



研究与开发

大规模输电线路状态监测传感器网络的 周期性低功耗通信技术方案

占亚波, 涂潜, 李俊, 宗震

(国网安徽省电力有限公司建设分公司, 安徽 合肥 230071)

摘要: 为了实现输电线路监测的功耗低、寿命长、绿色发展的目的, 提出大规模输电线路状态监测传感器网络周期性低功耗通信技术方案。依据网络中传感器网络组网特征以及节点运行状态转换特点, 设置睡眠定时器, 以周期性运行方式使传感器网络通信节点在初始化、睡眠、激活状态间转换, 通信节点在输电线路状态监测数据无传递需求时进入睡眠状态, 节省通信功耗; 传感器网络汇聚(sink)节点利用梯度创建上行路由, 通过源路由的方式创建下行路由, 以跳数和剩余能量为依据进行上、下行路由数据分组传递, 降低节点功耗, 延长通信运行时间。实验显示, 大规模输电线路状态监测传感器网络应用该技术方案后, 通信功耗明显降低, 运行时间明显延长, 且不会影响监测传感器网络的数据传输性能, 延长了监测传感器网络的使用寿命。

关键词: 状态监测传感器网络; 低功耗通信; 传感器网络节点; 路由节点; 周期性睡眠; 数据分组

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023022

Periodic low-power communication technology scheme for large-scale transmission line condition monitoring sensor network

ZHAN Yabo, XU Qian, LI Jun, ZONG Zhen

State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Construction Company, Hefei 230071, China

Abstract: In order to realize the purpose of low energy consumption, long service life and green development of transmission line monitoring, a periodic low-power communication technology scheme of large-scale transmission line condition monitoring sensor network was proposed. According to the networking characteristics of sensor networks in large-scale transmission line condition monitoring networks and the characteristics of node operation condition conversion, sleep timers were set to make the communication nodes of sensor networks switch between initialization, sleep and activation states in a periodic operation mode. The communication nodes entered the sleep state when there was no transmission demand for transmission line condition monitoring data, so as to save communication energy consumption. Sink nodes in sensor networks used gradients to create uplink routes and source routes to create downlink routes. Based on the number of hops and residual energy, sink nodes transmitted uplink and downlink routing data packets, to reduce node energy consumption and prolong communication running time. Experiments show that after the large-scale transmission line condition monitoring sensor network applies the technical solution,



the communication energy consumption is significantly reduced, the running time is significantly prolonged, and the data transmission performance of the monitoring sensor network is not affected, and the service life of the monitoring sensor network is prolonged.

Key words: condition-monitoring sensing network, low-power communication, sensor network node, routing node, periodic sleep, data packet

0 引言

2021年7月,国家电网有限公司印发《关于全面推进输变电工程绿色建造的指导意见》(2021年367号文)以及《输变电工程绿色建造指引(1.0版)》,明确推动输变电工程绿色建造是立足新发展阶段和实现输变电工程高质量建设的内在要求^[1],其中大规模输电线路状态监测传感器网络可有效监测输变电工程绿色建造质量,便于掌控输电线路的实际情况,助力变电工程绿色发展。由于监测传感器网络的低功耗通信性能是衡量网络实际应用效果的关键因素,许多研究者针对输电线路的低功耗通信问题进行了研究。例如,常铁原等^[2]通过设计成簇算法实现无线传感器网络的低功耗通信,可通过簇头节点的合理选取,均衡网络整体通信功耗。该方法虽然能够均衡功耗,但簇头节点选取不合理会增加网络信息传输时延,影响传输效果,通信网络的使用寿命较短。张安安等^[3]研究了监测技术,利用中继节点传输时延模型,对网络时延性能进行分析,虽然通信效果好,但没有解决功耗问题,通信功耗较大。陈锦铭等^[4]利用远距离无线电(long range radio, LoRa)技术实现了低功耗广域网通信,应用LoRa扩频传输技术构建低功耗传感器网络,网关支持多个终端,采集传感信息。该方法的网络通信覆盖范围较广,但功耗降低效果不理想,运行时间较短。

为了降低输电线路监测传感器网络通信的功耗、延长监测传感器网络通信运行时间,本文设计了大规模输电线路状态监测传感器网络周期性低功耗通信技术方案,通过传感器网络的路由低功耗地建立与传输,在满足通信需求的基础上,降低功耗。

1 大规模输电线路监测传感器网络结构

1.1 网络构架

大规模输电线路状态监测传感器网络利用智能电子设备(intelligent electronic device, IED)进行数据及命令传递,输电线路状态监测传感器网络的具体构架,网络总体架构如图1所示。

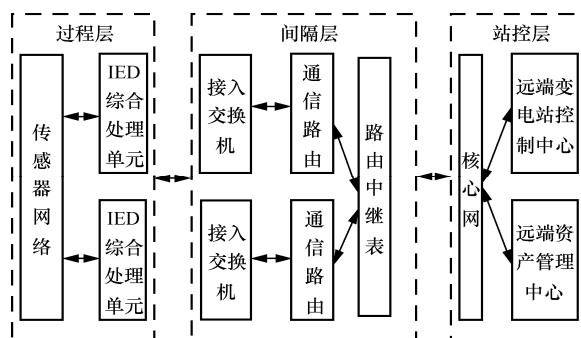


图1 网络总体架构

根据图1可知,过程层利用传感器网络对输电线路状态信息进行终端采集,由于大规模输电线路状态的信息种类较多,涉及通信的范围较广,对通信实时性等要求不是特别严格;间隔层位于中间,是过程层与站控层相互通信的桥梁,将过程层采集的输电线路状态监测数据实时汇报给站控层,其中交换机部署结构如图2所示。站控层作为控制中心,对输电线路状态信息进行统一管理。

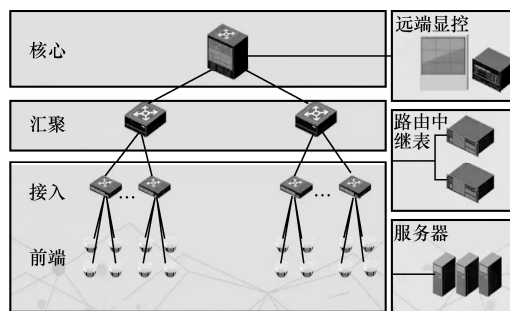


图2 交换机部署结构

1.2 传感器网络特征及节点状态转换

大规模输电线路一般为超高压主网输电线路,分布类似带状。为了对线路状态进行监测,需要在大规模输电电路上布置数量较多的传感器节点,建立传感器网络,完成通信任务^[5]。采用基于 ZigBee 的通信技术建立的传感器网络可以自动组网,将输电线路状态监测数据迅速地传至汇聚节点,最终将输电线路状态监测数据传回远端控制中心。大规模输电线路和电力杆塔需要建造在人烟稀少的地方,此时塔基与塔基之间最有利于传感器网络数据传输。大规模输电线路状态监测传感器网络利用传感器网络对输电线路状态实时监测,获取状态监测数据,为电力输电线路的安全运行提供保障^[6-7]。

多数节点安装在杆塔周围,造成传感器网络出现局部密集状态,而传感器节点功能有限,不能持续进行通信,因此在大规模输电线路的三相线上,需要设立一些特殊的传感器节点,作为中继节点,利用多跳传输达到低功耗通信的目的^[8]。

在传感器网络中,全部通信节点具有 3 种运行状态,分别为初始化(initialization, INI)、睡眠(sleep, SLP)、激活(activation, ACT),运行转换状态,传感器节点运行状态转换示意图如图 3 所示。

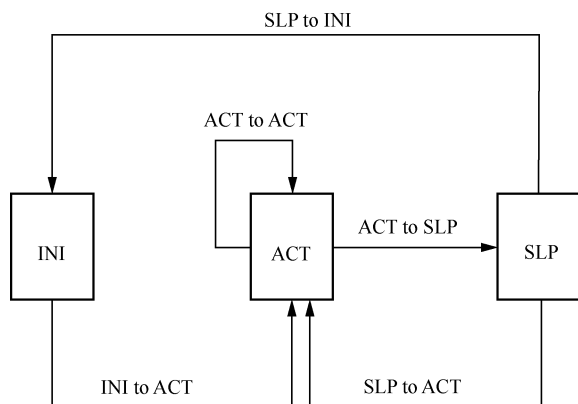


图 3 传感器节点运行状态转换示意图

根据图 3 所示,节点可以根据需要在 3 种状态下互相转换,当节点处于 INI 状态时,可以完成传感器网络的注册、路由等初始化设置项目;如果通信装置的数据端口处于关闭状态,仅维持传感器网络装置低功耗通信,此刻即 SLP 状态;当各个通信端口恢复数据的收发时,节点处于 ACT 状态。这 3 种状态相互转换,可以达到大规模输电线路状态监测传感器网络实现低功耗通信的目的^[9]。

2 周期性低功耗通信方案

针对基于 ZigBee 的无线传感通信技术设计低功耗通信方案。采用传感器网络节点状态转换的方式,利用睡眠状态达到低功耗的目的^[10]。如果没有输电线路状态监测数据需要传递,整个监测传感器网络的通信装置进入睡眠状态;如果有输电线路状态监测数据需要进行传递,通信装置进入激活状态。利用大规模输电线路传感器网络的周期性能,实现大规模输电线路状态监测传感器网络低功耗通信的目的^[11]。

2.1 路由节点睡眠方案

K 表示传感器网络同步睡眠周期, H 表示监测数据传输的运行时间, R 表示睡眠时间, n 表示路由的级数。通过协调器节点建立网络来保护路由;汇聚节点可以将输电线路状态监测数据进行汇集和传递;终端节点主要用于输电线路状态数据的收集。协调器节点是 0 级路由,该节点没有睡眠状态。如果第 n 级路由节点是终端节点,那么终端节点运行时间为 H_n , 睡眠时间为 R_n , 传感器网络同步睡眠周期计算方法,如式(1)所示:

$$K = H_n + R_n \quad (1)$$

终端节点的父节点是第 $n-1$ 级路由节点,睡眠时间 R_{n-1} 和运行时间 H_{n-1} 的计算方法见式(2)



和式 (3):

$$R_{n-1} = R_n - K_{\text{random}} \quad (2)$$

$$H_{n-1} = K - R_{n-1} \quad (3)$$

其中, K_{random} 表示随机延长的时间。

根据式 (2) ~ 式 (3), 推断第 1 级节点睡眠时间 R_1 和运行时间 H_1 如式 (4) 和式 (5):

$$R_1 = R_2 - K_{\text{random}} \quad (4)$$

$$H_1 = K - R_1 \quad (5)$$

当睡眠定时装置的睡眠时间结束时, 由于 R_1 是最短的, 所以率先被叫醒, 叫醒后的节点需要与簇头节点进行时间同步运行, 之后会随机延长时间 K_{random} , 直到第 2 级路由节点被同步叫醒, 以此类推, 直到终端节点被叫醒, 在每一个节点被叫醒的同时, 与之对应的父节点的数据会同步运行, 当所有节点都实现同步后, 睡眠状态彻底结束, 进入运行时间。

当终端节点开启运行模式时, 先判断大规模输电线路状态监测传感器网络是否有输电线路状态数据采集的需求, 若没有需求, 当异步睡眠定时器开始工作时, 终端节点将根据定时器设置的时间, 被异步睡眠叫醒。然后继续对网络的需求进行判断, 若有需求, 就开始进入运行模式; 若没有需求, 则继续进入睡眠状态。整个网络会同步进入一个睡眠周期, 睡眠周期结束, 则开启下一个周期。同步睡眠周期流程如图 4 所示。

根据图 4 可知, 在同一级的终端节点同步睡眠周期流程中, 同步睡眠叫醒时间相同会引起父节点同时被叫醒, 这种情况会造成通信时, 信道不能满足大量通信数据的传输, 从而导致通信功耗增多, 此时在同步睡眠周期流程中, 加入随机延长时间的步骤, 有效地避免信道阻塞, 降低了通信功耗。

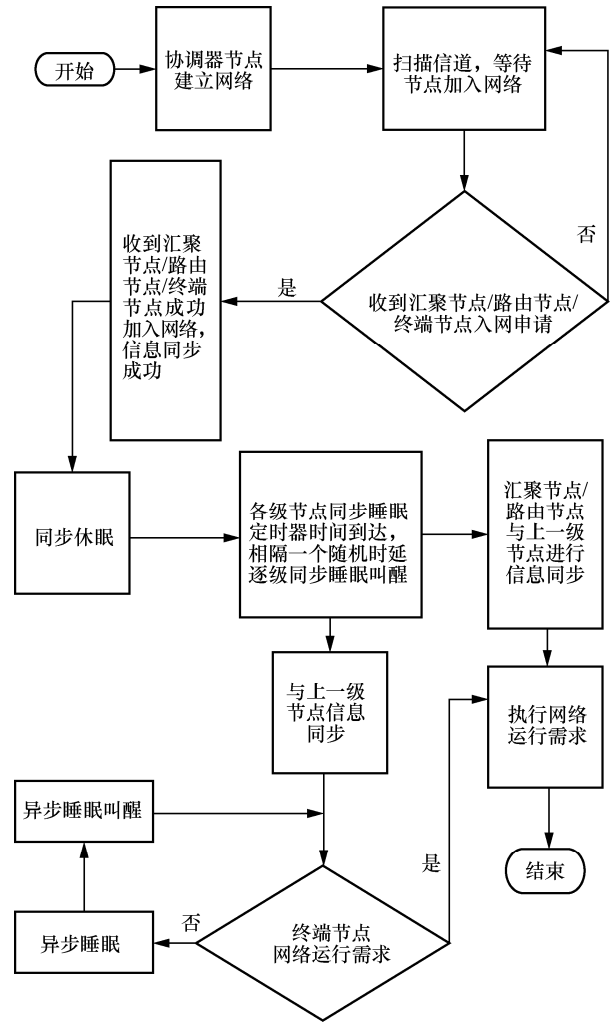


图 4 同步睡眠周期流程

2.2 路由构建

2.2.1 上、下行路由的建立

汇聚节点可以建立分组, 分组包含节点唯一编码 ID (identity document)、节点距离汇聚节点的跳数 L 和节点剩余能量等^[12-13]。根据分组信息, 各个传感器节点可以判断自己与汇聚节点的梯度, 并创建上行路由。上行路由建立过程如下。

(1) 在初始阶段, 除了汇聚节点跳数 L 设为 0, 其余节点跳数设为无穷大。根据通信半径 B 对上行路径进行建立分组。

(2) 在传感器节点 x 获取节点 y 建立的上行路由分组时, 对节点 x 与 y 的实际距离 J_{xy} 进行测距并保存在邻居节点的距离表中, 然后利用路由

建立分组的信息进行以下操作：若 $L_x > L_y + 1$ ，则设 $L_x = L_y + 1$ ，去除此时路由表内容，保留节点 y 的 ID、 L_y 和剩余能量，更新邻居节点；若 $L_x = L_y + 1$ ，则直接添加节点 n 的 ID、 L_y 和剩余能量；若 $L_x < L_y + 1$ ，则放弃上行路由建立的分组信息，不实施其余操作。

为了避免过多的网络开销，在下行路由的建立过程中，可以不采用建立分组的方式，而通过源路由的方式进行下行路由建立，具体过程如下。

在数据分组传递的过程中，需要先建立路由中继表，并设置表的长度，还需要有一定的可变性^[14-15]。路由中继表建立的位置被确定在传感器节点传至汇聚节点的第一个数据分组上，并且是该数据分组的第一位。该表可以按顺序记录转发节点的 ID，并更新中继表记录的信息，可一直记录到汇聚节点。整个下行路由建立示意图如图 5 所示。

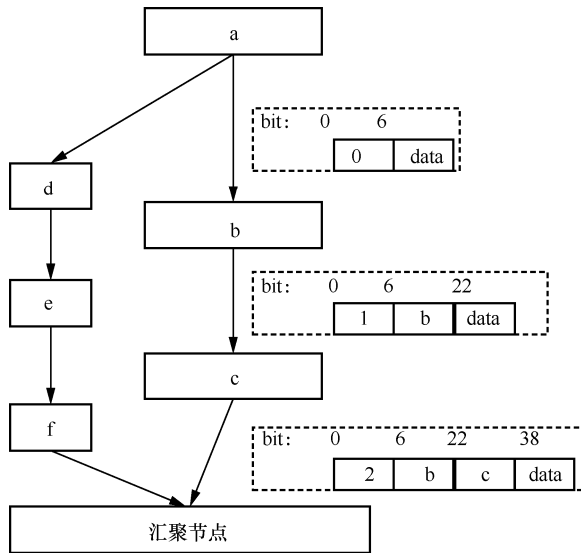


图 5 下行路由建立示意图

根据图 5 可知，各个传感器节点需要对其他节点传来的第 1 个数据分组进行区分，若是未发送过的新数据分组，则需将新数据加入中继表内，跳数信息也要做出相应的调整，然后再对数据分组进行传递^[16-18]；若是已发送过的旧数据分组，

则先对数据分组首位的路由中继表信息进行采集，利用采集的首位路由中继表信息对自身下行路由表的项目进行调整，再把自身的 ID 记录到路由中继表中，并改变跳数信息，然后将数据分组传递至下一跳节点。在规定时间内，传感器节点需要按时完成传递数据的任务，即使没有任何传递需求，也要继续向汇聚节点传递数据，但此时传递的数据没有任何实际的内容。

在下行路由建立过程中，将数据分组首部信息作为区分条件，对数据分组的节点进行接收，查看下行路由表里是否存在数据源节点的路由，若没有，则需要在下行路由表里创建一个到数据源节点的路由；若经过查看，发现已有数据源节点的路由，此时只要对该路由进行更新即可。

2.2.2 数据分组传递

在大规模输电线路状态监测传感器网络中路由的建立，需要数据分组在上、下行路由间进行传输，利用跳数和剩余能量作为传输依据。先以跳数作为第一标准，若第一标准一致，则利用第二标准，即剩余能量，多则视为优先传递节点。

利用路径长度测量原理，对跳数进行计算，如式（6）所示：

$$G = L + \frac{(Z_c - Z_s)}{Z_c} \quad (6)$$

其中， G 表示计算的跳数， L 表示节点距离汇聚节点的跳数， Z_s 表示节点的剩余能量， Z_c 表示节点的初始能量。由于 $Z_c \geq Z_s \geq 0$ ，所以 $0 \leq \frac{(Z_c - Z_s)}{Z_c} \leq 1$ ，推断 $L \leq G \leq L + 1$ 。

取 G 值小的邻居为下一跳的节点，根据式（6）可知，在 L 值相同的条件下，剩余能量 Z_s 值越大，计算得到的跳数 G 越小，选择这个节点的机会就越大，这有利于降低节点功耗，延长大规模输电线路状态监测传感器网络的通信运行时间。

在数据分组传递过程中，先判断有传递需求



的节点, 设为节点 u , 查看节点 u 的路由表, 利用式(6)计算跳数 G_u 最小的节点, 设为 o , 确定邻居距离表, 获取节点 u 与节点 o 的实际距离 J_{uo} , 然后根据 J_{uo} 调整传递功耗, 将分组发送给节点 o , 完成数据分组传递的任务。

3 实例验证

国家某地电网有限公司利用本文周期性低功耗通信技术方案, 构建了大规模输电线路状态监测传感器网络。该输电线路长达 8 km, 为超高压主网输电线路, 由 35 kV 变电所建设线路某一、二回线路至开关站, 负责管辖 35 kV 及以上输电线路杆塔数 42 基。通过太阳能蓄电池对监测传感器网络通信装置进行供电, 实验使用的电池容量为 150 Ah, 电压为 15 V。通过应用本文技术方案, 对大规模输电线路状态监测传感器网络的节能性、数据传输性和使用寿命进行验证。

通信路由节点布置方案为直线无障碍传输环境节点距离 30~40 m, 有障碍传输环境节点距离为 10 m。

3.1 低功耗通信节能性

实验中不考虑电池本身充电及损耗造成的电压下降等因素, 采用本文通信技术方案设计 3 种周期性睡眠方案, 验证周期性睡眠方案的节能性。周期性睡眠方案的参数设定见表 1。

表 1 周期性睡眠方案参数设定

周期性睡眠方案	ACT 周期长度/s	SLP 周期长度/s
1	45	2 100
2	35	1 600
3	25	1 000

根据表 1 可知, 3 种不同的参数对应了 3 种周期性睡眠方案, 将没有使用节能方法的大规模输电线路状态监测传感器网络与使用了 3 种睡眠方案的监测传感器网络进行对比, 周期性睡眠方案性能对比结果见表 2。

根据表 2 可知, 功耗节约率代表使用周期性睡眠方案的监测传感器网络, 与没有使用周期性睡眠方案的普通监测传感器网络相比较节省的功耗百分率; 时间增加率, 是二者运行延长的时间百分比。监测传感器网络应用本文技术方案设计的 3 种周期性睡眠方案后, 通信装置的功耗明显降低, 运行时间明显延长。因此, 若大规模输电线路状态监测传感器网络的通信装置, 运行在条件艰苦且没有电源提供能量的环境中, 装置可以提供较长的通信使用时间, 同时减少修理通信装置的成本, 维护大规模输电线路状态监测传感器网络的持续运行。通过 3 种周期性睡眠方案性能的比较, 了解激活周期的长短影响装置的功耗, 若激活周期短点, 则大规模输电线路状态监测传感器网络通信装置的平均功耗降低效果会好些。

3.2 数据传输性能

将本文设计的周期性低功耗通信技术方案应用到大规模输电线路状态监测传感器网络中, 通过不同节点的不同状态进行数据传输, 本文方案的数据传输性能如图 6 所示。

根据图 6 可知, 由于监测传感器网络需要一定的启动时间, 所以实验在 4 s 后对固定量的数据分组进行传送, 在实验期间不再有额外的数据分组进行传送。在节点相同的情况下, 应用本文方案与不应用本文方案进行数据传送的成功率没有

表 2 周期性睡眠方案性能对比结果

方案	运行时间/h	平均功耗/W	功耗节约率	时间增加率
周期性睡眠方案 1	489	2.49	79.3%	345%
周期性睡眠方案 2	525	2.34	80.5%	377%
周期性睡眠方案 3	561	2.11	82.4%	410%
无周期性睡眠方案	110	12		

明显差异,实验表明本文方案并不影响数据的传输性能,可以保障将大规模输电线路状态的数据传输到远端控制中心,不影响监测结果。

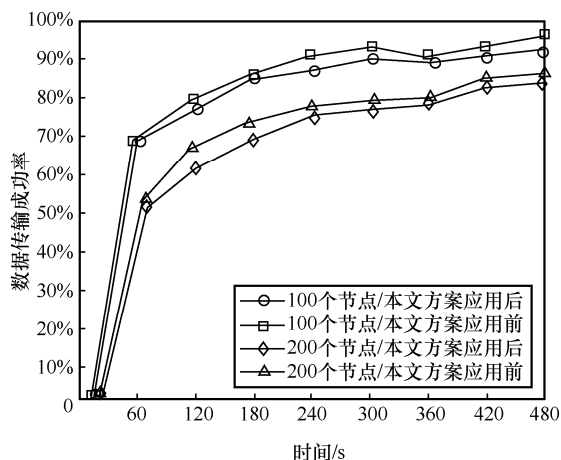


图6 本文方案的数据传输性能

3.3 监测传感器网络寿命

监测传感器网络由安装了监控软件的远端变电站控制中心上位机、TLKS-PMG-100 输电线路监测传感器节点和通信装置 NB-IoT 天线组成。各节点通过无线信道连接,汇聚节点与上位机监控程序通过 RS-232 异步串口总线连接。测试大规模输电线路状态监测传感器网络使用寿命,利用变电站控制中心终端显示器显示的传感器网络节点数量进行判断。如果在实验中具有活性的节点数量比例低于 18%时,就可以判定该输电线路状态监测传感器网络已经到了使用寿命,通过设定节点个数分别为 60、120、180 和 240 的不同场景,对网络进行测试,验证本文技术方案对输电线路状态监测传感器网络寿命的影响。不同场景下网络寿命对比如图 7 所示。

根据图 7 可知,随着节点数量的不断增加,本文营造了 4 种不同的应用场景,对大规模输电线路状态监测传感器网络进行测试,将普通未使用本文方案的网络和已使用本文方案的网络进行比较。可以看出,在 4 种场景里,使用本文方案的输电线路状态监测传感器网络的总体寿命均有了明显的提高,

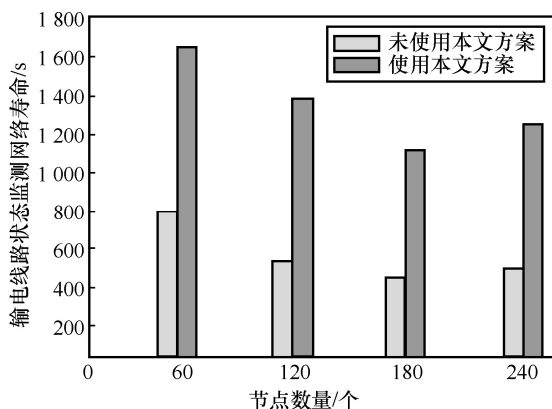


图7 不同场景下网络寿命对比

比未使用本文方案的输电线路状态监测传感器网络寿命提高了约 50%。分析寿命提高的原因,主要是本文方案采用传感器网络节点状态转换的方式,根据数据传输任务自动调整睡眠和激活状态,在同步睡眠周期流程中加入随机延长时间的步骤,有效避免了同步睡眠和异步睡眠冲突,减少通信设备无效激活损耗的次数,保证通信节点的睡眠时间,因此每个节点的寿命都有不同程度的延长,这使整个输电线路状态监测传感器网络寿命得到了明显的延长。实验表明本文方案可有效延长大规模输电线路状态监测传感器网络的使用寿命,有助于达到输变电工程绿色建设的目的。

4 结束语

为了降低大规模输电线路状态监测传感器网络的功耗,提出大规模输电线路状态监测传感器网络周期性低功耗通信技术方案。以周期性运行方式转换传感器网络通信节点状态,节省通信功耗;在梯度创建上行路由,通过源路由的方式创建下行路由,分组传递路由数据,降低节点功耗。实验结果表明应用本文方案后,通信装置的功耗大幅度降低,监测传感器网络使用寿命延长,可以助力实现大规模输电线路通信的绿色建设。由于条件有限,本文方案对传感器网络的通信效率未做明显提高,未来研究可以在保持低功耗的基础上提高通信效率。



参考文献:

- [1] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 369-379.
CHEN G P, LIANG Z F, DONG Y. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369-379.
- [2] 常铁原, 张炎, 闫芝萍, 等. 一种新型功耗优化的无线传感器网络成簇算法[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(1): 98-103.
CHANG T Y, ZHANG Y, YAN Y P, et al. New energy-optimized wireless sensor network clustering algorithm[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2020, 41(1): 98-103.
- [3] 张安安, 邓芳明. 融合无线传感器网络与射频识别的输电线路杆塔状态监测传感器网络低时延技术[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(4): 1442-1447.
ZHANG A A, DENG F M. Low delay technology of transmission line tower monitoring network integrating wireless sensor network and radio frequency identification[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(4): 1442-1447.
- [4] 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 J M, LUAN J. The LoRa application design of LPWAN technology [J]. Information Technology, 2021(4): 59-63
- [5] 全巍, 付文文, 孙志刚, 等. 枫林一号: 一款面向高端装备定制的低功耗时间敏感网络芯片[J]. 计算机研究与发展, 2021, 58(6): 1242-1245.
QUAN W, FU W W, SUN Z G, et al. HX-DS09: a customized low power time sensitive networking chip for high-end equipment[J]. Journal of Computer Research and Development, 2021, 58(6): 1242-1245.
- [6] 贾伯岩, 孙翠英, 李立学, 等. 基于兴趣区域匹配的输电线路双目监测系统研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3630-3637.
JIA B Y, SUN C Y, LI L X, et al. Research on the binocular monitoring system of transmission lines based on region of interest matching[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3630-3637.
- [7] 王敏学, 李黎, 周达明, 等. 分布式光纤传感技术在输电线路在线监测中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3591-3600.
WANG M X, LI L, ZHOU D M, et al. Overview of studies on application of distributed optical fiber sensing technology in on-line monitoring of transmission lines[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3591-3600.
- [8] 向征, 李自强. 基于并网太阳能光伏/电池系统的无线网络低功耗供电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 152-162.
XIANG Z F, LI Z Q. Low power strategy of a wireless network based on a grid-connected solar photovoltaic/cell system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 152-162.
- [9] 何继勇, 周海阔, 朱仁勋. 高压输电线路在线监测设备无线供电电磁耦合机构优化[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 139-147, 165.
HE J Y, ZHOU H K, ZHU R X. Optimization of magnetic coupling mechanism for wireless power supply of high-voltage transmission line on-line monitoring equipment[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 139-147, 165.
- [10] 沈龙, 冯婷, 梁仕斌, 等. 输电线路绝缘子串偏角的光纤监测研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 75-81.
SHEN L, FENG T, LIANG S B, et al. Research on the optical fiber monitoring for windage angle of transmission line insulator string[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 75-81.
- [11] 纪辛然. 无线传感器网络自适应动态路由算法仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(6): 259-262, 310.
JI X R. Simulation of adaptive dynamic routing algorithm for wireless sensor networks[J]. Computer Simulation, 2021, 38(6): 259-262, 310.
- [12] 周恺, 张睿哲, 蔡瀛淼, 等. 基于分布式光纤的架空输电线路覆冰监测技术及应用[J]. 水电能源科学, 2020, 38(7): 177-180.
ZHOU K, ZHANG R Z, CAI Y M, et al. Application and research of overhead transmission line icing monitoring technology based on distributed optical fiber[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(7): 177-180.
- [13] 徐浩, 杜红棉, 王凌宇, 等. 一种可编程低功耗输电线路舞动监测系统[J]. 电子器件, 2020, 43(3): 533-536.
XU H, DU H M, WANG L Y, et al. Design of a programmable low power transmission line galloping monitoring system[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2020, 43(3): 533-536.
- [14] 朱晓娟, 何勇男. 能量有效的无线传感器网络动态任务调度算法[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(2): 313-318.
ZHU X J, HE Y N. Energy-efficiency dynamic task scheduling in wireless sensor networks[J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(2): 313-318.
- [15] 冯钧, 孔建寿, 王刚. 一种基于能量补给的无线传感器网络

- 分簇单跳路由协议[J]. 计算机科学, 2020, 47(S1): 278-282.
- FENG J, KONG J S, WANG G. Clustering single-hop routing protocol based on energy supply for wireless sensor network[J]. Computer Science, 2020, 47(S1): 278-282.
- [16] 王桂发, 郭梦月, 顾佳美, 等. 基于双电平脉冲宽度调制的低功耗可见光通信技术[J]. 光子学报, 2021, 50(5): 139-150.
- WANG G F, GUO M Y, GU J M, et al. Low power consumption visible light communication technology based on bilevel pulse width modulation[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5): 139-150.
- [17] 杨芮, 侯二林, 刘海芳, 等. 基于布尔网络的低功耗物理随机数发生器[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2020(1): 51-56.
- YANG R, HOU E L, LIU H F, et al. Low-power physical random number generator using Boolean networks[J]. Journal of Shenzhen University(Science and Engineering), 2020(1): 51-56.
- [18] 彭木根, 张世杰, 许宏涛, 等. 低轨卫星通信遥感融合: 架构, 技术与试验[J]. 电信科学, 2022, 38(1): 13-24.
- PENG M G, ZHANG S J, XU H T, et al. Communication and remote sensing integrated LEO satellites: architecture, technologies

and experiment[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(1): 13-24.

[作者简介]



占亚波 (1979-), 男, 国网安徽省电力有限公司建设分公司高级工程师, 主要研究方向为输变电工程建设管理、质量管理和安全管理等。

涂潜 (1976-), 男, 国网安徽省电力有限公司建设分公司高级工程师, 主要研究方向为输变电工程建设管理、安全管理等。

李俊 (1988-), 男, 国网安徽省电力有限公司建设分公司高级工程师, 主要研究方向为输变电工程建设管理。

宗震 (1993-), 男, 国网安徽省电力有限公司建设分公司工程师, 主要研究方向为输变电工程建设管理、安全管理等。