

煤矿巷道无线传感器网络 非均匀分簇数据传送机制

李 鉴^{1,2}, 石 馨³, 刘贺平¹

1. 北京科技大学自动化学院, 北京 100083

2. 南阳理工学院电子与电气工程系, 河南南阳 473000

3. 沈阳航空职业技术学院航空电子工程系, 辽宁沈阳 110034

摘要: 针对矿井巷道长带状拓扑结构造成的距汇聚点近的簇首节点数据转发过重而过早死亡的“热区”问题, 提出了一种能量均衡的非均匀分簇算法(EBUC-M). 构造一种新的阈值公式选举候任簇首; 候任簇首以一定的竞选半径竞争最终簇首, 使得靠近汇聚节点的簇数量较多, 簇内节点较少, 远离汇聚节点的簇数量较少, 簇内节点较多, 从而平衡能量消耗; 簇内通信采用混合跳的形式来使负载均衡; 簇首间的数据转发机制采用使能量消耗最低的方式选择下一跳. 仿真表明该协议能有效的平衡能量消耗, 达到负载均衡, 从而延长网络生命周期.

关键词: 长带状; 热区; 非均匀分簇; 混合通信; 能量消费代价; 矿井; 工程地质.

中图分类号: P631; TP393

文章编号: 1000-2383(2013)01-0195-06

收稿日期: 2012-03-20

Energy- Balanced Unequal Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks of Mine Roadway

LI Jian^{1,2}, SHI Xin³, Liu He-ping¹

1. School of Automation, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Department of Electronics and Electrical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473000, China

3. Department of Avionics Engineering, Shenyang Aviation Vocational Technical College, Shenyang 110034

Abstract: An energy-balanced unequal clustering algorithm is proposed to solve the “hotspot” problem caused by long ribbon topology of mine roadway, in which the cluster heads close to the sink which has heavy burden leading to failure. A new threshold formula is constructed to elect the candidate cluster heads. Candidate cluster heads determine the cluster heads by certain campaign radius. After a reasonable partition, the clusters closer to the sink node have fewer nodes than those farther away from the sink node to balance the energy consumption; the hybrid communication mode within the cluster is adopted for the load balancing; for the data-forwarding between the cluster heads, the lowest energy consumption mechanism is proposed to select the next hop. Simulation results show that this protocol can balance energy consumption effectively to extend the network life cycle.

Key words: long ribbon; hotspot; unequal clustering; hybrid communication mode; energy consumption cost; mine; engineering geology.

0 引言

无线传感器网络是监测远程环境的重要工具, 具有强抗毁性, 自组织性, 不需要固定通信网络支持, 灵活性强, 可以快速展开的优点, 可以部署在复

杂恶劣甚至危险的环境中, 基本功能是监测、感知、处理监测区域的信息, 并将信息传输给监控中心. 由于煤矿井下环境条件复杂, 某些区域难以铺设有线通信电缆, 并且井下可能的塌方、火灾、爆炸等事故都会对固定的有线通信网络造成破坏, 因此将无线

传感器网络应用于井下通信监控系统,更能保证通信的有效性和可靠性.无线传感器网络节点一般依靠自身携带的干电池供电,能量有限.这个问题对于井下无线传感器网络而言尤为重要,井下环境复杂恶劣,难以进行维护,这就要求井下无线传感器网络的能耗更低,生命周期更长.路由技术是无线传感器网络网络层的关键(沈波等,2006;马震等,2008),对均衡节点能耗负载、节省通信能量、提高通信效率、延长网络生存时间起着关键作用.因此,研究出适合井下巷道的结构特点的路由协议,是井下无线传感器网络通信系统的关键问题.

从网络管理逻辑结构的角大致可将路由协议分为平面路由协议和分簇路由协议两类,基于分簇的路由协议在提高网络的扩展性上特别有效(Akyildiz *et al.*, 2002).分簇路由协议将节点划分为簇首节点和簇内节点,工作状态分为簇形成阶段和簇稳定阶段.首先,每个簇以一定规则选举簇首,簇首负责簇内数据的采集、处理和转发.煤矿井下基本由长而复杂的巷道组成,巷道是类似于隧道的受限空间,分簇结构非常适合于矿井巷道中(刘晓文等,2009).但这样带来了能耗不均的问题:巷道长度可达数千米到十几千米,宽度几米至十几米,因此井下无线传感器网络节点应为长带状部署,汇聚节点往往部署在巷道入口处,信息流方向主要由工作面向出口单向进行,信息流量统计不均衡;簇首与汇聚点通信时,由于是长带状分布,需要采用簇间多跳通信的形式,远离巷道入口处的簇首节点的数据需要靠近入口处的簇首节点的转发才能传输至汇聚点,这样靠近巷道入口处的簇首节点因承担了相对较多的数据转发任务而负担过重,能量消耗不均衡,热区问题(Perillo *et al.*, 2005)尤为严重.

1 相关研究工作

LEACH(Heinzelman *et al.*, 2000)是无线传感器网络最早提出的单跳分簇路由算法,设计思想是随机按“论”的形式以一定概率周期性的循环选择簇首节点,即让节点轮流担任簇首,从而将网络中的能量负载平均的分配到每个传感器节点,延长网络生命周期.LEACH协议在簇首选举上没有考虑节点剩余能量的多少,容易造成节点的过早死亡.邵晓萌和施惠昌(2007)针对矿井通信的特点将改进LEACH协议应用到矿井无线传感器网络中,结合巷道特点,优化簇首选举方法,允许节点采用多跳方

式和汇聚点通信,但仍然没有解决节点的过早死亡问题.HEED算法(Younis and Fahmy, 2004)选举簇首的概率与节点的剩余能量直接相关,剩余能量较多的节点以较大概率担任候选簇首,然后计算簇内通信代价,簇内通信代价小的候选簇首确定为最终簇首.HEED算法和LEACH算法相比有效的延长了网络生命周期,但没有考虑负载平衡仍存在热区问题.杨军和张德运(2009)提出了一种能耗均衡的非均匀算法以解决热区问题.其基本思想是合理分区,远离汇聚节点的簇数量较少,簇内节点较多;靠近汇聚节点的簇数量较多,簇内节点较少.从而减轻靠近汇聚节点簇的簇内通信开支,节约能量用于簇间数据转发,达到负载均衡,避免热区问题,但这种算法需要计算各层的通信能耗,开销较大.

本文所作的工作:提出一个非均匀的竞争半径的方式进行合理分区,然后在簇内采用混合跳的形式来均衡节点负载,簇间选择合适的数据转发方式进行通信.

2 系统模型

2.1 网络模型

结合矿井巷道的长带状特点,本文研究的网络分布在一狭长的长方形区域内,无线传感器网络节点均匀部署,满足以下特点:(1)汇聚节点位于巷道入口处,能量不受限制.传感器节点和汇聚节点部署后位置均不再移动.(2)每个节点都有一个唯一的ID标志,且都是同构的,初始能量相同,具有数据融合功能.(3)每个无线节点的发射功率可根据接收节点距离的远近自由调整.(4)通信链路对称,节点相互通信时使用相同传输功率,可根据测距算法计算出发送者到自己的距离.

2.2 能耗模型

无线通信消耗模型(Heinzelman, 2000)显示节点能耗主要由发射损耗和功放损耗两部分组成,节点发送字节的数据至距离处,需要消耗能量:

$$E_{tx} = \begin{cases} lE_{dec} + \epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{dec} + \epsilon_{amp}d^4, & d > d_0 \end{cases}, \quad (1)$$

节点接收 l 字节的数据,消耗能量为:

$$E_{rx} = lE_{dec}, \quad (2)$$

转发 l 字节的能量消耗为:

$$E_{fs} = E_{tx} + E_{rx}, \quad (3)$$

E_{dec} 为接收或发送每比特数据时电路的能量消耗; d_0 为临界距离,传输距离小于临界距离时,功率放

大损耗采用自由空间模型, ϵ_{fs} 为其功耗系数; 传输距离大于临界距离时, 功率放大损耗采用多路径衰减模型, ϵ_{amp} 为其功耗系数; 其中 $d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{amp}}}$.

3 协议设计

协议采用 LEACH 算法中“轮”的思想, 一轮为一个数据采集周期, 在每轮开始的时候需要重新选举簇头, 以平衡网络中的能量消耗. 协议包含以下 3 部分内容: 非均匀分簇机制、簇内节点的能量均衡和簇首间数据转发机制.

3.1 非均匀分簇机制

前面已经讨论, 井下巷道的长带状分布使得热区问题严重, 协议采用非均匀分簇的方法来避免热区问题. 候选簇首的产生: 在初始状态, 汇聚点向以一定功率向网络中所有节点发送初始化报文, 节点收到报文后, 计算自己与汇聚节点的距离, 启动成簇算法. 构造新的阈值公式为:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p \times [r \bmod 1/p]} \left[\frac{E_{current}}{E_n} + (r_s \text{ div } 1/p)(1 - \frac{E_{current}}{E_n}) \right], n \in G, \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

p 是簇头占有所有节点的百分比, $E_{current}$ 是节点的剩余能量, E_n 是节点的初始能量即最大能量, r 是循环论数, r_s 是节点连续未当选簇头的论数, 一旦当选, r_s 重置为 0. 该阈值公式考虑了剩余能量的因素, 用 $\frac{E_{current}}{E_n} + (r_s \text{ div } 1/p)(1 - \frac{E_{current}}{E_n})$ 因子用来平衡网络的剩余能量, 延长网络生命周期. 而 r_s 的引入解决了因剩余能量变小而导致最后簇头节点越来越少的问题. 选举候任簇头时每个节点产生一个在 0~1 之间的随机数, 如果该随机数小于 $T(n)$, 则该节点当选为候选簇首节点.

候选簇首节点通过竞争算法确定最终簇首. 设网络中候任簇首的最大竞争半径为 R_0 , 在非均匀的竞争半径内确定最终簇首, 使得远离巷道入口汇聚点处的簇数量较少, 簇内节点较多; 靠近汇聚节点的簇数量较多, 簇内节点较少. 从而减轻靠近汇聚节点簇的簇内通信开支, 节约能量用于簇间数据转发, 达到负载均衡. 并在确定最终簇首时以节点的剩余能量为参考权值, 延长网络生命周期. 竞争半径为 R_c :

$$R_c = \left[1 - \alpha \frac{d_{max} - d_{toBS}}{d_{max} - d_{min}} + \beta \left(1 - \frac{E_{current}}{E_n} \right) \right] R_0, \quad (5)$$

其中 d_{toBS} 代表节点到汇聚节点的距离, d_{max} 代表网络中节点到汇聚节点的最大距离, d_{min} 代表到汇聚节点的最小距离, α 和 β 为 0~1 之间的调节系数, 用来调节距离、能量对竞争半径的影响程度. 通过竞争半径公式可以看出, 竞争半径 R_c 和 d_{toBS} 、 $E_{current}$ 是同向变化的. 候选簇首以 R_c 为半径向邻居广播竞选消息, 和竞选半径之内的其他候选簇首节点比较节点的剩余能量, 剩余能量较大的候选节点当选为最终簇首节点, 在其竞争半径范围内的其他候任簇首退出竞争.

最终簇首节点向竞争半径之内的所有普通节点发送竞选成功消息, 定义能量消费函数如下:

$$\text{cost}(i, j) = \omega \times \frac{d(n_i, CH_j)}{d_{f,max}} + (1 - \omega) \frac{d(CH_j, BS) - d_{g,min}}{d_{g,max} - d_{g,min}}, \quad (6)$$

其中: $d(n_i, CH_j)$ 是节点 i 到簇首 j 的距离, $d_{f,max}$ 是节点到簇首的最大距离, $d(CH_j, BS)$ 是簇首 j 到汇聚节点的距离, $d_{g,max}$ 和 $d_{g,min}$ 分别是簇首节点到汇聚节点的最大距离和最小距离. ω 是权值, 是簇首能量消耗和簇内节点能量消耗之间的折中, 设计目标是最大化网络生命周期. 普通节点选择能量耗费函数最小的簇首, 发送加入消息, 建簇完成. 此外, 由于矿井巷道是长带状分布, 在巷道入口处的节点可能距离汇聚节点比较近, 这些节点可以分别计算自己和簇首节点、汇聚节点的距离, 如果和汇聚节点的距离小于和簇首节点的距离, 则直接和汇聚节点通信, 这样有利于减少网络能量消耗.

3.2 簇内节点的能量均衡

在非均匀路由算法中簇内节点和簇首节点的通信一般采用单跳形式(刘述刚等, 2009). 但采用单跳形式没有考虑负载均衡, 距离簇首节点较远的节点由于能耗较高而过早死亡. 簇内通信可采用混合跳的形式来进行能量均衡, 和簇首节点通信时, 簇内节点以一定概率 σ 用多跳形式通信, 以 $1 - \sigma$ 的概率用单跳形式通信, 从而达到远端节点和近端节点的能耗均衡, 延长网络生命周期.

典型簇结构如图 1 所示, 设簇半径为 R , 等分为 n 个环, 及多跳半径为 $r = \frac{R}{n}$, 且多跳半径 r 不小于最小连通半径 r_d (李成法等, 2007). n 环上节点在一个周期内平均转发的数据帧数为:

$$A = \frac{\pi R^2 - \pi (nr)^2}{\pi (nr)^2 - \pi (n-1)^2 r^2} = \frac{R^2 - (nr)^2}{(2n-1)r^2}, n \in$$

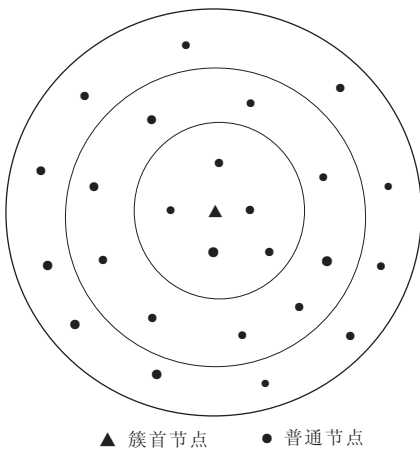


图 1 典型簇结构

Fig. 1 Typical cluster structure

$$\left[1, \frac{R}{r}\right]. \quad (7)$$

由公式(1)~(3)和公式(7)可知:

n 环上节点采用单跳通信时平均能量消耗为:

$$E_s(nr) = E_{dec} + \epsilon_{fs} n^k r^k, n \in \left[1, \frac{R}{r}\right]. \quad (8)$$

采用多跳通信时平均能量消耗为:

$$E_m(nr) = A(2E_{dec} + \epsilon(nr)^k) + E_{dec} + \epsilon_{fs}(nr)^k, \quad n \in \left[1, \frac{R}{r}\right]. \quad (9)$$

簇内通信可采用混合跳的形式来进行能量均衡,和簇首节点通信时,簇内节点以一定概率 σ 用多跳形式通信,以 $1-\sigma$ 的概率用单跳形式通信,能量消耗如下:

$$E(nr) = \sigma E_m(nr) + (1-\sigma)E_s(nr). \quad (10)$$

当远端节点和近端节点能耗近似相等时,可认为达到了能耗均衡.

最近端节点消耗:

$$E(r) = \sigma E_m(r) + (1-\sigma)E_s(r) = \sigma[E_m(r) - E_s(r)] + E_s(r). \quad (11)$$

由公式(8)和公式(9)可得 $E_m(r) > E_s(r)$, 所以 $E(r)$ 是随 σ 单调递增的函数.

最远端节点消耗为:

$$E(R) = \sigma E_m(R) + (1-\sigma)E_s(R). \quad (12)$$

由于每一跳的距离均为 r , 有 $E_s(r) = E_m(R)$, 所以公式(12)还可写为:

$$E(R) = \sigma E_s(r) + (1-\sigma)E_s(R) = \sigma[E_s(r) - E_s(R)] + E_s(R). \quad (13)$$

很明显 $E_s(r) - E_s(R) < 0$, 由此可知 $E(R)$ 是随 σ 单调递减的函数. 当 $E(r) = E(R)$, 近端节点和远

端节点能量均衡. 即 $\sigma[E_m(r) - E_s(r)] + E_s(r) = \sigma[E_s(r) - E_s(R)] + E_s(R)$, 有:

$$\sigma = \frac{E_s(R) - E_s(r)}{E_m(r) - 2E_s(r) + E_s(R)}. \quad (14)$$

当通信概率 σ 满足公式(14)时满足簇内通信的负载平衡.

3.3 簇首间数据转发机制

井下巷道的长带状特点,使得远离巷道入口处的簇首节点必须采用多跳路由的形式才能将数据传输至汇聚节点. 在矿井巷道长带状线型模型下,多跳间最佳距离为(Stojmenovic and Lin, 2001):

$$d_f = \frac{d_{wBS}}{\sqrt{\frac{E}{\epsilon_{amp}}}}. \quad (15)$$

如果靠近汇聚节点的簇首节点与汇聚节点的距离小于 d_f , 则该簇首节点可以直接和汇聚节点单跳通信,其他绝大多数簇首节点需要采用多跳形式和汇聚节点通信. 定义簇首节点 s_i 路由候选节点集合为: $s_i \cdot R_{di} = \{s_j \mid d(s_j, DS) < d(s_i, DS) \text{ 且 } d(s_i, s_j) - d_f \leq B\}$, B 为使候选路由集合避免为空集的调节参数,可以看出 B 越小,多跳间传输距离越接近最佳传输距离.

定义传输有效性度量值为:

$$TH = c \frac{E_{current}}{d(s_i, s_j) - d_f}, \quad (16)$$

c 为调节系数 s_i 从候选路由表中选择 TH 值最高的节点作为下一跳路由由节点. TH 中考虑了节点剩余能量的因素,有助于负载平衡. 路由节点确定之后,数据呈线型向汇聚节点传输.

4 仿真实验

仿真实验参数如表 1 所示:在不同竞争半径下,EBUC-M 协议的生命周期如图 2 所示. 可以看出,随着竞争半径的增长,生命周期下降. 这是因为随着竞争半径的增加,簇内节点增多,簇首节点处理簇内节点数据增多,并且由于簇内节点增多,更多节点感知同一事件,造成数据冗余度增加.

图 3 显示了 LEACH、EECS、EBUC-M 协议节点存活率情况. 由图 3 可知,EBUC-M 协议的生命周期最长,EECS 次之,LEACH 最差. 从死亡节点上来看,在 1 800 轮时,LEACH 协议就有节点开始死亡,EECS 第一个节点死亡轮数在 2 500 轮左右,而 EBUC-M 协议第一个节点死亡的轮数在 3 800

表 1 网络参数

Table 1 Network parameters

参数	取值
节点个数	800
汇聚点位置	(0,0)m
节点初始能量	2J
区域位置	(0,0)~(0,1 000)m
E_{elec}	50n J/bit
ϵ_{fs}	10p J/bit
ϵ_{amp}	0.001 8p J/bit
d_0	66 m

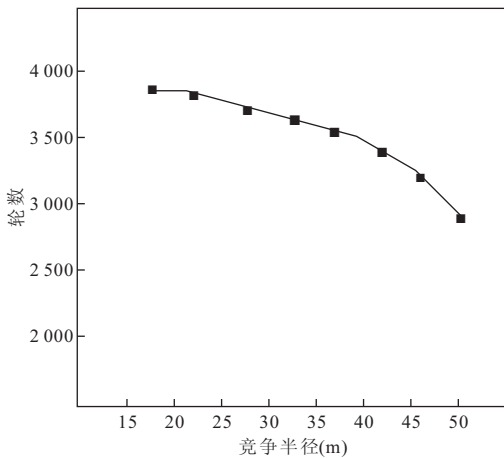


图 2 竞争半径与生命周期的关系

Fig. 2 Relationship of competition radius and life cycle

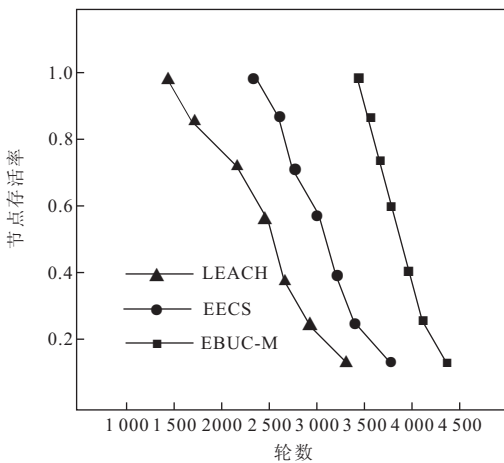


图 3 节点存活率与生命周期的关系

Fig. 3 Relationship of node survival ratio and life cycle

轮左右时出现,说明 EBUC-M 的能量使用效率较高.

图 4 显示了 LEACH、EECS、EBUC-M 协议负载均衡的情况. 定义从建簇开始时到第一个节点死亡的轮数为 FND(first node to die), 到最后一个节

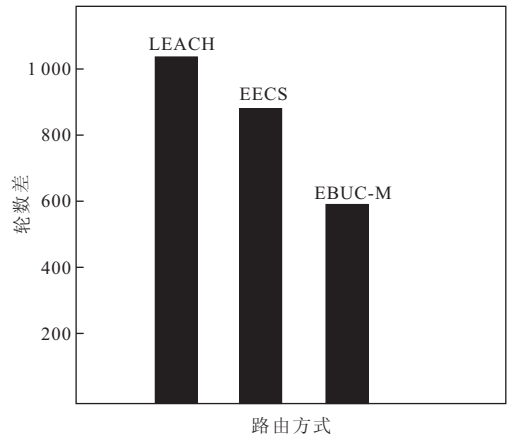


图 4 负载均衡情况

Fig. 4 Load balancing situation

点的死亡时间为 LND(last node to die). LND 与 FND 的差反映了负载均衡情况. 由图 4 可以看出, EBUC-M 第一个节点死亡的轮数至最后一个节点死亡的轮数相隔大约 600 轮, 相差的轮数在 3 种协议中最少, 反映出负载最均衡.

5 结论

本文提出了一种非均匀分簇的能耗均衡路由协议, 利用非均匀分簇解决矿井巷道线形拓扑结构的热区问题, 在簇内采用混合跳的形式进行通信来平衡节点负载. 具有生命周期较长, FND 与 LND 轮数差较少等优点. 该算法在网络初始化时需要计算节点到汇聚点的距离, 矿井下环境复杂, 如何利用一个高效的测距算法是下一步要解决的问题.

References

Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., et al., 2000. Wireless Sensor Networks: A Survey. *Computer Networks*, 38(4): 393-422.

Heinzelman, W., 2000. Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Networks. Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA.

Heinzelman, W., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H., 2000. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. In: Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences, ed., IEEE Computer Society, Maui, 3005-3014.

Li, C. F., Chen, G. H., Ye, M., et al., 2007. An Uneven Cluster-Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. *Chinese Journal of Computer*, 30(1): 27-

- 36(in Chinese with English abstract).
- Liu, S. G., Liu, H. L., Zhan, J., et al., 2009. Research of Energy-Efficient Hybrid Communication Algorithm in Wireless Sensor Networks. *Journal on Communications*, 30(1):12–17(in Chinese with English abstract).
- Liu, X. W., Yan, J. J., Miao, J., et al., 2009. Improvement on LEACH Agreement of Mine Wireless Sensor Network. *Coal Science and Technology*, 37(4):46–49 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z., Liu, Y., Shen, B., 2008. An Energy-Efficient Routing Model for Wireless Sensor Networks and Simulations. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 32(5):43–47(in Chinese with English abstract).
- Perillo, M., Chen, Z., Heinzelman, W., 2005. An Analysis of Strategies for Mitigating the Sensor Network Hot Spot Problem. Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services. IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, 474–478.
- Shao, X. M., Shi, H. C., 2007. Application of Improved LEACH to Underground Communication System. *Chinese Journal of Sensors and Actuator*, 20(6):1404–1408 (in Chinese with English abstract).
- Shen, B., Zhang, S. Y., Zhong, Y. P., 2006. Cluster-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. *Journal of Software*, 17(7):1588–1601 (in Chinese with English abstract).
- Stojmenovic, L., Lin, X., 2001. Power-aware Localized Routing in Wireless Networks. *IEEE Trans. On Parallel and Distributed Systems*, 12(10):1122–1133.
- Yang, J., Zhang, D. Y., 2009. A Data Transmission Mechanism for Wireless Sensor Networks Using Unequal Clustering. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 43(4):14–17(in Chinese with English abstract).
- Younis, O., Fahmy, S., 2004. A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad-Hoc Sensor Networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 3(4):660–669.

附中文参考文献

- 李成法, 陈贵海, 叶懋, 等, 2007. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议. *计算机学报*, 30(1):27–36.
- 刘述刚, 刘宏立, 詹杰, 等, 2009. 无线传感器网络中能耗均衡的混合通信算法研究. *通信学报*, 30(1):12–17.
- 刘晓文, 闫静杰, 苗锦, 等, 2009. 矿井无线传感器网络 LEACH 协议的改进. *煤炭科学技术*, 37(4):46–49.
- 马震, 刘云, 沈波, 2008. 用于无线传感器网络的节能路由模型与仿真. *北京交通大学学报*, 32(5):43–47.
- 邵晓萌, 施惠昌, 2007. 改进的 LEACH 协议在井下通信系统中的应用. *传感技术学报*, 20(6):1404–1408.
- 沈波, 张世永, 钟亦平, 2006. 无线传感器网络分簇路由协议. *软件学报*, 17(7):1588–1601.
- 杨军, 张德运, 2009. 非均匀分簇的无线传感器网络数据传送机制. *西安交通大学学报*, 43(4):14–17.