

输电线路在线监测 WSN 能耗均衡研究*

林俊如^{1,2}, 朱宝晖^{1,2}, 王秋石¹, 曾 鹏¹, 于海斌¹

(1. 中国科学院 沈阳自动化研究所 工业信息学重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 在输电线路在线监测的应用中, 无线传感器网络存在严重的能耗不均衡问题。利用这些无线传感器网络在线状拓扑上呈现出的线性、规律性的局部密集的特征, 提出了基于密集簇的分簇及簇首轮轮转算法和基于命名机制的路由算法。该算法具有很好的可扩展性, 可通过增加少量的转发节点来缓解簇间能耗不均衡的问题。仿真结果验证了算法在能耗均衡方面的有效性, 能够延长网络的生存时间。

关键词: 输电线路监测; 无线传感器网络; 能耗均衡; 分簇算法

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)08-3111-05

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.081

Research on energy balancing of wireless sensor network for transmission line monitoring

LIN Jun-ru^{1,2}, ZHU Bao-hui^{1,2}, WANG Qiu-shi¹, ZENG Peng¹, YU Hai-bin¹

(1. Key Laboratory of Industrial Informatics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In the application of transmission line monitoring, the wireless sensor network has a serious unbalanced energy consumption problem. Features on the wireless sensor network like linear, regular and local compressed topology were utilized to resolve this problem. This paper proposed a cluster head rotation algorithm based on dense clusters and a routing algorithm based on address assignment. The algorithms had high scalability and could alleviate this problem by adding relay nodes. Simulation results demonstrate the effectiveness on energy consumption balancing and network lifetime prolonging.

Key words: transmission line monitoring; wireless sensor network; energy balancing; clustering algorithm

0 引言

无线传感器网络因其易部署、长时间在线等特性已成为近年来的研究热点, 它在国防安全、工业监控、交通管理、环境监测等领域具有广阔的应用前景。目前, 随着电网规模的不断扩大, 在复杂地理条件下铺设的电网越来越多, 输电线路具有分散性大、距离长、难以维护等特点。与电力部门目前使用的定期人工、直升机和机器人在线等巡检手段相比, 无线传感器网络具有能工作于恶劣环境、大面积覆盖、自配置自组织、全天候在线和低成本的优势, 在大规模输电线路监测系统具有很大的应用潜力^[1,2]。

在应用中由于基础设施的布设传感器网络呈现出线性的拓扑特点, 并且大部分传感器部署在杆塔周围, 它们的覆盖范围相互重叠, 采用分簇算法能够将数据进行聚合减少节点的信道接入次数而提升网络性能; 也可以通过簇首来保证实时性的同时网络中大部分节点都处于低能耗状态。相对于平面路由它不需要复杂的路由维护, 具有可扩展性强的特点。

但采用分簇算法后也存在能耗不均的问题, 它包括两方面: a) 簇内能耗不均, 同一个簇内簇首和其他簇成员要承担更多的数据处理、报文转发、网络维护的任务, 需要消耗更多的能量; b) 簇间能耗不均, 在应用中线状无线传感器网络容易产生漏斗效应, 越靠近汇聚节点的簇其需要进行越多的数据传输能量耗散。

为了解决簇内能耗不均问题, 本文提出了基于密集簇的分簇及簇首轮轮转算法来均衡簇间能耗, 并设计了命名机制及其路由算法, 利用线状拓扑本身具有的潜在位置信息, 减少了路由建立和维护的开销。其良好的可扩展性可使它与簇首轮轮转算法相结合, 通过部署普通的转发节点在一定程度上缓解漏斗效应。

1 输电线路监测系统模型

1.1 用于输电线路监测的传感器网络特征

输电线路系统中, 杆塔均匀、线性布设在高压输电线路路上。

收稿日期: 2011-11-28; **修回日期:** 2011-12-30 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60804067, 61100159); 国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03006-005-01); 国家“973”计划前期研究专项课题(2010CB334705); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KGCX2-EW-104, KGCX2-YW-126)

作者简介: 林俊如(1986-), 男, 江西赣州人, 博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统等(linjunru@sia.cn); 朱宝晖(1986-), 男, 天津人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络、智能电网等; 王秋石(1984-), 男, 辽宁鞍山人, 研究实习员, 主要研究方向为智能电网、无线传感器网络等; 曾鹏(1976-), 男, 山东人, 研究员, 博导, 主要研究方向为无线传感器网络、工业无线传感器网络等; 于海斌(1964-), 男, 黑龙江人, 研究员, 博导, 主要研究方向为现场总线、工业无线通信、传感器网络及嵌入式系统等。

两个杆塔之间相距约 300 ~ 500 m, 相距 50 km 的变电站之间大约有 100 ~ 166 个杆塔。输电线路监测中主要监测线路的温湿度、风速风向、舞动振动等实时信息, 常用的传感器及其相关参数如表 1 所示, 大部分传感器节点都安装在杆塔上或杆塔附近。

表 1 输电线路监测中常用的传感器

传感器	传感器数量	单次采样数据	单周期数据	安装位置
		/Byte	/Byte	
风速	1	4	4	杆塔横担上
温度	1	4	4	杆塔横担上
风向	1	4	4	杆塔横担上
湿度	1	4	4	杆塔横担上
雨量	1	4	4	杆塔横担上
拉力	1	4	4	杆塔绝缘子连接处
倾角	1	4	4	杆塔绝缘子连接处
线上温度	3	4	12	靠近绝缘子导线
振动加速度	5	4	20	输电线夹具与防震锤、间隔棒

输电线路监测系统中传感器节点采用高能锂电池或太阳能-蓄电池供电, 其能量有限, 且系统往往需要节点至少正常工作五年, 因此, 更低的能耗是本文主要的设计目标。同时, 电网的 SCADA 系统周期为 4 ~ 8 s^[3], 它对无线传感器网络的实时性也提出了较高的要求。

在输电线路监测中传感器网络的布设有如下特征:

a) 局部密集。大部分传感器架设于杆塔之上或杆塔附近, 整个被密集布设的区域直径不超过 10 m, 仅有少量舞动振动传感器布设在输电线上, 整个线状网络中呈现大量密集的局部区域。

b) 规律性。由于大量的密集局部区域都依附于杆塔上, 且各杆塔上需要监测的内容大致相同, 导致整个网络的布设也因此呈现出规律性。

c) 相对稳定。网络中节点由于输电线路舞动等因素导致的移动与其通信距离相比往往可以忽略不计, 故认为在整个网络中不存在节点移动问题; 同时网络一经布设, 在很长一段时间内, 节点位置、功能等都不会轻易改变, 整个网络相对固定。

1.2 用于输电线路监测的传感器网络模型

针对输电线路监测这种特殊应用, 文献[3]提出了一个两层模型, 每个杆塔有固定簇首进行本地通信与本地数据处理。文献[4]提出了一个可重配置的网络模型(reconfigurable network model), 通过在配置网络中装备的远程通信模块, 能够与汇聚节点直接通信, 均衡网络节点的流量并且提高实时性。笔者采用了与文献[4]中的可重配置网络模型相类似的两层式的线状传感器网络模型, 如图 1 所示, 在这个线状传感器网络中包括以下几种不同的节点:

a) 基本传感器节点(basic sensor node, BSN)。这类节点是整体网络中数量最多的节点, 主要有对输电线路相关参数检测的感知功能和短距无线通信功能, 大部分布设在杆塔周围。

b) 数据转发节点(data relay node, DRN)。这类节点仅包括短距无线通信功能, 用于转发来自其他节点的数据, 它能够增加网络的可靠性, 布设在杆塔上。

c) 增强型数据转发节点(enhanced relay node, ERN)。此类节点不仅包括基于如 IEEE 802.15.4 的短距离无线通信功能, 也包括基于 GSM、GPRS、UMTS 等技术的远程无线通信功能。它用于直接将收集到的数据发送给中心汇聚节点, 布设在

杆塔上。

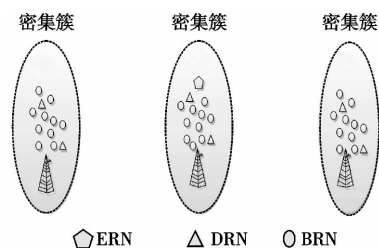


图 1 输电线路监测系统的传感器网络模型

在网络中加入 ERN 后整个网络将呈现出两层特性, 底层主要由 BSN 和 DRN 构成, 其数据都将由上层转发给中心汇聚节点, BSN、DRN 都采用短程无线技术, 它们构成一个多跳的无线传感器网络, 通过无线传感器网络将传感数据路由至 ERN 节点。上层由 ERN 构成, 它与中心汇聚节点进行通信, 它的引入能够缓解输电线路中部节点数据传输延迟大及两端节点能量消耗过快的问题。同时由于整个线路很长易发生可能存在的网络故障, 受到潜在的安全攻击, 通过增加 ERN 能够大大增加网络的可靠性。本文的研究内容主要集中在底层的无线传感器网络上。

输电线路监测网络运行时, 存在两种不同特征的数据, 一种是传感器周期性采集的数据构成的周期性数据; 另一种是由报警、系统查询、配置等构成的非周期性数据。其中各节点的周期性数据存在较大的相关性, 它们的发送时间大致相等, 此时容易导致网络碰撞拥塞, 而非周期性数据传输时网络一般较为空闲。

2 基于密集簇的分簇算法

现有的分簇算法中, LEACH^[5] 采用了随机簇头选择机制, 其簇头选择中没有考虑节点的剩余能量有可能导致部分簇首节点能耗过大, 影响网络寿命并且其采用单跳通信, 可扩展性差。LEACH_C 和 LEACH_F^[5] 都是由基站负责挑选簇头, 其计算量较大、可扩展性差, 并且基站需要收集全局信息, 控制开销大。PEGASIS^[6] 采用贪心算法利用每个节点的地理位置信息来进行簇头选择, 它平均通信距离较短, 但增加了延迟, 且需要知道每个节点的位置信息。HEED^[7] 是种分布式成簇算法, 它依据剩余能量和簇内通信代价两个主、次参数来计算自己成为簇头的概率。UCEBRP^[8] 针对矿井无线传感网的带状特性提出了一个簇规模自适应调节的能量均衡分簇路由协议。文献[9]依据最小跳数原则对网络中的局部区域突发事件进行负载均衡。LEACH、LEACH_C、LEACH_F、PEGASIS、HEED 都是针对普通应用的平面拓扑结构设计, 它们没有考虑输电线路中线性拓扑结构带来的影响。而 SWSN-LBR, 文献[9]虽然面向的是带状网络的应用, 但在带状的前提下其节点的布设依然是随机的, 没有考虑到输电线路监测的应用中节点布设存在一定的规律性。

在分簇的网络模型中, 簇首节点需要进行簇内数据收集、簇间路由、数据转发, 为了保证网络的连通性和实时性, 簇首节点需要频繁地唤醒, 导致了簇首节点能量消耗非常大, 成为网络寿命的瓶颈。本文结合网络拓扑局部密集的特点, 采用了一种基于密集簇的簇首轮转算法, 只在同一个局部密集簇中选举簇首, 能减少簇首选举的开销, 并且轮换后不必进行进一步的网络拓扑管理。

2.1 密集簇构造阶段

密集簇的构造算法主要采用以下步骤:

a) 新节点加入网络后,广播其剩余能量信息。

b) 当节点检测到新的邻居时,利用接收 RSSI 的值判断新邻居是否位于同一杆塔上,若新邻居位于同一杆塔上,将其加入密集簇邻居列表中。

c) 若当前节点从属于某一密集簇,则由此簇簇首负责簇成员的更新和簇首的变更。只要新加入的节点剩余能量大于当前簇首剩余能量的 α ($1 < \alpha < 2$) 倍时,就开始簇首变更,将新加入的节点设定为簇首,并向簇内广播变更结果。

d) 若当前节点不从属任何密集簇,并且当前密集簇邻居列表中节点个数大于 3,则当前节点向新节点发送携带其剩余能量信息的报文;新节点广播剩余能量收集请求,收集各邻居的剩余能量信息并选择剩余能量最大的节点为簇首,随即由新簇首广播密集簇信息,新的密集簇初始化完成。

2.2 数据收集阶段

数据收集阶段主要是进行网络中周期性数据的收集,因此这个阶段本身也是周期性地进行的。它由簇首收集本簇内所有节点的传感器数据,并进行数据聚合等本地处理以减少设备接入信道的次数从而减少网络碰撞。随后簇首节点向汇聚中心转发数据。在这个阶段簇首也进行一次剩余能量信息广播,其他簇成员收集簇首能量信息以驱动簇首轮换程序。

2.3 簇首轮换阶段

因为面向输电线路监测网络具有相对稳定的特性,一旦网络自组织完成整个密集簇在网络的整个生存周期内几乎是不变化的,但是因为簇首节点消耗能量相对较快,为了使在密集簇内达到能量均衡从而延长网络的使用寿命的目的,需要在恰当的时候重新选择簇首。驱动簇首轮换主要有两种情况:簇成员监测到簇首节点剩余能量低于某一阈值或者簇首失效簇成员连续多次未收到簇首发送的剩余能量更新报文。簇首变更的流程为:

a) 当前主簇首在数据收集阶段向其所属密集簇内广播剩余能量更新报文。

b) 簇成员节点若发现当前主簇首的能量与自身能量的比值低于阈值 $1/\alpha$,则向密集簇内广播簇首变更请求,各节点收到信息后向当前簇首报告其自身能量;当前簇首收集完所有簇内节点的能量信息后,将其排序,并选择剩余能量最多的节点作为新的簇首,并向新簇首发簇首变量报文,随后向全网广播簇首变更消息。

c) 簇成员连续三次未接收到簇首的剩余能量更新报文,则视当前簇首失效;若其未收到剩余能量收集请求,则广播剩余能量收集请求,收集各邻居的剩余能量信息并选择剩余能量最大的节点为簇首,随即由新簇首广播密集簇信息,簇首轮换完成。

需要注意的是,若密集簇中包含 ERN 节点,此 ERN 节点一直为此簇簇首。通过根据剩余能量更换簇首的算法能够均衡密集簇内各节点的流量,延长网络的使用寿命。

3 基于命名机制的路由选择算法

根据线性网络和局部密集的特点,本文提出了相应的基于命名机制的路由选择算法。这种基于地址命名的路由算法不需要建立路由表,减少了路由维护的开销,根据各节点的地址就能够找到下一跳合适的路由。

在本设计里,节点地址被划分为三层,根据节点地址所包

含的信息可以表示为 ERN、DENSESET、BASICADDR。其中:ERN 域表示节点所属的 ERN 节点的地址;DENSESET 域表示节点所隶属的密集簇地址,若节点不属于任何簇,则表示最近的密集簇地址;BASICADDR 域用来区分分布在密集簇周围的不同节点。

3.1 地址分配算法

按组网时节点加入的顺序给每个节点分配地址:

a) ERN 节点地址分配。在整个系统中 ERN 设备相对较少,沿线路顺序分配 ERN 节点地址,ERN 节点的 DENSESET 域和 BASICADDR 域均为 0。

b) 密集簇地址分配。如图 2 所示,ERN 节点(汇聚节点)处的密集簇称为 0 号簇,簇内节点的 DENSESET 域为 0,随后左右最邻近它的密集簇被加入网络,依次表示为 1、2 号簇。线状网络中向 1 号簇延伸的一侧被称为奇数方向,按地理位置由近及远分别标志为 1、3、5、7 号簇等;相应地,另一方向称为偶数方向,被标志为 2、4、6、8 号簇等。

c) 形成新密集簇并成功申请密集簇地址后,按节点加入的先后顺序给密集簇内的节点分配 BASICADDR 域地址。

按上述算法得到的一个地址分配结果如图 2 所示,一个 ERN 节点地址为 (1,0,0),其 ERN 域为 1,所在簇的 DENSESET 域为 0,同簇内某一 BSN 地址为 (1,0,3)。ERN 右侧的密集簇其 DENSESET 域以 2 递增分别为 2、4,同时它们都向同一 ERN 节点汇聚数据,因此它们的 ERN 域皆为 1。所以其簇中地址分别为 (1,2,a), (1,4,b)。

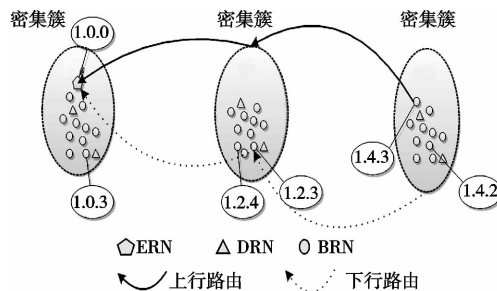


图2 命名机制

3.2 基于命名机制的路由算法

基于命名机制的路由机制算法由以下两部分组成:

a) 下行路由,即报文中目的地址的 DENSESET 域比当前节点的 DENSESET 域大的情况,此时报文地址沿网络向下寻找合适的路由。

若报文中目的地址的 DENSESET 域比当前节点的 DENSESET 域大 2 以上,且当前节点的 DENSESET 域不为 0,则下一跳为沿着奇方向或偶方向的下一个密集簇簇首。若当前节点 DENSESET 域为 0,即当前为零簇首,此时需要根据目的地址中 DENSESET 域的奇偶判断路由方向。若两者的差值等于 2,则下一跳即为报文中的目的节点。

b) 上行路由,即报文中目的地址的 DENSESET 域比当前节点的 DENSESET 域小的情况,此时报文地址沿网络向上寻找合适的路由。

若当前节点的 DENSESET 域比报文中目的地址的 DENSESET 域大 2 以上,且当前节点的 DENSESET 域不为 1、2,则下一跳为沿着奇方向或偶方向的上一个密集簇。如果当前节点的 DENSESET 域为 1 或 2,下一跳即为零簇首。若两者的差值等于 2,则下一跳即为报文中的目的地址。

用伪代码可以分别描述如下:

```

1) 上行路由
if (Dest. DenseSet - CurNode. DenseSet > 2 && CurNode. DenseSet !=
0) {
    NextHop. DenseSet = CurNode. DenseSet + 2;
    NextHop. BasicAddr = CLUSTER_HEADER_ADDR;
} else if (CurNode. DenseSet == 0) {
    if (Dest. DenseSet ∈ ODD) {
        NextHop. DenseSet = 1;
        NextHop. BasicAddr = CLUSTER_HEADER_ADDR;
    } else {
        NextHop. DenseSet = 2;
        NextHop. BasicAddr = CLUSTER_HEADER_ADDR;
    }
} else if (Dest. DenseSet - CurNode. DenseSet == 2 || Dest. DenseSet ==
1) {
    NextHop = Dest;
} else {
    NextHop = NOTFOUD;
}
2) 下行路由
if (CurNode. DenseSet - DestNode. DenseSet > 2) {
    if (CurNode. DenseSet != 1 && CurNode. DenseSet != 2) {
        NextHop. DenseSet = CurNode. DenseSet - 2;
        NextHop. BasicAddr = CLUSTER_HEADER_ADDR;
    } else {
        NextHop. DenseSet = 0;
        NextHop. BasicAddr = CLUSTER_HEADER_ADDR;
    }
} else if (Dest. DenseSet - CurNode. DenseSet == 2) {
    NextHop = Dest;
} else {
    NextHop = NOTFOUD;
}

```

其中:Dest 表示报文中的目的节点;CurNode 表示当前节点;NextHop 表示报文的下一跳节点;CLUSTER_HEADER_ADDR 表示簇首;ODD 表示奇数集合。

4 仿真实验及结果分析

采用 OPNET 仿真软件对算法进行了仿真测试。在仿真中,仿真区域设置为 4 500 m(50 m,汇聚节点位于(19,8),共 11 个簇,每个簇包含 6 个节点,簇之间相距约为 400 m,最远簇的簇首位于(4111 m,10 m)。实验中每个节点产生的流量的参数如表 2 所示。

表 2 仿真中单个节点产生的流量

	数据产生间隔时间分布/s	数据长度/Byte
周期性数据	constant(1200)	constant(20)
非周期性数据	uniform(0,300)	uniform(20,30)

仿真采用的能量消耗模型如表 3 所示,由沈阳自动化所工业信息学实验室研制的无线模块 SiA2445 的测量数据所得,模块通过功率放大传输距离可达户外视距 600 m,能够覆盖相邻杆塔,满足应用需求。

表 3 模块及仿真的能耗参数

	发射电流	接收电流	休眠电流	工作电压
SiA2445 参数	85mA@3.3V, +12 dBm	20 mA@3.3V	<8 μA	2.8~3.6 V
仿真采用参数	85 mA	20 mA	8 μA	3.3 V

在仿真中使用了两种 MAC 层:a)IEEE 802.15.4 MAC 层,模拟 ZigBee 的非信标模式,因为 SCADA 对实时性有要求,实验时数据请求周期设为 10 s;b)面向输电线路监测的 WSN 混合式 MAC 协议^[10],它将网络的每个工作周期分为两个阶段,在网络空闲阶段基于 X-MAC^[11]协议传输非周期性数据,在网络繁忙阶段通过流水线式调度传输减少网络碰撞,提高网络性能。

首先验证基于密集簇的分簇轮换算法对能量均衡的有效性,在这个实验中节点的初始能量设为 4 096 J(4 节 1.5 V 2 300 mAh 电池为 49 680 J)。簇首轮换能量阈值 α 设为 1.01。实验数据从一跳节点处原簇首和任一其他簇成员获得。

从图 3(a)、图 4(a)中可以看出,当采用 ZigBee 非信标模式时,簇首由于一直处于唤醒状态,其能量消耗为普通簇成员的 660 倍,采用混合 MAC 协议后簇首也能在网络空闲阶段进行休眠,但能量消耗也为普通簇成员的 44 倍,说明了在应用中各簇成员能量消耗非常不均衡,这将导致簇首成为网络生存时间的瓶颈。从图 3(b)、图 4(b)可以看出,采用基于密集簇的簇首轮换后同一个密集簇的节点都会承担簇首功能,均衡了节点的能量消耗。

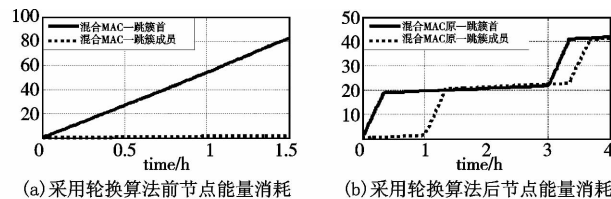


图 3 采用混合 MAC 协议时未使用和使用簇首轮换后的能量消耗情况

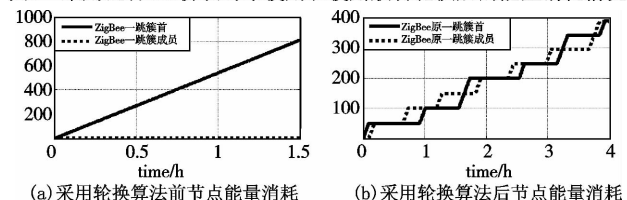


图 4 采用 ZigBee 非信标模式时未使用和使用簇首轮换后的能量消耗情况

从实验可以发现,无论 ZigBee 非信标模式是否采用基于密集簇的簇首轮换算法,由于簇首的 MAC 层工作方式使其能量消耗都无法满足应用需求。因此在仿真实验 2 中 MAC 层只使用了面向输电线路监测的 WSN 混合式 MAC 协议。在实验中节点的初始能量设为 49 680 J,簇首轮换能量阈值 α 为 1.05。将网络从开始运行到其中任一节点能量低于 50 J 的这段时间定义为网络生存时间,网络生存时间随每个簇内节点个数的变化如图 5 所示,采用基于密集簇的簇首轮换算法后各节点能量消耗相对均衡使网络生存时间有非常大的提高。从图 5 中可以看出,随着簇内节点个数的增加,网络中的流量也会相应地增加,这导致网络中簇首节点负担加重,当不采用簇首轮换算法时网络生存时间也随之下降;但采用簇首轮换算法后,簇内节点的增加会增加网络的流量,但由于其能均衡能量消耗,网络的生存时间并不会产生太大的改变。可以看出,基于密集簇的算法能够均衡网络的能量消耗、延长网络的生存时间。

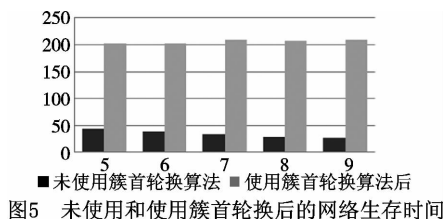


图 5 未使用和使用簇首轮换后的网络生存时间

实验中发现网络的生存时间受漏斗效应的影响很明显,跳数为1的簇内节点成为了整个网络生存时间的瓶颈,采用基于密集簇的簇首轮换算法后,仅需要通过在靠近汇聚节点的簇内增加相应的转发节点(不主动发送非周期性数据),就能大大延长网络的生存时间。在实验中通过在原来每个簇六个节点的基础上增加相应的转发节点的结果如表4所示,网络增加六个转发节点(增加了9%的节点数量)即将生存时间从202.3天延长至293.4天(延长了45%),说明采用基于密集簇的簇首轮换算法后能够以较小的代价解决漏斗效应。

表4 添加ERN节点后的网络生存时间

一跳簇节点 添加个数	两跳簇节点 添加个数	最先死亡节点 所在簇的跳数	生存时间 /天
0	0	1	202.3
1	0	1	236.0
2	0	2	246.2
3	0	2	248.6
4	2	3	293.4

5 结束语

本文首先分析面向输电线路在线监测的线状无线传感器网络的特点,并根据其在拓扑结构上线性、规律性的局部密集的特征提出了基于密集簇的分簇和簇首轮换算法,它具有分布式、控制开销小、网络维护简单的特点,能够很好地均衡簇内能量消耗。同时在这些特点上提出了基于命名机制的路由算法,利用拓扑本身的位置信息减少路由建立和维护开销,并能够很好地应对簇首轮换对路由的影响。通过仿真实验验证了分簇算法在能量均衡和提高网络生存时间的有效性。仿真实验还表明在基于密集簇的簇首轮换算法和基于命名机制的路由算法框架下,可以简单地通过部署少量转发节点来均衡簇间的能量消耗。在将来的工作中,将研究网络中具有少量部署在输电线路上的传感器时(如舞动传感器)对当前分簇算法的影响,同时还将研究和设计MAC协议来适应这种分簇算法以满足输电线路监测的应用。

参考文献:

- [1] YI Yang, DIVAN D, HARLEY R G, *et al.* Power line sensornet: a new concept for power grid monitoring [C]//Proc of Power Engineering Society General Meeting. 2006:8.
- [2] YI Yang, LAMBERT F, DIVAN D. A survey on technologies for implementing sensor networks for power delivery systems [C]//Proc of Power Engineering Society General Meeting. 2007: 1-8.
- [3] LEON R A, VITTAL V, MANIMARAN G. Application of sensor network for secure electric energy infrastructure [J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2007, 22(2): 1021-1028.
- [4] HUNG K S, LEE W K, LI V O K, *et al.* On wireless sensors communication for overhead transmission line monitoring in power delivery systems [C]//Proc of the 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications. 2010: 309-314.
- [5] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
- [6] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S. PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems [C]//Proc of IEEE Aerospace Conference. 2002: 1125-1130.
- [7] YOUNIS O, FAHMY S. Distributed clustering in Ad-hoc sensor networks: a hybrid, energy-efficient approach [C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2004: 629-640.
- [8] 吴华君, 张自力, 李卫. 一种适用于煤矿井下无线传感网的能量均衡路由协议 [J]. *计算机科学*, 2011, 38(4): 145-150.
- [9] 于永华, 李丽芬, 朱永利. 长链型数据收集传感器网络的负载均衡研究 [J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(7): 2724-2726.
- [10] 林俊如, 朱宝晖. A wireless sensor networks hybrid MAC protocol for overhead transmission line monitoring [R]. 2011.
- [11] BUETTNER M, YEE G V, ANDERSON E, *et al.* X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks [C]//Proc of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2006: 307-320.