

# 基于 mesh 网络的输电线路山火预警监视系统研制

林铭瀚<sup>1</sup>, 胡永洪<sup>2</sup>, 薛毓强<sup>1</sup>, 凌飞鸿<sup>1</sup>

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116; 2. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350002)

**摘要:** 近年来频发火烧山导致输电线路跳闸, 对输电线路安全运行造成了很大的影响。针对输电线路长链状结构、山区公网信号覆盖不到位的情况, 提出利用无线 Mesh 网络特性、采用嵌入式技术和长链状低功耗路由算法。根据山火特性, 开发了以山火探测终端、中继器以及协调器组成的探测通信网络和基于 B/S 架构与 GIS 的专家监测软件构成的山火预警监视系统。经挂网运行数月后表明, 该系统能准确探测和传输火灾信息, 为输电线路山火预警提供了一种有效手段。

**关键词:** 输电线路; 山火监测; Mesh 网络; L-MPRP

## Research and application of forest fire early-warning and monitor system based on wireless mesh network for transmission line

LIN Minghan<sup>1</sup>, HU Yonghong<sup>2</sup>, XUE Yuqiang<sup>1</sup>, LING Feihong<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The forest fire resulting in transmission lines trip has taken place in recent years, and it has a great impact on the safe operation of transmission lines. According to the long chain structure of transmission line and the situation that network signal couldn't cover the mountain area, using the characteristics of wireless mesh networks, the embedded technology and the long chain structure of algorithm for low power, a fire early warning and monitor system is proposed based on the feature of forest fire. The communication network includes the terminal, router, centralized device. Besides, experts monitoring software is designed based on B/S architecture and GIS map. After the several months' operation, application result indicates the developed system can detect the fire with high accuracy and transmit the fire message, providing an effective method for the transmission line fires warning.

**Key words:** transmission line; forest fire monitor; Mesh networks; L-MPRP

中图分类号: TM726

文章编号: 1674-3415(2016)01-0134-05

## 0 引言

随着输电线路等级的提高, 做好输电线路的安全保障显得日益重要。近年来, 福建电网因山火导致的输电线路跳闸事故占总跳闸事故比重逐年上升。同时, 因山火致线路绝缘水平剧烈下降, 重合闸成功率较低, 停电时间长, 严重威胁电网的稳定运行<sup>[1]</sup>。对山火提前预警, 对科学调度决策有重要的意义。现如今采用较为广泛的防山火措施有视频监控, 卫星遥感, 红外成像等。以上技术均能在一定区域内捕捉火情并通过 GPRS 公网传输。但是

不足在于输电线路多布于人烟稀少地区, 公网信号强度低甚至没有信号。依赖于单技术探测火灾信息往往容易产生漏报或误报。采用航空或者航天巡护费用高昂且巡视周期间隔长, 无法应对爆发性山火<sup>[2-4]</sup>。

针对以上问题, 研制了基于无线 mesh 网络的输电线路山火预警监视系统。该系统主要特点在于结合输电线路长链状结构与无线 mesh 网络, 突破了公网信号覆盖限制, 将输电线路沿线探测到的火灾信息传送到管理部门, 拓展了监测范围。此外, 提出的低功耗路由算法 L-MPRP 用于均衡网络能量, 提高网络吞吐量。终端探测设备采用多鉴探测, 能极大降低误报率, 提高监测可信度<sup>[4]</sup>。本套系统

基金项目: 国网福建省电力有限公司科技项目 (521309135004)

已挂网运行于福建电网福中 I 路 500 kV 线路沿线。

## 1 系统原理

无线 mesh 即“多跳网络”。其处理消息的方式是把信息包从一个节点传递到另一个节点,直到信息包到达目的地。每个无线 Mesh 网络的节点可以作为接入终端,也可具有路由和信息转发功能,具有极高的组网自由度<sup>[5]</sup>。无线 mesh 网络与传统的 GPRS 网络结合起来,就可以建立起一套覆盖范围广、高可靠性、低成本的输电电力线路基础通信系统。

图 1 为基于无线 mesh 网络的山火预警监视系统原理图。采用 ZigBee 模块与传感模块组成终端节点,对监测环境中的温度、烟雾等火灾特征信息进行实时采集并传至中继器,由中继器转发其他 AP 传输来的信息,多次转发后信息到达该子网的协调器。协调器把这些数据通过 GPRS 模块发送到服务器。由监控服务器负责数据存储、统计、分析后产生预警和决策指导。

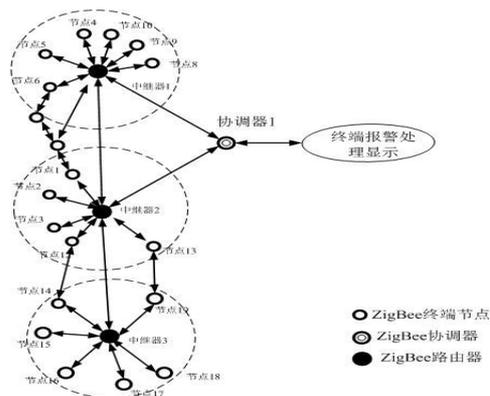


图 1 树状 Mesh 网络系统原理图

Fig. 1 Tree topology of the Mesh network

为适应输电线路特殊的链状地理形势,采用树状 mesh 网络。因相邻的输电杆塔间距多为 1~1.5 km,所以中继器采用具有 3 km 透传功能的增强型 Em357 模块。中继器双台冗余布置安装于输电杆塔上,且相邻杆塔间的中继器为视距传输。因此,在树状 mesh 网络中,信息既可以通过相邻节点传输也可以通过中继器进行传输,不会因为个别节点的“消亡”影响其他节点的通信,提高了系统的可靠性。

终端探测设备沿电力线两侧丛林中布设,布设间距为 30~50 m 左右,并注意使终端探测设备的引出天线相互之间尽量满足视距传输要求,并置于中继器覆盖范围内,这样终端探测设备之间既可相互跳转传输信息,而且也能与中继器通信。

## 2 基于 L-MPRP 的长链树状 Mesh 网络路由算法优化

1) 洪泛阶段:在终端设备布设于网络当中时,由协调器发起连接请求。在由附近中继器接收到信息后,将自己的 ID 添加为源地址,并转发路径包。所有终端以第一次接收到的广播中的源地址为路由表中的上一跳地址,并转发广播包;若非第一次接收到广播包,则判断上一跳是否为中继器的广播包,若是则更新路由表,为优先转发路线;若不是则将其添加进路由表,准备多条传输路径。

2) 数据发送阶段:当组网完成之后,网络中的任何一个终端设备就可以通过路由表向协调器发送数据包。

3) 路由修复阶段:因终端设备多布设于森林地区,由于树障、能量消耗等原因可能导致信号不稳、设备失联的情况出现。为此,提出使用中间终端做路由修复的修复机制,即由失效终端的下一跳终端根据路由表顺序发出路径出错包,在其他的终端接收到接收路径出错广播包时,若自身可以做修复点,则在发送路径应答包时,同时更新路由表。

为了验证无线 mesh 网络中 L-MPRP 路由算法的可行性以及有效性。分别从节点剩余能量、网络端到端的平均时延、网络吞吐量三个方面与广泛使用的 AODV 协议进行对比,采用 NS-2 仿真平台,用于仿真对比的网络模型为长链状<sup>[6-11]</sup>。

图 2 给出了节点剩余能量的曲线图。仿真结果表明 L-MPRP 路由协议相比较与 AODV 协议更能节省节点能量,降低路由开销。对于仅用电池供电的无线 mesh 节点有很大的优势。此外, L-MPRP 协议节点剩余能量相对平均,避免了“热点”问题产生的网络不均等导致的网络消亡。

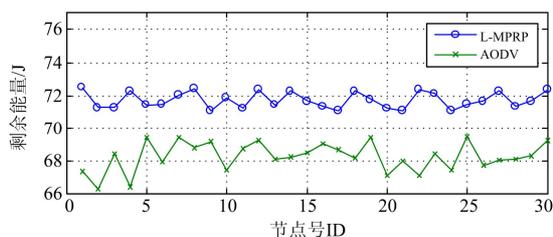


图 2 节点剩余能量对比图

Fig. 2 Comparison of residual energy of nodes

图 3 给出了端到端平均时延随网络负载的变化关系。可以看出在网络负载不大的时候,端到端时延差距不大。不过在网络负载达到 100 Kps 以上时, L-MPRP 协议因其多路径特性相较 AODV 协议的时

延有明显下降。这在发生集群报警时，能降低传输时延，报警也更加迅速。

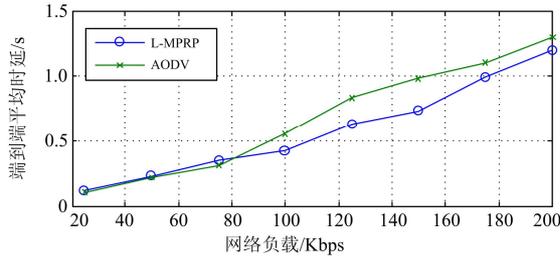


图 3 端到端平均时延对比图

Fig. 3 Comparison of path average delay

图 4 给出了 mesh 网络吞吐量随仿真进程的变化关系。随着仿真进行，L-MPRP 协议与 AODV 协议最后均达到饱和。L-MPRP 协议主要利用不休眠的双台中继器进行传输，在路径跳转过程中总能选择最短路径到达协调器。因此，L-MPRP 协议较 AODV 协议能较好实现网络的拥塞控制与负载平衡，在网络吞吐量上更具优势。

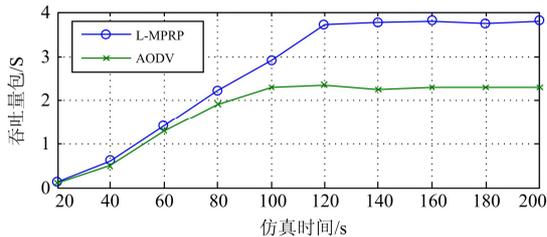


图 4 网络吞吐量对比图

Fig. 4 Comparison of network throughput

### 3 设备的软硬件设计

#### 3.1 硬件设计

协调器是 mesh 网络与外部网进行通信的关键设备，它是数据传输的核心部分。硬件上 MCU 采用 STM32 系列低功耗芯片，GPRS 模块选用移远公司的 M72 模块。由铅酸电池与太阳能混合供电。

中继器的主要任务是维持系统的数据转发，它是整个系统的传输部分。硬件设计方面与探测终端基本相同，不同在于其 Zigbee 模块采用增强型的 EM357 模块。供电方式由锂电池与太阳能混合供电。

终端节点探测设备的硬件设计框图如图 5 所示。探测终端是进行火情探测与数据转发的重要设备，它是整个系统的前端部分。根据山火的行为特性，可以从温度、颗粒检测两个方面进行探测<sup>[12]</sup>。硬件设计方面，采用 TI 公司的 msp430 系列 16 位超低功耗单片机及其他功能模块<sup>[13]</sup>，外接 Ember 公司的 EM357 无线收发模块，传感器采用接触式温度

传感器 DS18B20、非接触式红外温度传感器 TS105-4，两种温度传感器均可直接探测环境温度。采用红外光束来探测烟雾信息，其工作原理是红外二极管定期发送脉冲，红外接收器则不断监测是否有接收到脉冲信号，用来确定检测腔内是否有烟雾的存在。电路整体供电由高能锂电池供电。

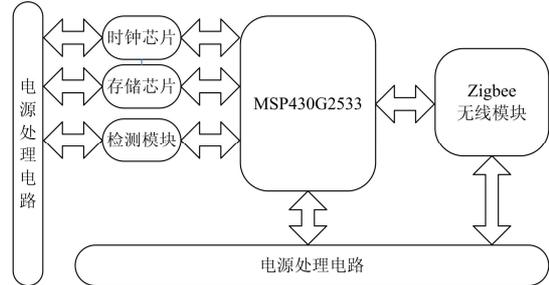


图 5 终端探测设备硬件设计框图

Fig. 5 Hardware design of the detection terminal

#### 3.2 软件设计

软件设计方面主要考虑设备的低功耗设计。其中，终端探测设备的 CPU 以间歇性进入 LPM3 休眠方式，只开启 ACLK 用来接收定时器或者外部通信中断<sup>[14]</sup>。中继器以及协调器是信息传输的关键设备，因有太阳能供电而不进入休眠状态。特别要注意的是，协调器是 mesh 网络的中心节点，若其进入休眠状态，则终端节点会不断扫描信道以加入网络，增加了节点能耗，加速节点“消亡”。因此协调器的能量供给采用高储能的铅酸电池与太阳能板混合供电以维持 mesh 网络。

因终端设备采用抛弃型布设，为防止尖峰脉冲干扰导致程序“跑飞”现象<sup>[15]</sup>，故使用 msp430 自带的看门狗模块，保障终端设备的正常运行。

Mesh 模块的工作机制设定为间歇性地进入休眠状态与载波侦听状态，如图 6 所示，实现能量节约以及报警的快速反应。

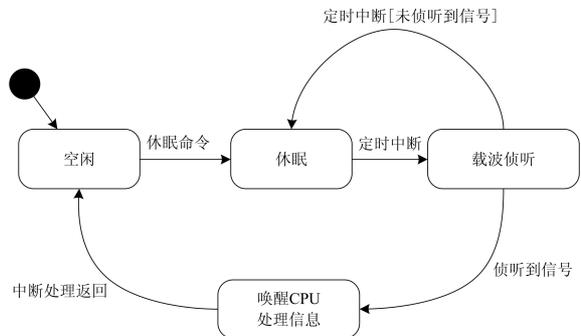


图 6 Mesh 模块状态图

Fig. 6 State diagram of the mesh module



- 145-153.
- [5] METHLEY S. Essentials of wireless mesh networking[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2012.
- [6] LIUA B H, HSUNB C H. Cooperative diagnosis for realistic larger-scale wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2014, 53(5): 95-101.
- [7] 李丽芬, 朱永利, 黄建才, 等. 基于无线传感器网络的绝缘子泄漏电流在线监测系统[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 74-79.  
LI Lifen, ZHU Yongli, HUANG Jiancai, et al. Wireless sensor networks based insulator leakage current on-line monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 74-79.
- [8] 杨超, 魏东, 庄俊华. 基于 ZigBee 无线网络技术的地下车库照明节能控制系统研发[J]. 电工技术学报, 2015, 43(增刊 1): 490-495.  
YANG Chao, WEI Dong, ZHUANG Junhua. An underground garage lighting control system based on Zigbee wireless network technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 43(S1): 490-495.
- [9] 曹新莉, 王先甲, 朱晔, 等. 杆塔倾斜监测网络的长距离无线路由算法[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2986-2992.  
CAO Xinli, WANG Xianjia, ZHU Ye, et al. Long distance wireless routing algorithm of tower inclination monitoring network[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2986-2992.
- [10] 周濛, 杨柱石, 陈伟根, 等. 采用 ZigBeePRO 无线网络技术的导线舞动多点监测系统[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1967-1974.  
ZHOU Quan, YANG Zhushi, CHEN Weigen, et al. Design of conductor galloping multi-points monitoring system using ZigbeePRO wireless network technology[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1967-1974.
- [11] 柯志亨, 程荣祥, 邓德隽, 等. NS2 仿真实验:多媒体和无线网络通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [12] 尤飞, 陈海翔, 张林鹤, 等. 木垛火导致高压输电线路跳闸的模拟实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 192-197.  
YOU Fei, CHEN Haixiang, ZHANG Linhe, et al. Experimental study on flashover of high-voltage transmission lines induced by wood crib fire[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 192-197.
- [13] 米继耀, 施云波, 修德斌, 等. 基于 MSP430 的高压开关柜火灾预警系统的研制[J]. 电子测量技术, 2010, 33(9): 81-84.  
MI Jiyao, SHI Yunbo, XIU Debin, et al. Development of precaution system for high-voltage switchgear based on MSP430[J]. Electronic Measure Technology, 2010, 33(9): 81-84.
- [14] 丁武锋, 庄严, 周春阳. MCU 工程师修炼记[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [15] 白婷, 赵新华, 黄定卫, 等. 杆塔倾角监测与报警系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(1): 10-13.  
BAI Ting, ZHAO Xinhua, HUANG Dingwei, et al. Design of tilt angle measure and alarm system in pole or tower[J]. Computer Measure and Control, 2013, 21(1): 10-13.

收稿日期: 2015-03-24; 修回日期: 2015-05-19

作者简介:

林铭瀚(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电线路在线监测; E-mail: 234831783@qq.com

胡永洪(1974-), 男, 高级工程师, 长期从事输电线路防灾减灾研究及应用工作;

薛毓强(1962-), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为电磁场、输电线路状态监测。

(编辑 葛艳娜)