

基于无线传感器网络的输电线路在线监测系统

陈久林¹, 徐陈成², 吴在军², 窦晓波²

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 江苏省智能电网技术与装备重点实验室(东南大学电气工程学院), 江苏 南京 210096)

摘要: 输电线路在线监测系统对保障输电线路的安全运行具有重要意义。根据高压输电线路的布局和监测参数的特点,设计并实现了一种层次型无线传感器网络。子网为 ZigBee 网络,负责传感器数据的采集;骨干网为基于 IEEE 802.11 的多跳自组织网络,负责数据的远距离可靠传输。设计了输电线路在线监测系统的无线传感器节点和监测子站,介绍了其软件和硬件结构。进行了无线链接质量测试,得出常对数距离衰减模型与实测数据相符,可以通过接收信号强度指示(RSSI)值判断无线通信质量。

关键词: 无线传感器网络;输电线路;在线监测;RSSI

中图分类号: TM726

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)06-0039-04

作为电能生产、输送、供应的载体,电力设施是输送动力和光明的通道,而高压输电线路更是远程电能输送的关键设施,与百姓日常生活息息相关。对高压输电线路运行状态的检测一般依靠传统的人工巡视方法来进行,这种方法受主观因素影响较大,难以保证结果准确无误,而且不能做到实时在线测量,效率低,不能及时发现高压输电线路上的安全隐患,甚至可能导致发生杆塔倒塌等重大的安全事故,造成大面积停电,影响民众的日常生活。由于高压输电线路所在环境、位置都不同,区域差异大,如果采用常规巡检手段,检查一次周期长,而且无法第一时间发现隐患。同时受到各类技术及条件的限制,输电线路上的实时信息也无法实时传输至控制中心。

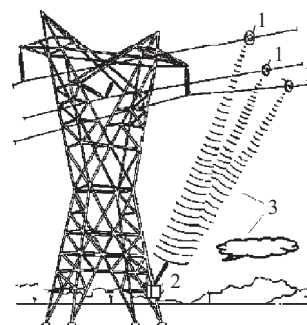
将无线传感器网络技术引入输电线路在线监测,已成为近年来的技术趋势。文献[1]提出基于无线公网和 ZigBee 无线传感器网络技术的输电线路综合监测系统,设计了监测主机和传感器节点。文献[2]提出基于 WiFi, EPON, 无线公网等通信方式的 ARM 架构的输电线路监测数据远程通信系统。文献[3]提出了基于无线传感器网络的高压输电线路在线监测系统。文献[4]探究了无线传感器网络在实际电力设施环境下的工作特性,指出了无线传感器网络投入实际应用的可行性。本文提出一种层次型无线传感器网络架构,分析和讨论了在线监测系统实施过程中可能遇到的问题及其解决方案,并测试分析了无线传感器网络在工作环境下的无线链接质量,为实际应用提供参考。

1 输电线路在线监测系统设计

1.1 输电线路在线监测系统架构

输电线路在线监测系统由无线传感器节点、监测

子站和监控中心组成,如图 1 所示。根据监测需求部署无线传感器节点,通常安装在各回路导线上。无线传感器节点负责采集输电线路的各项状态监测数据,并发送到监测子站,主要包括线路图像视频、微气象、导线覆冰舞动、绝缘子风偏、导地线振动、导线温度、绝缘子污秽度、杆塔倾斜等监测数据。监测子站部署在无线传感器节点附近,通常安装在杆塔上。一方面监测子站负责收集附近的传感器监测数据;另一方面监测子站为簇头节点,构成无线多跳网络,将数据传送至汇聚节点(监测网关),再由汇聚节点接入互联网或电力部门内部网络,传到后端的监控中心。汇聚节点通常设在高压变电站。



1 为无线传感器节点;2 为监测子站;3 为 2.4 Hz 无线信道

图 1 输电线路在线监测系统结构

监测子站和附近的无线传感器节点组成子网,为星形网络,传感器节点可以 1 跳接入监测子站。子网采用 ZigBee 技术,这是一项近距离、低功耗、低成本的无线通信技术^[5],最高带宽为 250 kb/s,在小范围的网络中既能满足温度、弧垂等标量数据传输的需要,又可以兼顾图片等大量数据传输需求。监测子站为簇头节点,处理能力和传输能力均较强,构成骨干网络,采用基于 IEEE 802.11b/g 标准^[6]的自组织网络,能支持远距离传输,配以高增益天线,传输距离可达几十公里。单跳链

路的带宽可高达 11 Mb/s 或 54 Mb/s, 满足监测系统的带宽需求。

1.2 无线传感器节点的设计

传感器节点主要包括传感器模块、电源模块和无线通信模块。传感器按监测数据需求选择, 可以包括温度传感器、湿度传感器、风速风向传感器、导线覆冰传感器、泄漏电流传感器、导线张力传感器、导线弧垂传感器等。无线通信模块选择支持 ZigBee 标准的模块, 在接收到监测子站发出的数据采集指令后采集数据并发出数据。

1.3 监测子站的设计

监测子站主要包括主控模块、电源模块、ZigBee 通信模块和基于 IEEE 802.11 标准的通信模块。由于监测子站放置在杆塔上, 因此选用太阳能电池供电。主控模块选择低功耗芯片。

1.4 监控中心的设计

监控中心负责将收集到的监测数据进行存储、处理和分析。可以提供历史数据查询、紧急事件报警、故障点定位、数据可视化等功能。对于特殊的数据, 如泄漏电流等还需要辅助专家知识进行后处理和分析。

2 输电线路在线监测系统实现

2.1 硬件实现

本系统设计的监测子站的硬件结构如图 2 所示。

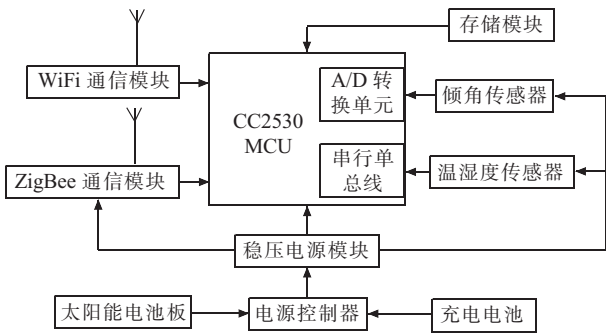


图 2 监测子站硬件结构

CC2530 是 TI 公司的 ZigBee 芯片。它以 8051 微处理器为内核, 自身携带的射频收发器用来实现无线传感器网络节点的通信。它封装体积小, 改进了 RF 输出功率、灵敏度、选择性和抗干扰性。

数字温湿度传感器 DHT21 是一款含有已校准数字信号输出的温湿度复合传感器, 具有响应快、抗干扰能力强、性价比高等优点。它的单线制串行接口, 使系统集成变得简易可靠。

角度 / 加速度传感器 MMA7361 芯片为 3 轴小量程加速度传感器, 可以检测物体运动的方向和角度。它根据物件运动和方向改变输出信号的电压值, 用处理器的 A/D 转换器读取输出电压信号, 就能够检测运动方向或角度, 可用于测量杆塔倾角。

2.2 软件实现

监测子站工作流程如图 3 所示。

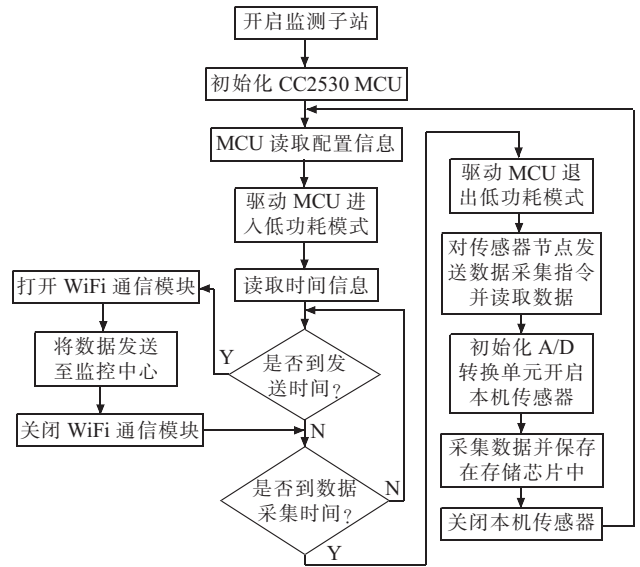


图 3 监测子站工作流程

监测主机开启后先读取配置信息, 包括所连接的各传感器节点的 16 位地址、数据发送时间安排、采集时间安排等。此后驱动 CC2530 MCU 进入低功耗运行模式。程序主循环中, 每隔一定时间读取一次时间信息, 与数据发送时间安排和采集时间安排进行对比, 周期性地进入数据发送或数据采集分支流程。系统中的存储芯片构建了一个循环存储结构, 程序可根据存储游标直接存储或访问数据。WiFi 通信模块是监测子站中最耗电的部分, 在硬件上将其设计为由程序控制开关, 可极大地降低系统功耗。

3 链接质量测试

为探究影响无线传感器网络通信质量的因素, 使用设计的无线传感器节点和监测子站进行测试。测试中, 数据包由 20 Byte 的传感器数据组成, 每次发送 100 个数据包。在以下 4 种环境中: (1) 空旷地带; (2) 有变电柜电磁干扰; (3) 有墙壁阻隔; (4) 有楼层阻隔, 进行接收信号强度指示 (RSSI) 和收包率 (PRR) 测试。在各测试环境中, 改变无线传感器节点和监测子站的距离, 记录相关数据。测试距离从 0 m 到通信距离上限 (约 100 m), 步距 2 m。从监测子站的液晶屏读取数据包的接收个数和 RSSI 值。

3.1 无线信道模型

无线信道模型采用常对数距离衰减模型^[7]。该模型适用范围广, 能较好的反映无线信号强度与通信距离的关系。该模型中, 接收端在距离发送端处接收到的信号强度:

$$\gamma(d) = P_t - PL(d_0) - 10\eta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) - X_\sigma - P_n \quad (1)$$

式(1)中: P_t 为发送端的发射功率; $PL(d_0)$ 是在参考距离 d_0 处的信号衰减强度; η 为信号衰减系数; X_σ 为高斯随机数; P_n 为噪声信号强度。

4种测试环境下 RSSI 与通信距离 d 的关系如图 4 所示。由图可见其接近指数关系。

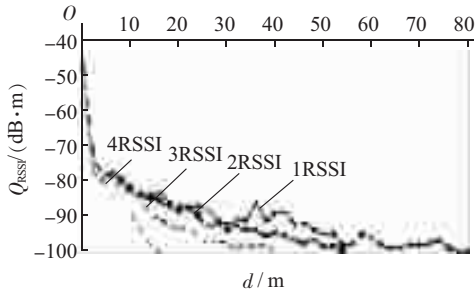


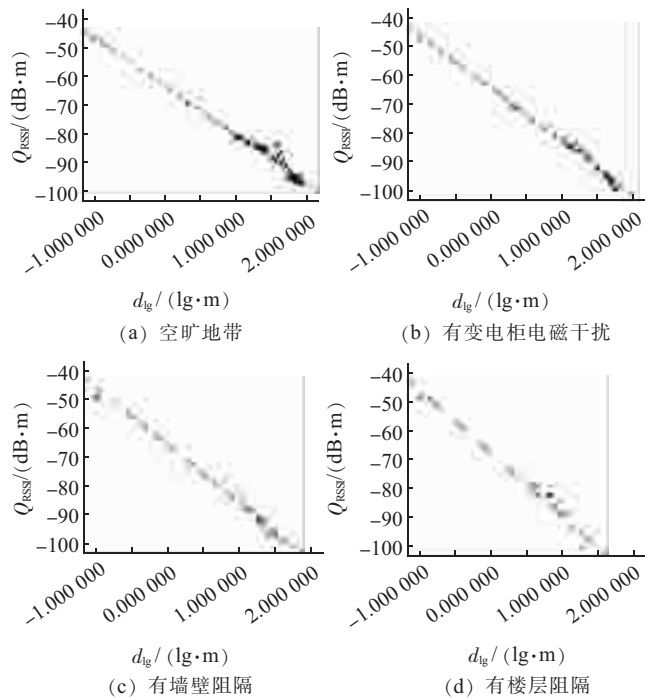
图 4 RSSI 与 d 关系曲线

图 4 中, Q_{RSSI} 为 RSSI, $\text{dB}\cdot\text{m}$ 。设 d_{lg} 为以 10 为底数的对数化距离 d , 对 d_{lg} 和 RSSI 进行相关性分析和线性拟合。数据分析结果如表 1 所示。

表 1 RSSI 与 d_{lg} 相关性分析数据

不同试验环境	a 组	b 组	c 组	d 组
r	-0.981	-0.991	-0.986	-0.981
$b1$	-17.654	-18.803	-20.088	-22.045
c	-63.470	-64.064	-65.705	-67.936
η	1.77	1.88	2.01	2.20

表 1 中, r 为 d_{lg} 与 RSSI 的线性相关系数, $b1$ 和 c 为拟合直线的斜率和叠加常数, 为信号衰减系数。各测试环境的 RSSI 与 d_{lg} 拟合直线如图 5 所示。



○ 为试验点; — 为线性回归方程

图 5 RSSI 与 d_{lg} 拟合直线

图 5 中, Q_{RSSI} 为 RSSI, $\text{dB}\cdot\text{m}$ 。 d_{lg} 与 RSSI 的线性相关系数高于 0.98, 线性度非常高, 与采用的无线信道模型吻合。自由空间模型中 η 理论值为 2.0, 实测得到的 η 分布在 1.77~2.20, 与自由空间模型相符。这反映无线信号衰减速率与环境有关。空旷地带 η 为 1.77, 值最小, 信号衰减最慢, 有效通信距离最大。在有变电柜电磁干扰环境中 η 为 1.88, 较空旷空间略大, 信号衰减变快。而在有墙壁干扰时, η 为 2.01, 衰减更快, 有效通信距离更小。

3.2 通信质量测试

无线通信质量的好坏由无线信号强度表征, 与此相关的 2 个量为 RSSI 和链接品质指示 (LQI)^[8]。 PRR 指测试中所接收数据包数量占所发送数据包的比率。 PRR 的值亦可表征无线通信质量。若 PRR 持续处于低数值水平, 通信质量差。收包率 PRR 为一个统计量, 不能实时获得。为实时监测通信质量, 需参考 RSSI 或 LQI 的值。各测试环境下 PRR 随通信距离变化的关系如图 6 所示。通信距离较短时, PRR 保持为 100%, 通信质量好。到了一定通信距离后, PRR 会迅速降低, 通信质量下降。

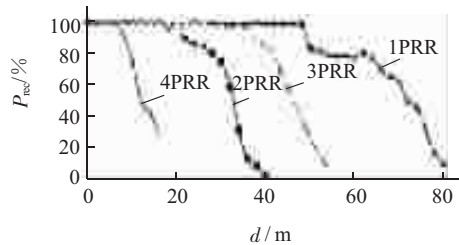


图 6 PRR 与 d 关系曲线

图 6 中, P_{rec} 为 PRR, %。对测得的 PRR 与 RSSI 数据进行相关性分析, 4 种测试环境下的 r 分别为 0.555, 0.521, 0.545, 0.608。在空旷环境、有变电柜电磁干扰、有墙壁阻隔的环境下, PRR 与 RSSI 的线性相关系数 r 都为 0.56 以下, 线性相关程度不强。在有楼梯及墙壁干扰的环境下, r 为 0.608, 较其他环境有增大, 这是由于该环境下测试数据数量较少。 PRR 与 RSSI 的拟合曲线如图 7 所示。

图 7 中, Q_{RSSI} 为 RSSI, $\text{dB}\cdot\text{m}$; P_{rec} 为 PRR, %。其横轴为 RSSI, 纵轴为收包数 R_{count} (每组试验当中数据包的接收数量)。RSSI 值在 $-40\sim-90\text{dB}\cdot\text{m}$ 时, PRR 基本为 100%, 通信质量好。RSSI 降至 $-90\text{dB}\cdot\text{m}$ 时, PRR 开始下降, RSSI 低于 $-95\text{dB}\cdot\text{m}$ 时, PRR 小于 60%, 通信质量较差。因此, 可以从 RSSI 值来判断当前 PRR 及通信质量。对于灵敏度为 $-100\text{dB}\cdot\text{m}$ 的 CC2530 芯片, 保持 RSSI 高于 $-95\text{dB}\cdot\text{m}$, 可以保证良好的通信质量。

4 结束语

(1) 无线传感器网络应用于高压输电线路具有优

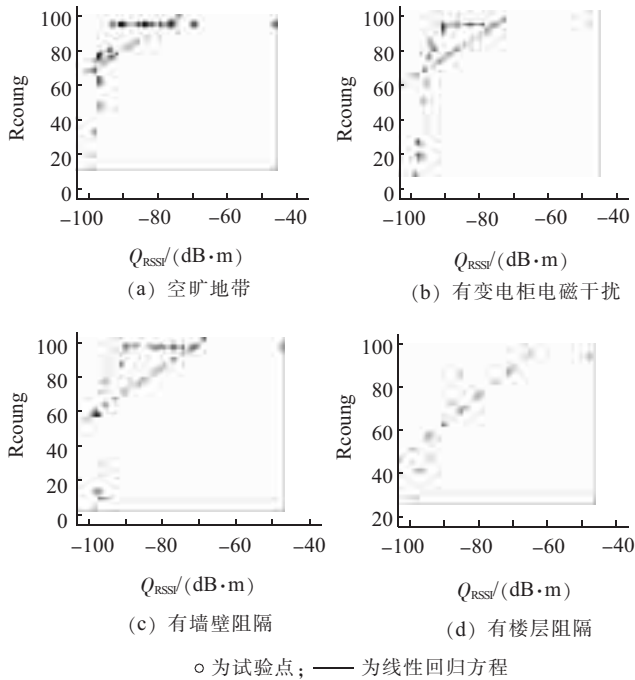


图7 PRR与RSSI拟合直线

势,然而又面临诸多困难,传输带宽、传输距离、节点供电等是其中的关键问题。本文详细分析了输电设备的在线监测需求,设计了一种层次型无线传感器网络架构,并详细讨论了实施中遇到的主要问题。

(2) 常对数距离衰减模型与实测值相符度良好,RSSI与对数化后的距离 d 线性相关度很高。该无线信道模型可以很好地预测无线信号强度。

(3) 无线信号的衰减与环境相关,信号衰减系数随环境变化。电磁干扰会加快无线信号衰减,墙壁阻隔等会进一步加快无线信号衰减。PRR能表征通信质量的好坏。可以用RSSI作为参考实时监测通信质量。

参考文献:

- [1] 桂勋,冯浩.基于无线公网和ZigBee无线传感器网络技术的输电线路综合监测系统[J].电网技术,2008,32(20):40-43.
- [2] 王玮,黄在朝.基于ARM的输电线路状态监测数据传输终端[J].江苏电机工程,2011,30(5):44-46.
- [3] 赵增华,石高涛,韩双立,等.基于无线传感器网络的高压输电线路在线监测系统[J].电力系统自动化,2009,33(19):80-84.
- [4] GUNGOR V C, LU B, HANCKE G P. Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid-A Case Study of Link Quality Assessments in Power Distribution Systems[J]. IEEE, 1998, 13(3):971-978.
- [5] 吴为国,茅丰.基于无线通信技术的电缆温度实时监测系统[J].江苏电机工程,2013,32(3):54-56.
- [6] IEEE 802.11-2007 IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks-specific Requirements: Part11 Wireless LAN Medium Access Control(MAC)and Physical Layer (PHY) Specifications[S]. 2007.
- [7] 刘雨.无线传感器网络中的信息处理[D].北京:北京邮电大学,2006.
- [8] IEEE Std 802.15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY): Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks(LR WPANs)[S]. 2003.

作者简介:

陈久林(1970),男,江苏高邮人,高级工程师,从事电力系统继电保护的试验与研究;

徐陈成(1990),男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络在电力系统中的应用;

吴在军(1975),男,江苏南京人,副教授,研究方向为变电站自动化系统;

窦晓波(1979),男,江苏南京人,副教授,研究方向为变电站自动化系统。

On-Line Monitoring System for Transmission Line Based on Wireless Sensor Network

CHEN Jiulin¹, XU Chencheng², WU Zaijun², DOU Xiaobo²

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Smart Grid Technology and Equipment

(School of Electrical Engineering, Southeast University), Nanjing 210096, China)

Abstract: An on-line monitoring system is of great importance to ensure the safety operation of power transmission lines. A layered wireless sensor network (WSN) is designed based on arrangement and monitoring parameters of transmission line. ZigBee based sub-network aims to collect data from sensors and IEEE 802.11 based backbone network is designed for transmitting data with a long distance reliably. Wireless sensor nodes and monitoring substation of on-line monitoring system are designed, and corresponding hardware and hardware of them are introduced. A wireless link quality experiment is implemented, which shows that constant logarithmic distance decay model is highly consisted with the measured data, and RSSI could be taken as an indicator of the radio link quality.

Key words: Wireless Sensor Network(WSN); transmission line; On-line monitoring; Received Signal Strength Indication (RSSI)