



基于环形搜索的 WSN 簇间最优路由选择

余翔, 刘磊, 吴堃

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

摘要:为了解决 LEACH 协议中由单跳路由算法造成的节点能量消耗不均衡的问题,首先,计算分析得出簇间多跳的最优跳数,得到簇头节点到基站的一条理想路径;然后,提出一种环形搜索方法去寻找与理想路径最接近的最优路径;最后,提出了簇头到基站的多跳路由算法。仿真实验结果表明,簇头到基站的多跳路由算法较 LEACH 协议在均衡节点能量消耗和延长网络生命时间方面的性能有明显的提高。

关键词: LEACH 协议;网络生命时间;环形搜索;最优跳数

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015026

Optimal Routing Between Clusters Based on Circular Search Method in WSN

Yu Xiang, Liu Lei, Wu Kun

(College of Telecommunications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to solve the problem of the nodes' energy consumption balance caused by single hop routing algorithm in LEACH protocol. By calculation and analysis of the optimal number of hops of inter cluster multi-hops, the cluster head node got an ideal path to the base station. A ring search method was proposed to find the optimal path close to the ideal path. Then, a multi-hops routing algorithm from the cluster head to the base station was obtained. The experimental results show that the performance of the multi-hops routing algorithm from the cluster head to the base station compared with LEACH protocol is higher in the balance of nodes' energy consumption and prolong the network lifetime.

Key words: LEACH protocol, network's lifetime, circular search, the optimal number of hops

1 引言

近年来,WSN(wireless sensor network,无线传感器网络)的应用非常广泛,可应用于军事国防、工农业控制、城市管理、智能家居、生物医药、环境检测、抢险救灾、反恐反恐、危险区域远程控制等诸多领域^[1]。但是在 WSN 中节点的能量有限,并且在很多环境恶劣、无人值守和资源受限

的场景下,为节点更换电池或充电是不可能的,因此如何合理地使用能量有限的网络节点去保证整个网络的生命时间成为目前研究的重点问题。

LEACH 协议^[2]作为 WSN 中分簇路由协议的经典代表,至今仍有一定的参考价值。针对 LEACH 协议簇间多跳问题,近些年研究者对此做了大量的研究。参考文献[3]利用位置信息选择能耗最小的最优转发簇头,提出一种加权的



非均匀分簇算法来平衡簇头间的能量消耗,越靠近网关的簇越小,包含成员节点也少,故可节省能量进行簇间转发;参考文献[4]中通过能距比的概念以及计算出节点的最佳距离,提出一种簇头到基站的分簇路由算法,此算法降低了簇首的能耗,节点在选择下一跳节点时,考虑了节点的剩余能量和节点的位置;参考文献[5]中推导了单跳节能的临界距离,提出了基于能量的簇头改进策略和单跳与多跳结合的簇头间通信机制;参考文献[6]中提出了 CMRAOL 簇间多跳算法,在选择簇头节点时,综合考虑了节点的剩余能量以及节点到汇聚节点(sink 节点)的距离两方面因素,在簇间通信过程中,对簇头节点采用了多跳传输技术。虽然这些算法都以不同的方式提出簇头到基站的多跳路由算法,但是它们在选择下一跳节点时,几乎都是选择簇头节点,没有考虑非簇头节点作为下一跳节点的情况。

本文算法是在上述研究的基础上,根据对簇头之间多跳方法的总结和分析,通过计算得出簇间多跳的最优跳数,得到一条簇头节点到基站的理想路径,然后根据环形搜索的方法寻找与理想路径最接近的最优路径,从而提出一种多跳路由算法,此算法的下一跳路由没有限制于簇头节点,只要满足下一跳路由传输的条件,即可充当下一跳节点。

2 LEACH 协议及 CMRAOL 协议

2.1 LEACH 协议

LEACH 协议是低功耗自适应的聚类路由协议,主要包含 3 个阶段:簇头选择阶段、簇形成阶段、数据传输阶段。LEACH 协议定义了“轮”的概念,其中每轮都包括这 3 个阶段。LEACH 协议在每轮循环中,如果节点已经当选过簇头,则把 $T(n)$ 设为 0,这样节点就不会在 $1/P$ 轮内再次当选簇头。对未当选过簇头的节点,则将以 $T(n)$ 的概率当选,传感器节点根据当前的状态计算 $T(n)$,并随机产生一个 $(0, 1)$ 之间的随机数与 $T(n)$ 比较,如果小于该阈值则当选为簇头。而簇头到基站的通信采用簇头直接到基站的单跳通信模式。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times [r \bmod (1/P)]}, & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (1)$$

其中, P 是每轮选举节点成为簇头的概率, r 是当前的轮数, G 是该轮未当选过簇头节点的集合, $r \bmod (1/P)$ 代表该轮循环中当选过簇头的节点个数。

2.2 CMRAOL 协议

CMRAOL 协议采用了与 LEACH 协议相同的一阶无线电模型,但是在簇间通信却采用多跳路由算法,其主要原理如下。

用图 $G=(V, E)$ 表示无线传感器网络,其中 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示传感器节点的集合,则 $N=|V|$ 表示传感器节点的个数。用坐标 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 分别表示传感器节点 v_i 和 v_j 的地理位置。

则式(2)表示传感器节点 v_i 和 v_j 的距离 d_{ij} 。

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$

对于任意传感器节点 v_i ,其邻居节点的集合为:

$$N(v_i) = \{v_j | d_{ij} \leq R, v_j \in V\} \quad (3)$$

其中, R 为节点的通信半径。

在 CMRAOL 协议中,当节点 v_j 被选作簇头以后,将以较高的发射功率在网络中广播包含其 ID、节点剩余能量 E_{re} 和到基站的距离 d_j 的“CH-State”消息。簇头收到来自其他簇头 v_j 的消息后计算 $d(v_i, v_j)$,如果 $d(v_i, v_j)$ 小于节点的通信半径 R ,则把节点 v_j 的信息保存在邻居节点集合 $N(v_i)$ 中。

当节点 v_i 需要将数据发送或转发给下一跳簇头节点时,则从 $N(v_i)$ 内选择。如果 $d(v_i, DS) > TD_MAX(d(v_i, DS))$ 为簇头 v_i 到汇聚节点的距离, TD_MAX 为引入的阈值,设为 87.7 m),则在 $N(v_i)$ 中选择权值 W_h 最大的节点作为下一跳簇头节点。

$$W_h = \frac{E_{re}}{\sqrt{d^2(v_i, v_j) + d^2(v_i, DS)}} \quad (4)$$

从式(4)可知,簇头节点在邻居节点集合中搜索距离汇聚节点距离小、剩余能量大的邻居簇头节点作为下一跳节点。

3 簇间多跳算法

3.1 能耗模型

采用和 LEACH 协议相同的通信模型。图 1 是无线能量消耗模型,式(5)、式(6)是 LEACH 协议无线能量消耗模型^[7]的计算式。

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx_elec}(l) + E_{Tx_amp}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_s d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\epsilon_s d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (5)$$

$$E_{Rx}(l) = E_{Tx_elec}(l) = lE_{elec} \quad (6)$$

在图 1、式(5)和式(6)中, l 指的是 l bit 的数据分组,

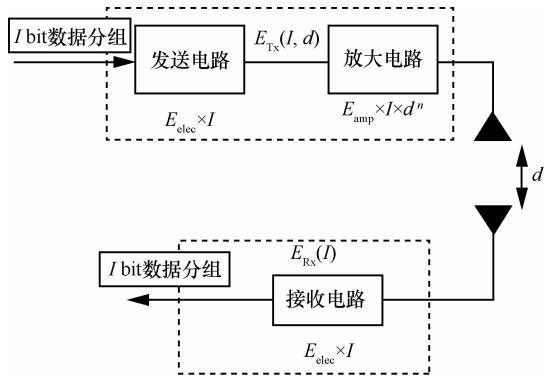


图 1 无线能量消耗模型

E_{elec} 是发送电路发送或接收电路接收 1 bit 数据分组所消耗的能量, ε_{mp} 是多路径衰落模型下信号放大器的放大增益, ε_{fs} 是自由空间模型下信号放大器的放大增益, $E_{\text{Tx}}(l, d)$ 是节点发送模块发送 l bit 数据分组到距离该节点为 d 时所消耗的能量, $E_{\text{Tx-elec}}(l)$ 是节点发送模块中发送电路发送 l bit 数据分组所消耗的能量, $E_{\text{Tx-amp}}$ 是节点发送模块中放大电路发送 l bit 数据分组到距离该节点为 d 时所消耗的能量, $E_{\text{Rx}}(l)$ 是接收模块中接收电路接收 l bit 数据分组所消耗的能量。 d_0 为距离阈值, 距离 d 小于该阈值时采用自由空间模型; 否则, 采用多路径衰落模型。

3.2 最优跳数的定义

定义 1 节点之间通过单跳或多跳传输, 能量消耗最小称为最小通信代价。

定义 2 当簇头节点到基站的距离为 d , 经过 k 跳传输到基站时为最小通信代价, 则称 k 跳为簇头到基站的最优跳数, 记为 k_{opt} 。

引理 1 给定距离 d 和跳数 k , 当所有跳的间隔均为 d/k 时为最小通信代价。

推论 1 若簇头到基站的距离为 d , 当跳数为

$$n_{\text{opt}} = \left\lfloor d \times \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{amp}}}{2E_{\text{elec}}}} \right\rfloor \text{ 时, 簇头到基站的通信代价最小。}$$

证明 图 2 所示的简单线性网络, 图中的汇聚节点也即基站, 簇头到基站的距离为 d , 当跳数为 n 时, 第 i 跳的

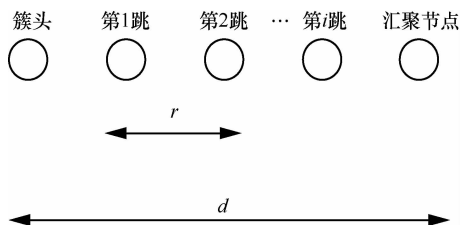


图 2 简单线性网络

能量消耗为:

$$E_i = \begin{cases} n(lE_{\text{elec}} + l\varepsilon_{\text{fs}}r^2) + (n-1)lE_{\text{elec}}, & r < d_0 \\ n(lE_{\text{elec}} + l\varepsilon_{\text{amp}}r^4) + (n-1)lE_{\text{elec}}, & r \geq d_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$r = d/n \quad (8)$$

因此, 链路上所有节点的总能耗为:

$$E_T = \begin{cases} \frac{n(n-1)}{2} \left(lE_{\text{elec}} + l\varepsilon_{\text{fs}} \left(\frac{d}{n} \right)^2 \right) + \frac{(n-1)(n-2)}{2} lE_{\text{elec}}, & \frac{d}{n} < d_0 \\ \frac{n(n-1)}{2} \left(lE_{\text{elec}} + l\varepsilon_{\text{amp}} \left(\frac{d}{n} \right)^4 \right) + \frac{(n-1)(n-2)}{2} lE_{\text{elec}}, & \frac{d}{n} \geq d_0 \end{cases} \quad (9)$$

为了简化计算, E_T 可近似为:

$$E_T = \begin{cases} \frac{n^2}{2} \left(lE_{\text{elec}} + l\varepsilon_{\text{fs}} \left(\frac{d}{n} \right)^2 \right) + \frac{n^2}{2} lE_{\text{elec}}, & \frac{d}{n} < d_0 \\ \frac{n^2}{2} \left(lE_{\text{elec}} + l\varepsilon_{\text{amp}} \left(\frac{d}{n} \right)^4 \right) + \frac{n^2}{2} lE_{\text{elec}}, & \frac{d}{n} \geq d_0 \end{cases} \quad (10)$$

对 E_T 求导可得:

$$E'_T = \begin{cases} 2nlE_{\text{elec}}, & \frac{d}{n} < d_0 \\ 2nlE_{\text{elec}} - n^{-3}l\varepsilon_{\text{amp}}d^4, & \frac{d}{n} \geq d_0 \end{cases} \quad (11)$$

当 $d/n < d_0$ 时, E'_T 恒大于 0, 即 E_T 单调递增; 当 $d/n \geq d_0$

时, 令 $E'_T = 0$, 即可得出最优跳数 $n_{\text{opt}} = \left\lfloor d \times \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{amp}}}{2E_{\text{elec}}}} \right\rfloor$, 其中

$\lfloor \cdot \rfloor$ 代表向下取整。

在实际的无线传感器网络中, 由于节点密度的限制, 找一条这样理想的路径并不现实, 但是依据它可以寻找一条实际的传输路径。

3.3 算法过程

如图 3 所示, 虚线方形区域表示无线传感器网络监测区域, 大黑圆点表示传感器节点, 小黑圆点表示直线与同心圆的交点, 基站(即汇聚节点)在监测区域外。若簇头到基站的距离为 d , 到基站的最优跳数为 n_{opt} , 则同心圆 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_n 的值分别为 d/n_{opt} 、 $2d/n_{\text{opt}}$ 、 $3d/n_{\text{opt}}$ 、 nd/n_{opt} , 其中 n 小于或等于 n_{opt} 。图 3 中阴影部分为环形搜索区域, 内环搜索距离为 $d_{\text{内}}$, 外环搜索距离为 $d_{\text{外}}$ 。

如图 3 所示, 若节点 A 是簇头节点, 由引理 1 和推论 1 可知, 节点 B、C、D 是理想转发位置, 但是并不是实际的传感器节点。替代理想转发位置的转发节点确定的步骤如图 4 所示。

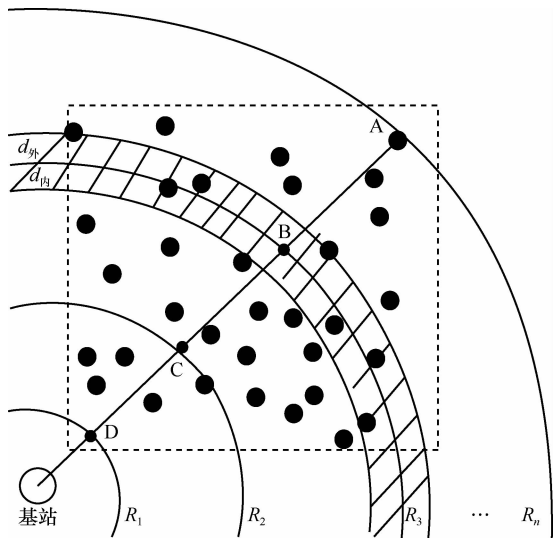


图3 算法分析示意

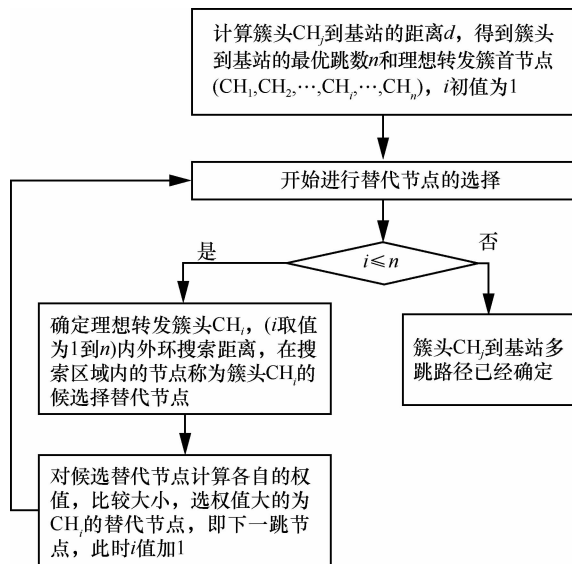


图4 替代理想转发位置的转发节点确定流程

(1)确定内、外环搜索距离 d_{in} 、 d_{out} 。如图3所示,以簇头A到基站为例,假设簇头A到基站需要的跳数大于或等于4,则在 R_3 和 R_n 之间存在 R_4 。在 R_3 和 R_4 区域内针对每个簇计算簇内节点到簇头节点的平均距离,然后再取所有簇的簇内节点到簇头节点的平均距离的平均值作为外环搜索距离的值 d_{out} 。同理,在 R_2 和 R_3 区域内,求得内环搜索距离的值 d_{in} 。

(2)确定替代转发节点。在内外环形成的搜索区域内,对所有节点进行权值计算。节点 i 的剩余能量为 $E_{res}(i)$,节点 i 到虚拟节点 B 的距离 d_{iB} 。定义能量权重为 α ,距离权重为 β ,则节点 i 的权值 $W_i = \alpha E_{res}(i) + \beta (1/d_{iB})$ 。然后,比较区

域内各个节点权值的大小,取权值大的为下一跳节点。

(3)同理,按照步骤(1)、步骤(2)寻找虚拟节点 C 和虚拟节点 D 的替代转发节点。最后,形成一条均衡节点剩余能量和通信代价的转发路径。

算法中,对于一个确定的簇头节点,它的最优跳数也就确定了,设为 n_{opt} ,也即需要替代的理想转发节点数目。对于每一个理想转发簇头节点都需要进行一次替代节点的寻找,所以在搜索范围内需要对一定数量的节点进行权值的计算和比较,搜索范围只与簇内节点到簇头节点的平均距离有关。记搜索面积与整个网络区域面积的比值为 t ,若整个网络区域节点数目为 n ,则需要计算和分析的次数为 $t \times n$ 。故算法中需要计算的次数为 $t \times n \times n_{opt}$,由于 t 和 n_{opt} 均是和距离有关的数,与未知量 n 无关,故此算法的复杂度为 $O(n)$ 。

4 仿真分析

4.1 仿真环境

本文采用 MATLAB 进行仿真,网络区域为 $100 \times 100 \text{ m}^2$,节点总数为 100 个,基站的位置为 $(50 \text{ m}, 175 \text{ m})$,节点初始能量为 0.5 J 。能量模型与 LEACH 协议相同, $E_{dec} = 50 \text{ nJ/bit}$, $\epsilon_{ls} = 10 \text{ pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$, $\epsilon_{amp} = 0.0013 \text{ pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$, $d_0 = 87 \text{ m}$ 。本文对比改进前后的 LEACH 协议性能。

4.2 仿真结果与分析

图5仿真了改进前后 LEACH 协议网络中存活节点与轮数 r 的关系,图6仿真了节点剩余能量均值与轮数 r 的关系。图7为网络发送的总数据随轮数 r 的变化。

从图5的结果可以看出,LEACH 协议、CMRAOL 协议和改进后的多跳 LEACH 协议网络中 FND(第一个死亡节点)

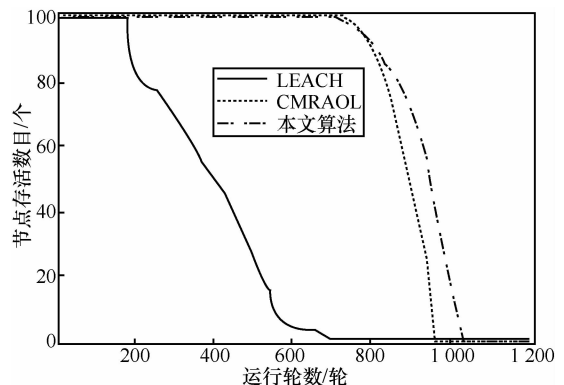


图5 节点存活数目与轮数的关系

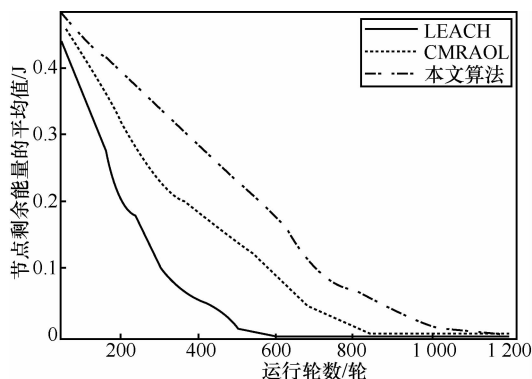


图6 网络节点剩余能量均值随轮数的变化

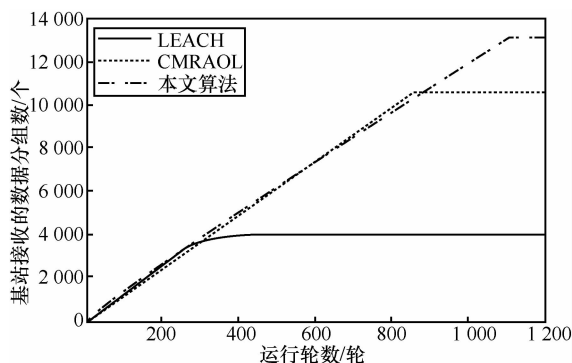


图7 网络发送的总数据分组数

分别在第 160 轮、第 730 轮、第 700 轮左右, LND(最后一个节点)的死亡轮数分别为 760 轮、950 轮、1 050 轮左右。从 FND 分析, 改进后的簇间多跳 LEACH 协议比 LEACH 协议的性能提升了约 356%, 与 CMRAOL 协议相差不大; 从 LND 分析, 改进的 LEACH 协议比 LEACH 协议的轮数延长了约 38.2%, 比 CMRAOL 协议的轮数延长了约 10.5%。

从图 6 的结果可以看出, 改进后的 LEACH 协议的网络节点能量均值一直比 LEACH 协议以及 CMRAOL 协议高, 且能耗曲线更为平滑, 反映了能耗速率比较稳定, 表明本文算法能更有效地节约节点的能量。

从图 7 的结果可以看出, 改进后的协议、CMRAOL 协议和 LEACH 协议的基站接收到的数据分组数量分别约为 13 200 个、10 000 个和 3 900 个。其中, 改进后的协议比 CMRAOL 协议高出约 32%, 比 LEACH 协议高出约 230%。改进算法在 700 轮左右的总数据少于 CMRAOL 协议的总数据, 900 轮左右之后数据一直大于 CMRAOL 协议。这是因为改进协议的 FND 比 CMRAOL 协议小, 820 轮左右之后改进协议节点存活数目一直比 CMRAOL 协议大。由于在相同的仿真环境下, 基站最终能够通过传感器网络获取

的环境数据的多少体现出协议的优劣, 故改进后的协议网络能量利用率更高。

通过仿真对比分析, 说明改进的算法在降低和均衡节点能耗、延长网络生命时间方面取得了较好的改进效果。

5 结束语

本文提出了基于 LEACH 协议的簇间路由多跳改进算法, 根据 LEACH 协议的能量模型, 通过计算分析得出簇间多跳的最优跳数, 得到一条簇头节点到基站的理想路径, 然后根据环形搜索的方法寻找与理想路径最接近的最优路径。仿真结果表明, 该算法较 LEACH 协议和 CMRAOL 协议在网络生命时间和网络能耗方面有良好的表现。但是, 本文算法没有考虑在事件驱动的模拟环境下, 是否还有很好的性能表现, 这是需要进一步考虑的工作。

参考文献

- 1 Akyildiz F, Su W, Sankarasubramaniam Y. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 2002, 38 (4): 393~422
- 2 Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks. *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on Systems Science*, Hawaii, USA, 2000
- 3 张瑞华, 贾智平, 程合友. 基于非均匀分簇和最小能耗的无线传感网络路由算法. *上海交通大学学报*, 2012, 46(11): 1774~1778
- 4 Zhang R H, Jia Z P, Cheng H Y. The routing algorithm for WSNs based on unequal clustering and minimum energy consumption. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2012, 46(11): 1774~1778
- 5 郭书诚, 卢昱, 许定根. 基于分簇无线传感器网络的路由算法研究. *通信学报*, 2010, 31(8A): 63~69
- 6 Guo S C, Lu Y, Xu D G. Research on a routing algorithm for clustered wireless sensor networks. *Journal on Communications*, 2010, 31(8A): 63~69
- 7 王林, 赵绍英. 无线传感器网络 LEACH 路由协议的研究与改进. *计算机工程与应用*, 2012, 48(2): 80~82
- 8 Wang L, Zhao S Y. Research and improvement about LEACH routing protocol for wireless sensor networks. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(2): 80~82
- 9 陈炳才, 么华卓, 扬明川等. 一种基于 LEACH 协议改进的簇间多跳路由协议. *传感器技术学报*, 2014, 27(3): 373~377

(2015026-6 接排在 2015029-5 后)