

Doi:10.3969/j.issn.1003-5060.2011.12.020

## 面向电网监测的线状 WSN 节点 中继次数均衡路由算法

魏振春<sup>1,2</sup>, 汪国胜<sup>1</sup>, 石雷<sup>1,2</sup>, 卫星<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**在面向输电线路监测的线状 WSN 中, 如果无线传感器节点将采集到的数据按照从节点到基站逐点中继传递, 则会导致节点中继次数的不均衡; 而在采用现场取电技术解决能量供给问题时, 需要尽可能使节点的中继次数均衡, 以此增加网络的生命周期。文章提出了一种节点中继次数均衡路由算法, 算法通过将传感器网络中的节点划分为簇和簇群, 建立 2 层网络结构, 节点依据中继次数路由表决定是否参与数据包的路由, 保证整个传感器网络节点作为中继路由的次数均衡, 从而延长网络的生命周期。

**关键词:**输电线路监测; 线状 WSN; 中继次数; 生命周期

中图分类号: TP393 文献标识码: A 文章编号: 1003-5060(2011)12-1841-05

### Routing algorithm for nodes relay times balancing in linear WSN for power grid monitoring

WEI Zhen-chun<sup>1,2</sup>, WANG Guo-sheng<sup>1</sup>, SHI Lei<sup>1,2</sup>, WEI Xing<sup>1,2</sup>

(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In the linear WSN for monitoring of transmission line, unbalanced relay times will occur if the wireless sensor nodes transmit the collected data from the node to base station point by point. While solving the power supply problem through the technology of taking power in site, the balancing of nodes relay times should be kept in order to increase the life cycle of network. This paper puts forward a routing algorithm of nodes relay times balancing in which the nodes of sensor network are divided into clusters and cluster groups and a two-tiered network structure is established. The nodes decide whether to join the data packet routing or not according to the routing table of relay times, which ensures the times balancing of relay routing in the whole sensor network and extends the life cycle of network.

**Key words:** monitoring of transmission line; linear WSN; relay time; life cycle

随着超/特高压输电线路(500 kV、750 kV、1 000 kV)开始大量建设, 电网规模不断扩大, 线路走廊需要穿越各种复杂的地理环境(如沼泽、丛林、戈壁和崇山峻岭等无人区), 这些都使得电力

线路的巡检工作更加困难; 另一方面, 供电企业对输电线路的管理维护向信息化和智能化方向发展, 而依靠传统巡检方式获取的信息量非常有限, 难以满足要求, 因而急需一种有力的监控手段对

收稿日期: 2011-03-10; 修回日期: 2011-04-27

基金项目: 安徽省国际科技合作计划资助项目(10080703001); 广东省产学研合作资助项目(2010B090400332); 浙江省科技厅优先主题重大资助项目(2010c11051); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011236)和合肥工业大学重大项目预研专项资助项目(2010HGZY0002)

作者简介: 魏振春(1978—), 男, 宁夏青铜峡人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师。

输电线路进行实时监测。在高压输电电路上布置传感器节点,利用传感器采集高压输电线路的状态信息和自然物理信息,通过传感器节点组成的线状无线传感器网络<sup>[1]</sup>对采集到的数据进行传输,即可实现对高压输电线路的在线实时监测。

在线状无线传感器网络中,数据传输的方式由路由协议决定<sup>[2]</sup>,如果采集到的数据都是按照从节点到基站逐点中继传递,节点中继次数将呈现离基站越近中继次数越多的倒三角分布情况,导致节点中继次数的不均衡。本文通过将传感器网络中的节点划分为簇和簇群,建立了 2 层网络结构,提出一种节点中继次数均衡路由算法。

## 1 相关工作

基于无线传感网的高压输电线路监测系统的网络结构,如图 1 所示。通过在高压输电电路上均匀布置若干普通无线传感器节点,并按照特定距离  $D$ (与传感器节点最大传输距离有关)布置若干带有 GPRS/CDMA 通信模块的汇聚 Sink 节点,自组织后成为无线传感器网络。传感器节点采集高压输电线路的状况以及周边的环境状况,如温度、风速、导线的弧垂、跨距等,实时以无线多跳的方式将数据传输到汇聚节点,然后通过公网将信息发送到监测中心。用于高压输电线路监测的无线传感器网络沿着线路进行人工布置,铁塔安装后其位置信息已基本确定,因而无线传感器节点的定位问题比较容易解决。

文献[3]提出的 MERR(Minimum Energy Relay Routing,简称 MERR)路由协议通过选择最优中继传输距离,然后通过中继节点转发信息,从而使整个线状网消耗的能量最小;而 AMERR<sup>[4]</sup>(Adaptive Minimum Energy Relay Routing,简称 AMERR)则在 MERR 基础之上调整了最优传输距离的计算方法。文献[5]提出的基于电网监测的无线传感器网络短路径路由算法通过短路径场的建立来预留多条较短距离路径,并在实际数据转发时选择剩余能量最大的节点转发,从而提高了传输可靠性和网络生命周期;文献[6]提出的 REECR(Energy Efficient Routing Protocol Based on Residual Energy and Energy Consumption Rate,简称 REECR)算法综合考虑所有节点的剩余能量和能量消耗率来选择簇头节点,以达到均匀消耗节点能量和延长网络生命周期的目的;文献[7]则在 REECR 的基础上将簇头间的距离也作为选择簇头节点的依据之一,与节点的剩余能量和能量消耗率一起来选择簇头,提出 D-REECR(Distance-based REECR,简称 D-REECR)路由协议。以上协议均将能量问题作为首要约束条件,而高压输电线路监测系统中通过采用现场取电、无线电供电等技术解决能量问题,所以能量问题不再是首要的约束条件,本文摒弃能量利用的限制条件,重点考虑节点中继次数的均衡性问题,提出了线状 WSN 节点中继次数均衡路由算法。

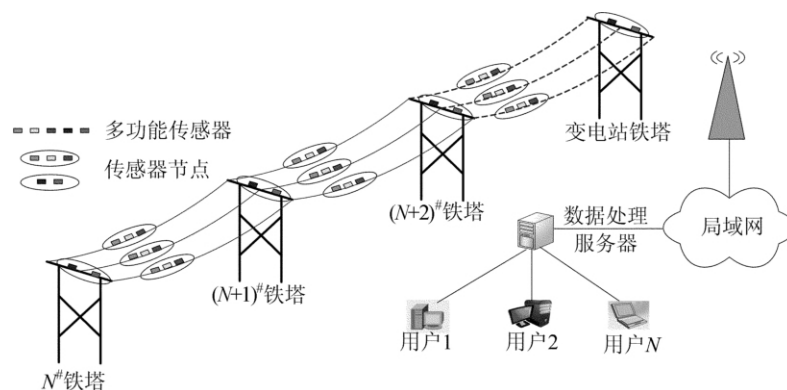


图 1 系统示意图

## 2 线状 WSN 节点中继次数均衡路由算法

由于通过汇聚节点将整个沿输电线路布置的 WSN 节点分割成最大距离为  $D$  的若干段,每段构成一个独立的 WSN 网络,因此本文仅讨论距

离  $D$  范围内节点的路由问题。距离  $D$  范围内线状 WSN 分层结构如图 2 所示。

假定图 1 中由单个铁塔周围的传感器节点组成一个簇,从每个簇中选择一个节点作为簇头,再将若干个簇组成一个簇群,每个簇群中含有若干

个簇头节点,仅簇头节点参与中继路由任务。线状 WSN 节点中继次数均衡路由算法可以划分为

节点分簇阶段、分簇组群阶段和路由阶段 3 个部分。

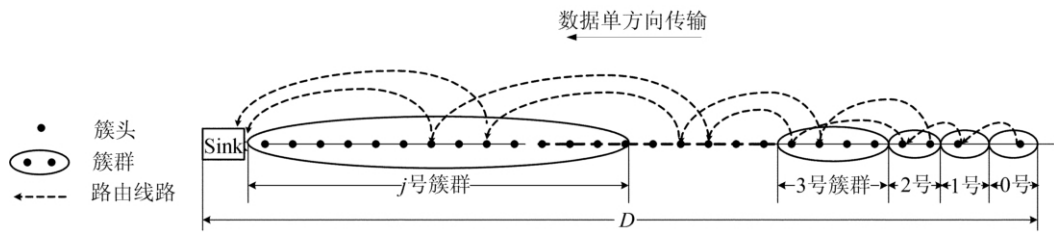


图 2 网络分层及路由示意图

### 2.1 节点分簇阶段

假设线状无线传感器网络节点  $i$  到 Sink 的距离为  $S_i$ , 两铁塔间距为  $d$ , 若

$$S_i/d - 0.5 < k \leq S_i/d + 0.5, k = 1, 2, 3, \dots,$$

则规定节点  $i$  位于第  $k$  个簇中。簇中簇头节点的选择参考 LEACH<sup>[8]</sup>, 具体选择过程如下。

节点随机产生一个  $0 \sim 1$  之间的数, 如果这个随机数小于阈值  $P(m)$ , 则认为自己即为簇头。如果在本轮中已经当选过簇头节点, 则把  $P(m)$  置为 0, 之后此节点在本轮中就不会再次当选为簇头。随着已当选过簇头节点数目的增加, 剩余节点当选为簇头的阈值随之增大, 因此产生的随机数小于阈值的概率随之增大, 当只剩一个节点未当选时, 则该节点一定当选。当所有节点都当选过簇头时, 则进行新一轮簇头的选择。其阈值计算公式为:

$$P(m) = \begin{cases} 0, & m \in C; \\ \frac{p}{1 - p \left( r \bmod \frac{1}{p} \right)}, & m \notin C \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $p$  为簇头数与总节点数的百分比;  $r$  为当前的轮数;  $C$  为最近  $1/p$  轮中非簇头节点集。

### 2.2 分簇组群阶段

从离 Sink 最远端开始按簇的个数将相邻的若干个簇组成簇群, 设  $j$  号簇群所含簇的个数为  $N_j$ , 采用 2 种方案进行分簇组群。

方案 1 分簇组群依据如下:

$$N_j = \begin{cases} 1, & j = 0, 1; \\ 2^{j-1}, & j = 2, 3, 4, \dots \end{cases} \quad (2)$$

方案 2 分簇组群依据如下:

$$N_j = 1 + \beta j, \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

其中,  $\beta$  为簇群增长系数。

### 2.3 路由阶段

路由协议采用分层网络结构, 并通过统计每个传感器节点的中继路由次数使其达到均衡的目

的。每个节点均保存有本簇群内所有簇头节点的中继次数表, 中继次数表中包括节点的 ID 标识和中继次数。具体路由过程如下: 所有节点的中继次数路由表均为空, 当有数据传输任务到达时, 节点首先判断自己是否为簇头节点, 如果不是则直接丢弃该数据包, 否则根据数据包 ID 判断此数据包是否为上游相邻簇群传来的, 如果是则搜索本节点中继次数表, 如果本节点的中继次数最少, 则转发此数据包, 并加上自己的 ID 标识, 否则直接丢弃数据包。如果中继次数表中最小中继次数不唯一, 则节点 ID 标识最小的节点参与本数据包的路由传递任务。

节点作为中继节点传递数据后, 广播本节点的 ID, 相同簇群内的簇头节点收到此 ID 的数据包后, 更新各自的中继次数表。每个节点收到数据包后所执行的算法如下:

- (1) 节点 A 接收到数据包。
- (2) 判断节点 A 是否为簇头节点, 如果是转到步骤(3), 否则转到步骤(8)。
- (3) 判断数据包中的 ID 标识是否为节点 A 的上游簇群内节点的 ID, 如果是转到步骤(4), 否则转到步骤(8)。
- (4) 检索节点 A 的中继次数路由表。判断节点 A 的中继次数是否最少, 如果是转到步骤(5), 否则转到步骤(8)。
- (5) 判断节点 A 的中继次数路由表内最少中继次数的节点个数是否为 1, 如果是 1 转到步骤(7), 否则转到步骤(6)。
- (6) 寻找节点 A 的中继次数表中的中继次数最小且 ID 标识最小的节点, 判断其 ID 是否为节点 A 的 ID, 如果是转到步骤(7), 否则转到步骤(8)。
- (7) 中继数据包, 更新中继次数路由表。
- (8) 丢弃数据包。
- (9) 结束。

### 3 仿真实验

GPSR<sup>[9]</sup> (Greedy Perimeter Stateless Routing, 简称 GPSR) 算法也是不把能量问题作为首要的约束条件, 与本文的研究背景类似, 因此选择和 GPSR 进行比较。GPSR 仅仅依靠相邻节点位置信息选择路由, 只能实现局部最优, 用于线状传感器网络时容易出现中继次数呈现离基站越近中继次数越多的倒三角分布情况, 导致节点中继次数的不均衡。而在本文提出的簇群选取方案 1 的路由算法中假设每个节点产生  $r$  个数据包, 则每个簇群中的每个簇  $j$  内节点作为中继路由的平均次数为:

$$M_j = \begin{cases} 0, & j = 0; \\ r, & j = 1, 2, 3, 4, \dots \end{cases} \quad (4)$$

从而达到了中继次数均衡的目标。同时方案 2 的选取综合考虑 GPSR 和方案 1, 避免了 GPSR 算法中继次数增长过快以及方案 1 中离 Sink 节点最近的簇群内中继节点单跳距离过长的问题。

本文的仿真条件是在线状区域上, 均匀分布 128 个簇, 每个簇包括 5 个传感器节点, 每个节点产生 50 个数据包, MAC 层采用 802.11 协议, 其中方案 2 中的  $\beta$  取 3, 使用网络仿真器 NS-2 进行仿真实验。采用不同方案时, 0~11 号簇的簇内节点平均中继次数对比如图 3 所示。

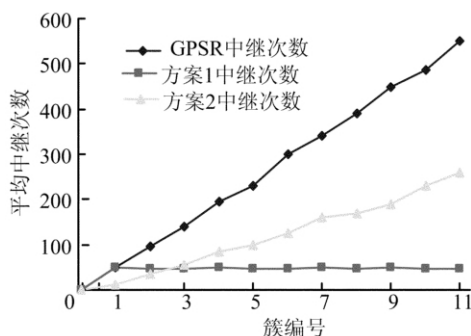


图 3 0~11 号簇内节点平均中继次数对比

仿真实验结果表明, GPSR 算法中到 Sink 距离越近的节点中继次数越多, 并且呈线性增长, 且增长幅度非常明显; 采用方案 2 时, 虽然中继次数仍然线性增长, 但增长幅度比较缓慢; 而采用簇群选取方案 1 的路由算法时, 簇内节点平均中继次数为 48 次, 和每个节点产生的数据包数基本相当, 从而使节点的平均中继次数达到均衡, 避免了由于某些节点中继任务过重而提前失效死亡, 从而延长了网络的生命周期。

假设无线传感器节点的最大传输距离为  $S$ , 铁塔间距为  $d$ , 从而得到方案 1 中距离  $D$  的最大值 MAXD 的计算方法为:

$$\text{MAXD} = 2^{\lfloor \frac{S}{2\beta d} \rfloor + 2} d \quad (5)$$

方案 2 中距离  $D$  的最大值 MAXD 的计算方法为:

$$\text{MAXD} = \left( \frac{\lfloor \frac{S + (\beta - 2)d}{2\beta d} \rfloor + 1}{2} \right) \left( \frac{\lfloor \frac{S + (\beta - 2)d}{2\beta d} \rfloor + 2}{2} \right) d \quad (6)$$

当  $\beta$  取 3,  $d$  取 50 m, 分别采用方案 1 与方案 2 时, 对应不同的节点最大传输距离所得到的距离  $D$  的最大值 MAXD 的对比, 如图 4 所示。从图 4 可以看出, 由于在分簇群时方案 1 的簇群内节点个数增长幅度比方案 2 要大, 所以当  $S \geq 850$  m 以后, 在节点最大传输距离相等的情况下, 方案 2 的距离  $D$  的最大值 MAXD 要比方案 1 大, 从而得到方案 2 的网络覆盖范围比方案 1 大。而在高压输电线路中铁塔间距是固定的, 所以传感器节点总体均匀分布, 同时为了避免方案 1 导致离 Sink 节点最近的簇群内中继节点单跳距离过长, 以及尽量保证网络覆盖范围更大、中继次数均衡, 因此方案 2 的路由算法更适合高压输电线路监测这类线状无线传感器网络。

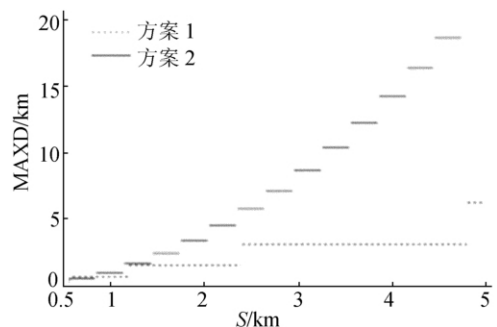


图 4 距离  $D$  的最大值 MAXD 对比

### 4 结束语

高压输电线路监测系统中通过采用现场取电、无线电供电等技术, 能量问题不再是首要约束条件, 因此研究中主要考虑线状无线传感网中节点的中继次数, 本文提出了一种节点中继次数均衡路由算法。该算法使得整个网络节点的中继次数达到均衡, 从而有效延长网络的生命周期。同时, 综合考虑高压输电线路的特殊结构以及方案 1 后认为方案 2 更适合本文的研究背景。受传感器节点无线最大传输距离的限制, 本文提出的路由算法更适用于短距离密集型线状无线传感器网络。

## [参 考 文 献]

- [1] 王文光,刘士兴,谢武军. 无线传感器网络概述[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2010,33(9):1416-1419,1437.
- [2] 彭 静,刘光祜,谢世欢. 无线传感器网络路由协议研究现状与趋势[J]. 计算机应用研究,2007(2):4-9.
- [3] Zimmerling M, Dargie W, Reason J M. Energy-efficient routing in linear wireless sensor networks[C]//Proc IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems, 2007:1-3.
- [4] Zimmerling M, Dargie W, Reason J M. Localized power-aware routing in linear wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Context-awareness for Self-Managing Systems, 2008:24-33.
- [5] 郑更生,贺贵明,谢治平. 基于电网监测的无线传感器网络短路径路由算法[J]. 武汉大学学报:工学版,2007,40(2):121-124.
- [6] Li Xiaoya, Huang Daoping, Yang Jian. Energy efficient routing protocol based on residual energy and energy Consumption rate for heterogeneous wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 26th Chinese Control Conference, 2007:587-590.
- [7] 李小亚,黄道平,孙宗海. 一种异构传感器网络的能量有效路由算法[J]. 计算机科学,2008,35(5):60-63.
- [8] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2002:3005-3014.
- [9] Karp B, Kung H. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks [C]//Proceedings of the 6th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking, 2000:243-254.

(责任编辑 张秋娟)

(上接第 1794 页)

## 3 结 论

电池性能的优劣直接影响混合动力汽车的整车功能。实验结果表明,研发的 6 A·h MH/Ni 动力电池单体具有良好的一致性、高低温性能以及较高的大电流充放电效率。由于电池本身电极过程的速率控制步骤受温度影响较大,尤其是在低温条件下,电极过程氢原子的扩散系数很低,因此电池低温性能相对较差。总体的分析结果表明,电池的性能可以满足整车自动启停、功率补偿和制动能量回收功能。

## [参 考 文 献]

- [1] 徐 阳,吴 森. 发展混合动力技术推动电动汽车产业化进程[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2005,27(3):56-59.
- [2] 诸自强,黄毓琛,邹国棠,等. 陈清泉院士论文选集:现代电动车、电机驱动及电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005:130-152.
- [3] 赵家宏,邢志勇,李相哲,等. 用于电动车的新型高能动力镍氢电池研发[J]. 能源研究与利用,2005(3):1-2,10.
- [4] Ohms D, Kohlhase M, Benczur-Urmossy G, et al. New developments on high power alkaline batteries for industrial applications[J]. J Power Sources, 2002, 105(2):127-133.
- [5] Taniguchi A, Fujioka N, Ikoma M, et al. Development of nickel/metal hydride batteries for EVs and HEVs[J]. J Power Sources, 2001, 100(1/2):117-124.
- [6] 秦大同,舒 红,胡建军,等. 轻度混合动力汽车动力性能仿真及动力系统参数匹配研究[J]. 机械工程学报,2004,40(2):78-82.
- [7] 陈人杰,李 丽,吴 锋,等. 低温对储氢合金及电解液性能的影响[J]. 矿冶工程,2007,27(2):44-46.
- [8] 齐国光,李建民,郑 航,等. 电动汽车电量计量技术的研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,1997,37(3):16-23.
- [9] 朱 元,韩晓东,田光宇. 电动汽车动力电池 SOC 预测技术研究[J]. 电源技术,2000,24(3):152-156.

(责任编辑 闫杏丽)