16] 李珊珊, 严有祥, 陈丽安, 等. 高压 XLPE 电缆缓冲层结构对载流量的影响研究[J]. 供用电, 2019, 36(1):87-92.
- LI Shanshan, YAN Youxiang, CHEN Li'an, et al. Influence of high - voltage cable buffer layer structure on current carrying capacity[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(1):87-92.
- [17] 周智鹏, 林国健, 陈真林. 高压 XLPE 电缆绝缘外屏蔽与金属护套件放电特征及检测方法[J]. 电缆技术, 2018(1): 36-41.
- ZHOU Zhipeng, LIN Guojian, CHEN Zhenlin. Discharge characteristics and detection methods of high - voltage XLPE cable insulation outer shield and metal sheath[J]. Cable Technology, 2018(1):36-41.
- [18] 李陈莹, 李鸿泽, 陈杰, 等. 高压 XLPE 电力电缆缓冲层放电问题分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2):61-66.
- LI Chenying, LI Hongze, CHEN Jie, et al. Analysis of high voltage XLPE power cable buffer layer discharge problem[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 61-66.
- [19] 陈智勇, 张静. 不同截面的 110 kV XLPE 电力电缆缓冲层放电特性[J]. 电缆技术, 2014(3):1-5.
- CHEN Zhiyong, ZHANG Jing. Discharge characteristics of buffer layer of 110 kV XLPE power cable with different cross sections[J]. Cable Technology, 2014(3):1-5.
- [20] ZHAO Jiankang. Study of the design and process of the buffer in HV power cables[J]. Electric Wire & Cable, 2010, 3(3):17-20.

严有祥(1968—), 男, 教授级高级工程师, 从事 XLPE 电力电缆及附件的设计、试验等相关工作(E-mail: yanyoux-
iang@sina.com)。

徐子峻(1993—), 男, 工程师, 从事 XLPE 电力电缆及附件的设计、试验与检测等相关工作(E-mail: xuzijunsmile@sina.com)。

尤天鹏(1995—), 男, 博士研究生, 从事电力电缆及附件设计和仿真、SF₆替代气体相关研究(E-mail: 2020102070009@whu.edu.cn)。

周文俊(1968—), 男, 教授, 从事电力电缆设计及仿真、SF₆替代气体等研究(E-mail: wjzhou@whu.edu.cn)。

林智雄(1986—), 男, 工程师, 从事 XLPE 电力电缆及附件的设计、试验与检测等相关工作(E-mail: 515796011@qq.com)。

(上接第 183 页)

- ing stars in the IoT and smart city scenarios[J]. IEEE Wirel. Commun., 2016(23):60-67.
- [25] WU Y C, CHEUNG L F, LUI K S, et al. Efficient communication of sensors monitoring overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3):1130-1136.
- [26] LAZAROPOULOS A G. Wireless sensor network design for transmission line monitoring, metering, and controlling: Introducing broadband over power lines - enhanced network model(BPLeNM)[J]. International Scholarly Research Notices, 2014(2014):1-22.
- 刘宇(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输电设备绝缘技术研究工作(E-mail: liuyu@csg.cn)。
- 胡上茂(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统过电压防雷及接地技术研究(E-mail: husm@csg.cn)。
- 刘刚(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统防雷及绝缘配合研究工作(E-mail: liugang@csg.cn)。
- 胡泰山(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统过电压及绝缘配合研究工作(E-mail: huts@csg.cn)。
- 廖氏传(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统防雷及绝缘配合研究工作(E-mail: liaomc@csg.cn)。