

# 基于长链树状无线传感器网络实现 输电线路在线监测数据传输

李丽芬, 朱永利, 于永华

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 河北省 保定市 071003)

## Transmission of Power Line On-Line Monitoring Data Based on Long-Chain Tree-Like Wireless Sensor Network

LI Lifan, ZHU Yongli, YU Yonghua

(Department of Computer Science and Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** To solve the funnel effect near the Sink nodes in long-chain tree-like ZigBee wireless sensor network (WSN) used for transmission line monitoring and warning system, a multi Sink cooperation mechanism based on geographical position is proposed, and the network bottleneck problem is solved by cooperation transmission of Sink nodes in multi adjacently deployed networks; on this basis, to solve the problems of intense competition of channels being contained within nodes and long time-delay of data transmission brought by raising the transmitting power of sensor nodes, a method of adjusting channel to control the node degree is adopted. Analysis and experiment simulation for the proposed method are performed, and the results show that the proposed method possesses favorable real-time performance and can solve the funnel effect due to Sink nodes well.

**KEY WORDS:** wireless sensor networks (WSN); power transmission line monitoring; real-time performance; load balance; quality of service

**摘要:** 为解决用于输电线路监测的长链树状 ZigBee 无线传感器网络中汇聚(Sink)节点附近的漏斗效应问题, 提出一种基于地理位置的多 Sink 节点协作机制, 采用多个邻近部署网络的 Sink 节点协作传输来解决网络瓶颈问题; 在此基础上, 采用信道调整以控制节点度的方法来解决因提升传感器节点发射功率所带来的节点间信道竞争激烈和数据传输时延大等问题。对所提出的方法进行了分析和实验仿真, 结果证明该方法很好地解决了 Sink 节点的漏斗效应, 并且获得了良好的实时性。

**关键词:** 无线传感器网络; 输电线路监测; 实时性; 负载均衡; 服务质量

基金项目: 国家自然科学基金项目(60974125)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60974125).

## 0 引言

架空输电线路常年暴露于大气中, 容易发生故障, 甚至引发灾变<sup>[1-2]</sup>, 国内外许多大停电事故是由线路故障引发的<sup>[3]</sup>, 为此需要寻求一种简单易行的方法对线路进行实时监测。目前架空输电线路状态监测数据传输是使用电信公司的通用无线分组服务(general packet radio service, GPRS), 监测系统需要长期租用电信部门的通信服务, 费用高, 难以推广。无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)技术是近几年无线网络研究的热门领域。目前, WSN 得到实际应用的主要是以 IEEE 802.15.4 标准为基础的 ZigBee 无线传感器网络<sup>[4]</sup>, 它是一种低复杂度、低功耗、低成本的无线网络技术, 这将为某些工业监测系统的数据传输提供新思路。

用于工业监测领域的传感器网络与军事侦察领域的有所差别, 特别是用于本文课题中输电线路监测数据传输的无线传感器网络存在以下特点<sup>[5]</sup>: 传感器节点呈辐射长链状分布, 数量相对较少, 传输数据量大; 传感器节点的电源可以通过在导线上加装类似于钳式 CT<sup>[6]</sup>, 由导线电流感应获得, 因此传感器节点能量相对不受限, 为获取较好的网络性能而需要提高节点发射功率, 节能成为次要因素。由于网络特性的改变会导致一些新的问题出现, 为此需要解决的问题有:

- 1) 单汇聚(Sink)节点传感器网络无法处理 Sink 节点失效问题, Sink 节点失效会导致整个网络瘫痪。
- 2) 所有数据都沿着到 Sink 节点的路径多跳传输, Sink 节点成为整个网络的瓶颈。容易造成数据拥塞, 严重影响数据传输的实时性、可靠性。

3) 节点能量相对不受限, 在较大发射功率的情况下, 会造成节点间严重的信道竞争和干扰, 影响网络传输的实时性。

本文针对用于输电线路监测的 ZigBee 网络 Sink 节点瓶颈效应问题, 提出一种利用邻近网络 Sink 节点进行信道调整的联合传输模型; 对于提升节点发射功率带来的节点间信道竞争和干扰问题, 给出一种基于多级路由表的信道预分配及调整的并行拓扑构建方法加以解决。

## 1 基于 WSN 的输电线路监测系统设计

### 1.1 传感器节点的部署

监测系统由大量传感器节点组成, 传感器节点部署在高压或低压输电线路杆塔上, 每路传输线有三相, 在每个杆塔的三相上分别布置传感器节点, 这样一条输电线路由传感器网络的 3 条子链组成。相邻杆塔间的距离(档距)一般为几十 m 到 100m, 在跨越山谷、河流等特殊情况下也不超过 1 000 m<sup>[7]</sup>, 在每组输电线邻近变电站端设置一个 Sink 节点, 用于收集该站某一组出线的的所有传感器节点的数据, 并与线路工区的线路监控中心服务器相连。若干条长链以汇聚节点 Sink 为根, 形成长链树状拓扑结构。每条长链表示一条高压或低压输电线路。见图 1。

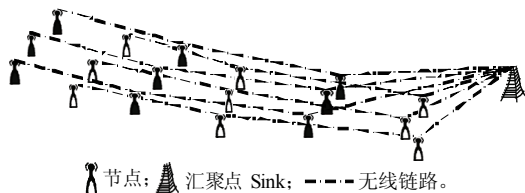


图 1 长链树状拓扑结构的无线传感器网络

Fig. 1 The long chain tree-like WSN topology

基于 WSN 的输电线路监测系统具有长链树状拓扑结构。这类系统具有以下共同点: 1) 需要管理长链树状拓扑结构的 WSN, 并将监测到的数据以多跳的方式实时传输到 Sink 节点; 2) 传感器节点和汇聚点在部署后均不再发生位置移动; 3) 传感器网络节点呈辐射型链式不均匀分布, 节点装备 GPS(GPS 模块的价格不足 100 元), 通过测量的方式可知其具体地理位置, 每个节点有唯一的 ID 号, 在网络初始化时进行统一的分配; 4) 传感器节点由套装在线路上的电流互感器持续供电, 提高发射功率后的通信距离达 1 000m。

### 1.2 监测系统的构成

基于 WSN 的绝缘子泄漏电流监测系统由无线传感器监测网络和远程监控管理中心 2 部分组成, 见图 2。其中, 无线传感器监测网络由大量部署在架

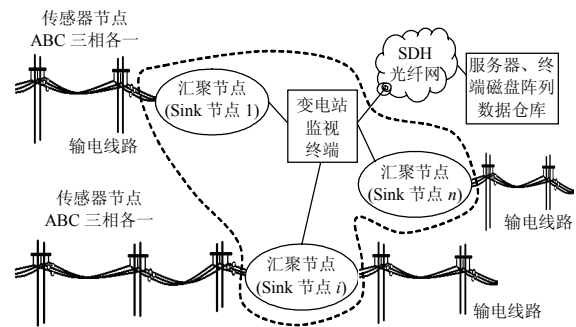


图 2 输电线路绝缘子泄漏电流监测系统结构

Fig. 2 The structure of insulator leakage current monitoring system

空输电线路杆塔上的具有感知、计算和通信能力的智能传感器节点组成, 负责远程实时采集绝缘子泄漏电流等信号, 基于 ZigBee 无线通信协议组建网络, 所有节点的数据最终路由到 Sink 节点, 由 Sink 节点将全部数据传送到变电站数据终端, 然后通过同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH)光纤网传送到线路工区的远程监控管理中心, 管理中心配置磁盘阵列, 用于保存各线路监测的历史数据。监控管理中心负责数据的接收、存储和时空分析, 根据需要发布预警信息和采取进一步的补救措施。

## 2 问题描述

用于线路监测的 ZigBee 网络将采用拥有 16 个独立信道的 2.4GHz 频段进行数据传输, 其网络结构及其与电力信息网的连接如图 2 所示。多个邻近的 Sink 节点为节点协作提供了硬件条件, 对于邻近部署多个传感器网络的情况下, 考虑采用多个网络的 Sink 节点进行协作传输, 提升网络容量。

对于采用多个传感器网络 Sink 节点进行协作传输, 以及基于多级路由表的信道预分配及调整的拓扑控制方法, 相关研究成果不多。文献[8]给出了单 Sink 节点和多 Sink 节点 2 种情况下理想的网络容量对比关系, 但问题是 Sink 节点比较昂贵, 多配置将导致资金投入大幅增加。对于邻近部署多个传感器网络的情况下, 可考虑采用多个网络的 Sink 节点进行协作传输, 提升网络容量。文献[9]主要考虑传感器网络中多 Sink 节点的定位及从传感器节点到 Sink 节点之间的数据传输问题。

功率控制对网络吞吐量、消息传递的实时性、可靠性等系统性能具有显著影响[10], 文献[11]针对实时性要求, 提出以降低网络端到端延时为目的的自适应步长控制协议(load-aware power control, LAPC), 在协议中, 建立动态调整多功率级路由列表。与不同级的定发射功率协议相比, 该协议有效

降低了通信的端到端延时。文献[12]使用了多个数据信道，在通信时与邻居节点通过协商获得信道的使用权。多信道技术可以有效减轻功率调整所带来的碰撞冲突。

### 3 关键技术

#### 3.1 多 Sink 节点协作

文献[13]对一个 Sink 节点位于网络中心位置时的网络负载分布进行了分析。定义网络中任意传感器节点  $i$  的平均负载为  $L_i$ ，这里的平均负载指的是处于节点  $i$  探测距离内小部分节点的负载在一段时间内的平均值。其分析结果表明，在一个圆形且汇聚节点在圆心的场景下，网络中任意传感器节点  $i$  的负载遵循以下关系式：

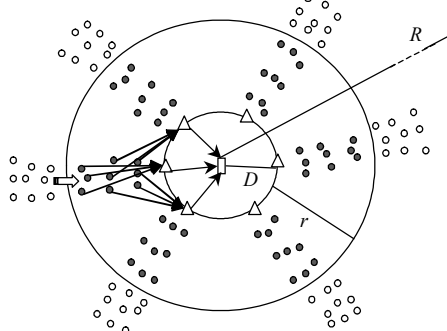
$$L_i \begin{cases} \approx \frac{(\beta/2)(R^2 - d^2)\lambda\xi}{\pi r^2/2} + \lambda\xi, & d \geq r \\ = R^2\lambda\xi/r^2, & d < r \end{cases} \quad (1)$$

式中： $R$  为整个网络的半径； $d$  为节点  $i$  与圆心的距离； $r$  为汇聚节点通信覆盖半径； $\lambda$  为传感器节点单位时间内的数据发生率； $\xi$  为节点收发单位数据的能耗， $\xi=2\arcsin(r/d)$ 。

从变电站延伸出的多条输电线路对应的各传感器网络组成近似圆形区域的节点分布结构如图 3 所示，各辐射链式传感器网络长度分别为  $R_i$ ，假定 Sink 节点总数为  $m$ ，关键节点(即与各 Sink 节点直接通信的节点)总数为  $n$ ，协作传输的 Sink 节点数为  $\omega$ ， $D$  为圆心与外围 Sink 节点间的距离，那么可以计算每个协作 Sink 节点的负载  $L_S$  为

$$L_S = \frac{n}{\omega m} \sum_{i=1}^m \frac{R_i^2 \lambda \xi}{(D+r)^2} \quad (2)$$

可见，协作节点数目  $\omega$  的变化直接影响传感器网络最重负载节点的负载程度，根据网络需要确定  $\omega$  值，可达到解决网络瓶颈效应的目的。



○普通节点；●关键节点；△Sink 节点；□监控节点；⇨数据流。

图 3 邻近 Sink 节点协作传输示意图  
Fig. 3 Coordination transmission scheme of adjacent Sink nodes

#### 3.2 信道调整

由节点特性可知，传感器节点提高发射功率后的通信距离达 1 000 m，杆塔档距从 50 m 到几百 m 不等，即节点通信范围内被覆盖的传感器节点数目很多，而 ZigBee 网络媒体访问控制(media access control, MAC)层采用载波侦听多路访问/冲突检测(carrier sense multi access/collision avoidance, CSMA/CA)协议进行数据传输，这将使得节点传输数据时的退避等待时间过长，节点对信道的竞争激烈，大大增加数据传输时延。针对本课题的辐射链状传感器网络，如果存在一种方法能够在采用高发射功率的情况下保证节点的竞争强度不变，这将会在保证排队时延最小的情况下，减少数据的路由跳数，降低处理时延，达到最佳的网络传输实时性。

常见的降低节点间通信竞争的方法有干扰源感知带宽分配<sup>[14]</sup>、正交信道并行传输<sup>[15]</sup>等。ZigBee 网络的 2.4 GHz 波段提供了 16 个独立信道，为此可以考虑采用多数据源多个信道并行传输机制。

传感器节点可持续供电，所以我们更希望以能量的消耗换取网络性能的提升。因节点可通过 GPS 模块或定位算法获得准确的位置信息。并且传感器网络呈辐射链状，借助蜂窝网络通信的思想，根据节点地理位置将节点进行隐式分簇，即簇内不设立簇首节点。如图 4，链状分布的每个方格区域作为一簇，标记相同颜色簇之间采用同一信道通信。这样建立的网络能获得与蜂窝网络一样的抗干扰特性。

首先描述信道的分配方式，图 4 中从右向左的区域簇表示为  $C_1, C_2, \dots, C_{\omega}, \dots$ ，其中  $C_1$  到  $C_{\omega}$  簇内全部为关键节点，按升序分别为它们分配间隔为  $k$  的  $\omega$  个信道  $B_x, B_{x+k}, \dots, B_{x+k\omega}$ ，为  $C_{\omega+1}$  分配  $B_x$  开始以  $k\omega$  为模值，重复上述过程，直到为全部簇分配完信道。相应的 Sink 节点信道的分配原则为，与某一关键节点距离由近至远按降序依次分配  $B_{x+k\omega}$  到  $B_x$  间隔为  $k$  的  $\omega$  个信道。这样分配信道的好处在于当需要进行信道调整时，可以结合  $\omega$  值按升序或降序的原则进行调整，信道调整算法简单。如节点分布不均匀的情况下，某一簇区域内不存在传感器节点，那么与

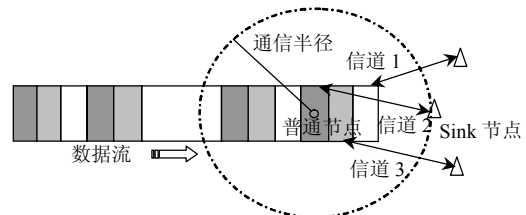


图 4 隐式分簇示意图  
Fig. 4 The implicit clustering scheme

其对应的上行簇此时就需要进行加 1 或减 1 信道调整, 实现与其它区域簇进行不间断通信。

可以看出, 这样建立的网络实际上是一种并行拓扑结构的多模层次网络。不同层次节点上产生的数据包只在本层传输。事件区域范围越大, 平均分配在区域内的每层节点个数越接近, 从而起到层次数据分流作用, 多 Sink 节点协作传输则是弱化了网络的漏斗现象, 信道调整解决了传统并行层次网络存在的断层现象, 接下来详描其中涉及的算法。

#### 4 基于 WSN 实现输电线路监测数据传输

将平面型传感器网络组织成一个并行拓扑结构的多模层次网络, 首先要选定合适的  $\omega$  值, 统计节点位置信息上传, 由上层服务器对网络节点进行区域划分, 确定各簇及每个 Sink 节点的通信信道值; 确定各簇内节点总数和节点 ID 号集合。随后利用上面所得结果, Sink 节点向网络中发送组网消息, 确定各节点的初始通信频段, 生成本地节点  $\omega$  级路由表。

如通信信道采用 2.4GHz 频段中从某一初始信道号开始的连续几个信道进行通信, 那么信道号的确定原则为: 初始信道号 +  $k(\text{区域号} \% \omega)$ , 节点 ID 集合则是根据节点位置信息是否在所划分的对应区域内来确定, 紧接着将包含区域号、区域节点 ID 集合内容、通信信道数等字段的信息帧通过主 Sink 节点向下层广播, 下层节点解析信息帧得到相应信息。

下面是节点解析信息帧及路由表建立过程。设普通节点的区域号初始值均为 null, 节点接收信息帧后进行解析建立  $\omega$  级上行路由表过程如下(下行表建立过程类似):

```

if 节点区域号为 null then
    接收并检查信息帧区域节点 ID 集合字段;
    if 有与本地节点 ID 相同字段 then
        帧区域字段赋给本地节点区域号;
        帧通信信道字段赋给本地节点信道字段;
    else if 本地节点区域号 < 帧区域号 ≤ 本地节点区域号 +  $\omega$  then
        if 帧区域号 = 本地节点区域号 + 1
            将帧区域节点 ID 集合作为本地节点路由表的第  $\omega$  级;
        ...
    else if 帧区域号 = 本地节点区域号 +  $\omega$ 
        将帧区域节点 ID 集合作为本地节点路由表的第 1 级
    建立  $\omega$  级路由表后可保证在网络出现断层时,
    采用信道调整机制将断层与其他层进行连接, 达到快速、完整传输数据的目的, 体现在本地节点传输数据时的信道调整算法主体如下:
  
```

```

while 缓存队列中存在信息 do
    if 1 级路由表中存在节点 ID 号 do
        按满足转发条件的 ID 号转发数据;
    else if 2 级路由表中存在节点 ID 号 do
        节点通信信道数  $k-1$ ;
        按满足转发条件的 ID 号转发数据;
    ...
    else if  $n$  级路由表中存在节点 ID 号 do
        节点通信信道数  $-(k-1) \omega$ ;
        按满足转发条件的 ID 号转发数据;
  
```

#### 5 仿真结果及分析

采用 OPNET 进行仿真, 仿真参数: 普通节点数目 60, 部署区域大小  $100 \times 2000$  m, 可用信道 3 个。通过 3 个场景进行仿真, 每个场景对应的 Sink 节点数和信道数分别为 1、2、3。网络中节点的服务能力统一设定为 9600 b/s, 需要采集的数据分别为数据包排队时延、缓存队列长度、吞吐量。图 5、6 分别给出了不同 Sink 节点数目下传输数据包的排队时延和缓存队列长度随仿真时间的变化情况。

场景为单 Sink 节点、单信道场景, 可见数据包排队时延随仿真时间的延长而急剧增加, 造成严重拥塞。而分别采用场景 2(2 个 Sink 节点、2 信道)和场景 3(3 个 Sink 节点、3 信道)情况下, 随着协作 Sink 节点数量增加, Sink 节点平均数据包排队时延明显缩短, 平均缓存队列长度也变短。这说明随着协作

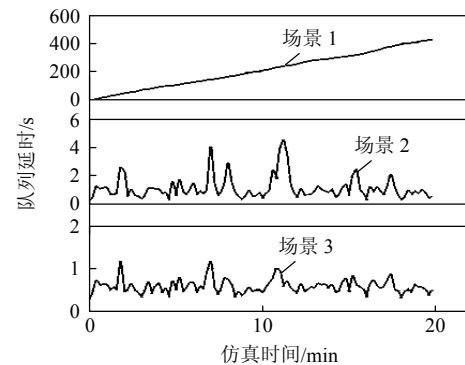


图 5 3 个场景的数据包排队时延  
Fig. 5 The packets queuing delay

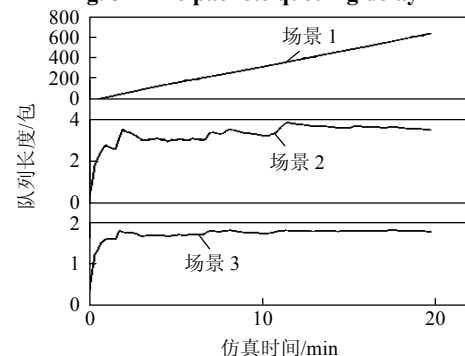


图 6 3 个场景的缓存队列长度  
Fig. 6 The buffer queue length

Sink 节点的增加, 数据传输实时性有很好的改善。

图 7 给出了传感器网络吞吐量随仿真时间的变化关系。可以看出, 随着网络中协作 Sink 节点的加入, 网络吞吐量成倍增长, 这表明随着协作节点的增加能够解决 Sink 节点的瓶颈问题。同时由于随着协作 Sink 节点的增加, 网络吞吐量成严格倍数关系增长, 构成的层次网络各层数据实现了并行独立传输, 这充分体现了基于信道调整的多个信道并行数据传输方法的优良特性, 信道跟踪参数不再给出。

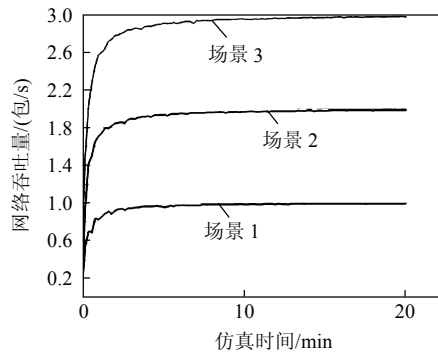


图 7 网络吞吐量

Fig. 7 The network throughput

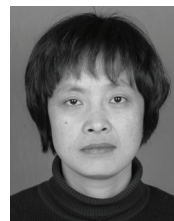
## 6 结论及展望

本文提供的拓扑控制方法, 主要是为应对长链树状辐射型网络在提高发射功率的情况下如何解决 Sink 节点漏斗效应, 以及应对节点间信道竞争而提出的。方法在很大程度上缓解了因提升发射功率带来的节点间信道的竞争, 同时为多 Sink 节点协作提供了新的思路。本文采用隐式分簇, 只进行簇间通信, 如果考虑采用簇内协调只需增加簇内路由表项, 通信方式相同。本文采用涉及的算法是在不考虑节点间功率调整对其它同区域节点信噪比影响的前提下进行的研究, 下一步将结合功率调整对信噪比的影响, 建立认知用户之间的合作机制来协调节点间的通信, 进一步提升无线传感器网络的性能。

## 参考文献

- [1] 汪大海, 李杰, 谢强. 大跨越输电线路风振动张力模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 122-128.  
Wang Dahai, Li Jie, Xie Qiang. Dynamic tension model for wind-induced vibration of long spanned transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 122-128(in Chinese).
- [2] 李再华, 白晓民, 周子冠, 等. 电网覆冰防治方法和研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 7-13.  
Li Zaihua, Bai Xiaomin, Zhou Ziguang, et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 7-13(in Chinese).
- [3] 晏致涛, 李正良. 重冰区输电塔-线体系导线断线分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 92-97.  
Yan Zhitao, Li Zhengliang. Analysis of the transmission tower-line system in heavy ice regions subjected to cable rupture[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 92-97(in Chinese).

- [4] 吕治安. ZigBee 网络原理与应用开发[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 10-12.
- [5] 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.  
Zhao Zenghua, Shi Gaotao, Han Shuangli, et al. A heterogeneous wireless sensor network based remote district high-voltage transmission line on-line monitoring system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 80-84(in Chinese).
- [6] 王阳光, 尹项根, 游大海, 等. 基于无线传感器网络的电力设施冰灾实时监测与预警系统[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 14-19.  
Wang Yangguang, Yin Xianggen, You Dahai, et al. A real-time monitoring and warning system for electric power facilities icing disaster based on wireless sensor network[J]. Power System Technology, 2009, 33(7): 14-19(in Chinese).
- [7] 郭日彩, 许子智, 李喜来. 110~500 kV 输电线路典型设计[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 56-64.  
Guo Ricai, Xu Zizhi, Li Xilai. Typical design of transmission lines with voltage grades from 110 kV to 500 kV and its application[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 56-64(in Chinese).
- [8] 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.
- [9] 徐久强, 柏大治, 罗玳玳, 等. 遗传算法在 WSNs 多 Sink 节点布局中的应用[J]. 东北大学学报, 2008, 29(6): 815-818.  
Xu Jiuqiang, Bai Dazhi, Luo Dingding. Genetic algorithm application on the multi-sink node deploying in WSNs[J]. Journal of Northeastern University, 2008, 29(6): 815-818(in Chinese).
- [10] 李方敏, 徐文君, 刘新华. 无线传感器网络功率控制技术[J]. 软件学报, 2008, 19(3): 716-732.  
Li Fangmin, Xu Wenjun, Liu Xinhua. Power control for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2008, 19(3): 716-732(in Chinese).
- [11] Mohamed R, Fahmy S, Pandurangan G. Latency- Sensitive power control for wireless ad hoc networks[C]//Proceedings of the MS-WiM 2005. Montreal: 2005: 31-38.
- [12] Wu S L, Teseng Y C, Lin C Y, et al. A multi- channel MAC protocol with power control for multi-hop mobile ad hoc networks[J]. The Computer Journal, 2002, 45(1): 101-110.
- [13] Jun Luo, Jean-Pierre Hubaux. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks[C]//IEEE INFO-COM2005, 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE, 2005: 1735-1746.
- [14] 李姗姗, 廖湘科, 彭绍亮, 等. 无线传感器网络中一种实用的公平性控制模型[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 47-54.  
Li Shanshan, Liao Xiangke, Peng Shaoliang. A practical fairness control model in wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(1): 47-54(in Chinese).
- [15] 徐震, 黄传河. 无线网状网服务质量路由研究[J]. 计算机科学, 2009, 36(9): 83-85.  
Xu Zhen, Huang Chuanhe. Research on wireless mesh network QoS routing[J]. Computer Science, 2009, 36(9): 83-85(in Chinese).



李丽芬

收稿日期: 2010-12-20。

作者简介:

李丽芬(1970), 女, 通信作者, 讲师, 博士, 主要研究方向为计算机网络、无线传感器网络在电力系统中应用, E-mail: lilifen70@163.com;

朱永利(1962), 男, 教授, 博士导师, 主要研究方向为计算机网络、无线传感器网络在电力系统中应用, E-mail: yonglipw@heinfo.net;

于永华(1984), 男, 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络 QoS 在电力系统中应用, E-mail: hbdlxxy@yahoo.cn。

(责任编辑 李兰欣)