

无线传感器网络优化生存时间的动态路由算法

朱艺华¹, 沈丹丹², 吴万登¹, 沈振伟¹, 汤一平¹

(1. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江杭州 310032; 2. 浙江工业大学经贸管理学院, 浙江杭州 310023)

摘 要: 节能和延长网络生存时间是无线传感器网络研究领域的热点问题. 该文综合考虑网络中节点的剩余能量和节点间传输数据的能耗, 基于最短路径树算法, 通过构造两种不同的权值函数, 提出了“比例权值路由算法”(Ratio-W)与“和权值路由算法”(Sum-W). 仿真分析表明, 所提出的算法可以延长网络生存时间, 并使能耗经济有效, 比一些已有知名算法更优.

关键词: 无线传感器网络; 路由; 网络生存时间; 节能

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 05-1041-05

Dynamic Routing Algorithms Optimizing Lifetime of Wireless Sensor Networks

ZHU Yi-hua¹, SHEN Dan-dan², WU Wan-deng¹, SHEN Zhen-wei¹, TANG Yi-ping¹

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310032, China;

2. College of Business Administration, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: Saving energy and prolonging network lifetime are key issues of wireless sensor networks. Based on shortest path tree, ratio weight (Ratio-W) and sum weight (Sum-W) routing algorithms are proposed, in which both remaining energy of nodes and energy consumption for delivering packets on wireless links are considered. Simulation exhibits the Ratio-W and the Sum-W can prolong network lifetime and make energy consumed efficiently and effectively. In addition, the proposed algorithms outperform some well-known routing algorithms in terms of network lifetime and energy consumption.

Key words: wireless sensor network; routing; network lifetime; energy saving

1 引言

无线传感器网络是部署在监测区域内、由大量微型传感器节点通过无线电通信形成的一个多跳的自组织网络,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域里被监测对象的信息,并发送给观察者.在传感器网络中,当一个远离基站的节点要向基站传输所感知的数据时,往往要借助于中间节点、以多跳的方式转发数据.传感器网络具有集中式数据收集、多跳数据传输、多对一流量模式等特征.

由于传感器节点大多采用电池供电,电源能量受到限制,因此,传感器网络的部署及路由协议都需要从节能出发,最大限度地延长整个网络的生存时间^[1].事实上,网络生存时间的定义因应用而异:对于一个节点的失效就会影响整个传感器网络正常运转的应用来说,网络生存时间就是从网络开始运转到第一个节点失效这一时间段;而对于其它一些应用,网络生存时间可能是

到一部分节点(如半数节点)失效这一时间段^[2].本文采用前者,即到第一个节点失效这一时间段作为网络生存时间^[2,3].文献[4]研究了传感器网络部署策略,提出了网络生存时间和代价的一般模型,以分析与优化这些部署策略.在无线传感器网络的路由研究领域,已经给出了一些路由协议. Flooding^[5]和 Gossiping^[6]是两个传统的路由协议,它们以洪泛为基础,其信令开销较大. LEACH^[7]是一种基于簇的路由协议,其基本思想是随机选择簇首节点,将整个网络的能量负载平均分配到每个节点上,从而降低能耗、延长网络生存时间.最大化生存时间路由协议^[8],利用网络流建模,采用线性规划方法解决最大生存时间问题.文献[9]从理论上分析了最大化网络生存周期的数据收集问题,提出了一种近似最优的最大化网络生存周期的数据收集算法.文献[10]在数据收集和聚合机制下,提出了基于最小生成树(MST, Minimum Spanning Tree)的路由算法——PEDAP与PEDAP-PA.

收稿日期:2008-06-23;修回日期:2008-09-09

基金项目:国家自然科学基金(No. 60873228, No. 60673177);浙江省钱江人才计划项目(No. 2007R10G2020022)

怎样高效利用传感器网络的节点能量以提高网络生存时间是无线传感器网络领域中一个十分重要的研究课题. 我们注意到, 一些节能路由算法(如基于最小生成树的路由算法)虽然降低了整个网络的能耗, 但网络生存时间却缩短了, 这是因为在这些算法中某几个枢纽节点因承担了过多的数据分组转发任务导致电池能量过早耗竭而死亡. 因此, 如何设计一种既能节约能量, 又能延长生存时间, 还能使数据分组传递延时小的路由对传感器网络的有效运转是极为关键的. 此乃本文的研究要点. 本文的主要创新之处在于: 综合考虑网络中节点的剩余能量和节点间传输数据的能耗需求, 基于最短路径树, 提出了“比例权值路由算法”(Ratio-W)与“和权值路由算法”(Sum-W).

2 系统假设与能耗模型

无线传感器网络中, 节点一般分为 Sink 节点(即数据收集节点)和普通传感器节点(简称节点). 我们假设: (1) Sink 节点及其它所有普通节点的位置是固定的, 且 Sink 有整个网络拓扑结构信息; (2) 普通节点具有相同的属性(如无线电发射功率、通信半径、单位时间能耗等); (3) 每个普通节点能量受限, 但 Sink 能量不受限制; (4) Sink 节点定期地进行数据收集, 普通节点通过直接或间接多跳的方式把数据传送给 Sink.

考虑到各节点主要的能耗是由无线接口发送与接收数据产生, 其它能耗(如计算过程所消耗的能量等)

可忽略不计, 因此, 在计算能耗时, 我们采用最常用的 first order radio 模型^[11], 即节点接收 k 比特数据时的能耗为:

$$E_R(k) = kE_{elec} \quad (1)$$

将 k 比特数据从一个节点发送到另一个节点所需消耗能量为:

$$E_T(k, d) = kE_{elec} + kE_{amp}d \quad (2)$$

其中, E_{elec} 为电路上接收或发送每比特数据的能耗; E_{amp} 为放大器发送每比特数据的能耗; d 为发送节点与接收节点之间的距离; α 是路径损耗系数, 一般取值范围在 $[2, 4]$ 之间. 于是, 根据式(1)、(2)可知, 两个距离为 d_{ij} 的节点 i, j 之间传输 k 比特数据的总能耗为:

$$C_{ij}(k, d_{ij}) = E_R(k) + E_T(k, d) = k(2E_{elec} + E_{amp}d_{ij}) \quad (3)$$

3 算法描述

在无线传感器网络中, 如果节点 j 在节点 i 的通信范围之内, 则称节点 j 是节点 i 的邻居. 由上节第(2)个假设可知, 这时, 节点 i 也是节点 j 的邻居. 以 (i, j) 表示邻居节点 i 与 j 的通信链路, $N(i)$ 表示节点 i 邻居的集合. 此外, 以无向图 $G(V, E)$ 表示传感器网络, 其中 V 为所有传感器节点的集合, E 为图中所有边即通信链路的集合. 易知, 式(3)就是在链路 (i, j) 传输 k 比特数据所需的能耗.

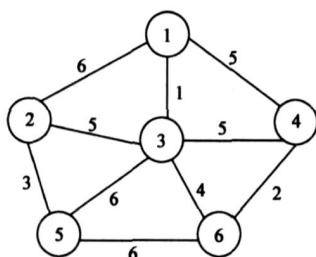


图1 传感器网络拓扑图

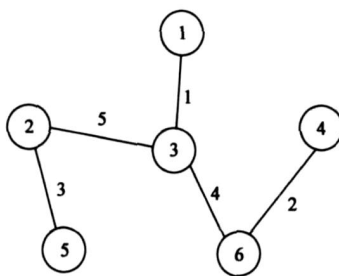


图2 最小支撑树

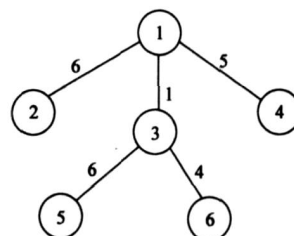


图3 最短路树

我们选取到网络中第一个节点因能量耗尽而失效为止这段时间为网络的生存时间^[2,3]. 因此, 要延长网络生存时间, 就要尽可能降低数据收集过程中各节点的能耗. 如果着眼于整个网络的能耗即网络中所有节点的能耗, 我们应该注意到: 在将图 $G(V, E)$ 的边的权重取为沿着这条边传递数据所需的能耗(即式(3))条件下, 各个节点均沿着图 $G(V, E)$ 的最小支撑树将数据汇集到 Sink 节点的路由算法(如 PEDAP 算法^[10])不是最优算法, 而最优算法是基于 LET(Least Energy Tree) 的路由算法^[12](以下简称 LET 算法). 其理由是: LET 算法以式(3)作为无线传感器网络通信链路的权值, 再由 Dijkstra 算法得到图 $G(V, E)$ 的一棵树根在 sink 的最短

路径树即 LET, 然后图 $G(V, E)$ 的所有节点均沿着 LET 将数据传送到 Sink, 因而各个节点均以最小能耗将数据发送到 Sink, 故而整个网络的能耗最小. 例如, 对图 1 所示的传感器网络, 其中, 节点 1 是 Sink 节点, 边上所注数字表示边的权值(如能耗), 易知: 图 2 是它的最小支撑树, 图 3 是它的最短路树. 可以看出: 节点 2, 3, ..., 6 沿着图 2 所示的最小支撑树将数据汇集到 Sink 即节点 1, 总的权值是 $(5+1) + 1 + (2+4+1) + (3+5+1) + (4+1) = 28$; 但这些节点沿着图 3 所示的最短路树(LET)将数据汇集到 Sink, 总的权值是 $6+1+5+(6+1)+(4+1) = 24$. 因此, 后者比前者更优.

然而, LET 算法存在着一个缺点: 它忽视了节点的

剩余能量,容易导致一些关键节点因承担过多的数据转发任务,过早耗尽能量而失效。为了弥补这一缺点,除了考虑式(3)的能耗之外,我们考虑节点的剩余能量,通过引入新的链路权值,将LET算法推广为以下两种算法:“比例权值(Ratio-W)算法”与“和权值(Sumr W)算法”。

以 $Re(i)$ 表示节点 i 的剩余能量,以 w_{ij} 表示链路 (i, j) 的权值。在 Ratio-W 算法中,取

$$w_{ij} = [C_{ij}(k, d_{ij})] \left[\frac{1}{Re(i)} \right] \quad (4)$$

其中, α 、 β 为正常数,分别称为“能耗因子”与“剩余能量因子”;在 Sumr W 算法中,取

$$w_{ij} = C_{ij}(k, d_{ij}) + \frac{1}{Re(i)} \quad (5)$$

其中, α 与 β 为正常数且 $\alpha + \beta = 1$, 分别称为“能耗权重”与“剩余能量权重”。可以看出:当 $\alpha = 1$, $\beta = 0$ (或 $\alpha = 0$, $\beta = 1$) 时, Ratio-W 算法(或 Sumr W 算法)变为 LET 算法。

Ratio-W 与 Sumr W 算法均采用 Dijkstra 算法构建路由树(最短路树),具体算法如下^[12]:

```

T = { s }, L = V - { s }
for each v ∈ L
    if ( v, s ) ∈ E, then
        { p(v) = s, Dpath(v) = wv,s }
    else
        { p(v) = -1, Dpath(v) = ∞ }
}
do while L ≠ ∅
    { find v0 ∈ L such that Dpath(v0) = minv ∈ L { Dpath(v) } }
    T = T ∪ { v0 }, L = L - { v0 }
    for each u ∈ N(v0)
        if Dpath(v0) + wu,v0 < Dpath(u), then
            { Dpath(u) = Dpath(v0) + wu,v0, p(u) = v0 }
        }

```

从式(4)、(5)式可知,随着节点 i 剩余能量 $Re(i)$ 的减少,节点 i 与邻居节点的链路的权值就会增加,因而,在 Dijkstra 算法中,它就会推迟被加入到路由树中(即它离树根节点——Sink 节点的跳数增大),从而它转发其他节点的数据量就减少,这样就延长了这个节点的生存时间,同时也延长网络生存时间。

4 算法的实现

Ratio-W 与 Sumr W 算法是集中式算法,用在 Sink 节点。Sink 节点开始数据收集时,采用洪泛(flooding)方式向所有节点发一个数据分组 REQ,通知这些节点收集数据即将开始。各节点收到 REQ 之后,回复一个数据分

组 REP 给 Sink 节点,REP 包括:节点的剩余能量 $Re(i)$ 以及所要发送的数据量 k (比特)。Sink 在收到各节点的 REP 分组之后,运行 Ratio-W 算法(或 Sumr W 算法),以构建路由树(由此可见,路由树是根据当时的节点剩余能量及所要发的数据量动态构建出来的)。在算法完成(即路由树构建完成)之后, Sink 节点采用洪泛方式将路由树告诉网络中的所有节点,之后,所有节点根据收到的路由树发送数据。

由第 2 节假设(1), Sink 节点知道整个网络的拓扑结构包括节点间的距离,于是在 Sink 收到所有节点发来的剩余能量 $Re(i)$ 、所要发送的数据量 k 之后,可以计算出式(4)、(5)的权值。因此, Ratio-W 算法与 Sumr W 算法可以在 Sink 节点实现。

5 仿真结果与分析

为验证算法有效性,我们将 Ratio-W、Sumr W、PEDAP、PEDAP-PA、LET 等算法进行比较。我们不考虑节点竞争信道、数据分组出错、超时重发、信令传递、计算、数据融合等能耗,仅考虑无线通信能耗。在仿真时,取与文献[11]相同的参数: $E_{elec} = 50$ (nJ/bit), $E_{amp} = 100$ (pJ/bit/m²), $\alpha = 2$, 节点无线电通信半径为 200m, 节点初始能量 1000J, 节点每次发给 Sink 节点的数据量 1Mb。根据给定的节点数,在 1000 × 1000m² 的正方形区域内随机产生 50 个拓扑结构图,并对每个拓扑图计算 PEDAP、PEDAP-PA、LET、Ratio-W、Sumr W 的网络生存时间、平均能耗和平均时延,然后计算其平均值。其中,网络生存时间以 Sink 所完成的数据收集周期(DGC, Data gathering cycle)个数来表示,一个 DGC 是指从 Sink 节点开始收集数据到它收集到网络中每个节点的数据所需的时间;平均能耗 = 在网络生存时间内所有节点的总能耗 / (DGC 个数 * 节点个数);平均时延 = 在网络生存时间内所有数据分组到达 Sink 节点的总跳数 / (DGC 个数 * 节点个数)。

图 4 比较了各算法的网络生存时间。其中,权值函数(4)、(5)中的参数分别取为 $\alpha = 1$, $\beta = 1$ 和 $\beta = 0.01$,

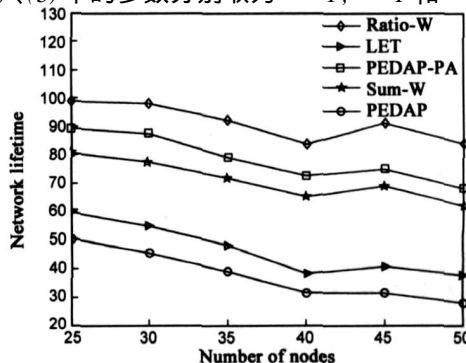


图4 网络生存时间比较

$= 0.99$. 由图 4 可以看出, Ratio-W 的网络生存时间(DGC 个数)最优, Sumr-W 的网络生存时间比 PEDAP-PA 略差, 但超过了 PEDAP、LET. 从图 5 可知, LET 能耗最小, Ratio-W 与 Sumr-W 次之, PEDAP 和 PEDAP-PA 的能耗相对

较大. 网络时延的比较如图 6 所示, Sumr-W、Ratio-W 的时延较低, 比 PEDAP、PEDAP-PA 优; 与 LET 相比, Sumr-W 更优, 但 Ratio-W 的时延与 LET 接近.

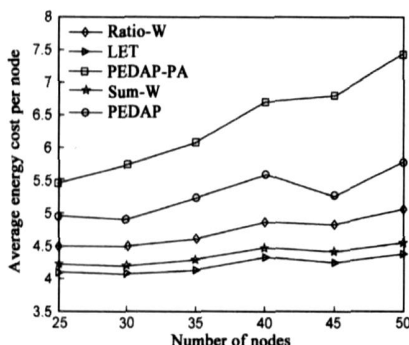


图5 能耗的比较

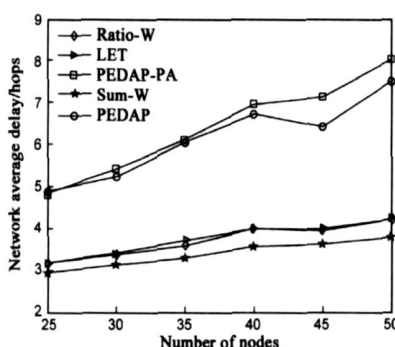
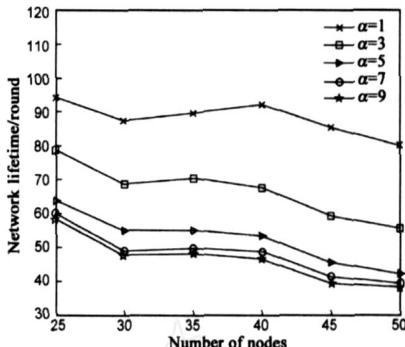


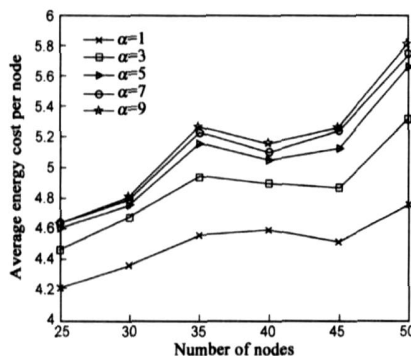
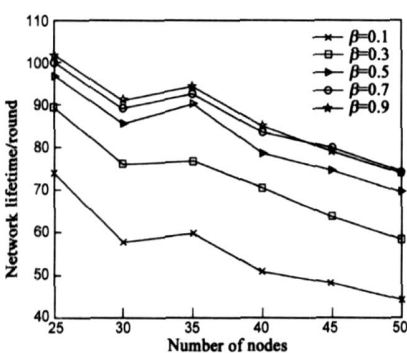
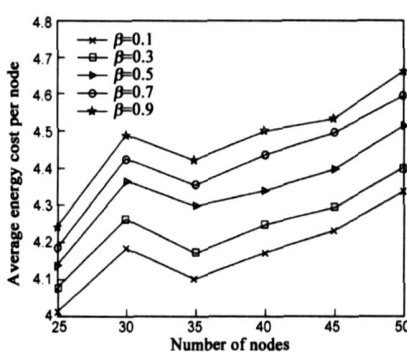
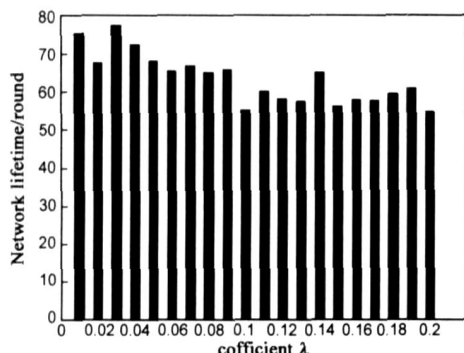
图6 时延(跳数)的比较

图7 α 对网络生存时间的影响

下面研究 Ratio-W 与 Sumr-W 中各参数对网络指标的影响. 首先, 研究 Ratio-W. 固定 $\beta = 1$, 并让 α 分别取 $\alpha = 1, 3, 5, 7, 9$, 得到图 7 与图 8. 可以看出: 在节点数给定后, α 越大, 相应的网络生存时间(DGC 个数)越小(图 7), 且平均能耗越大(图 8). 这是因为: (1) 在 $\alpha = 1$ 时, 随着 α 的增大, 权值函数(4)中链路能耗的作用变大, 相应地削弱了节点剩余能量在权值函数(4)中的作用, 从而降低了网络生存时间; (2) DGC 个数的减小, 使得每个 DGC 的能耗增加. 从图 7 及图 8 可以看出, 当增大到一定程度, 它的变化对网络生存时间与平均能

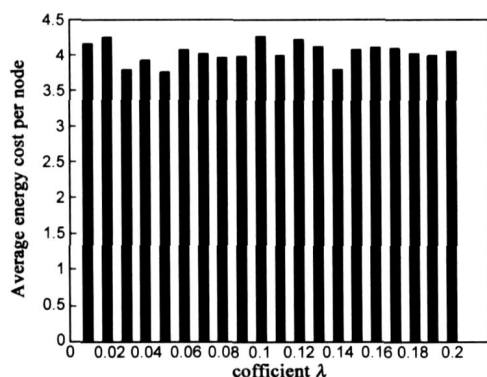
耗的影响越来越不明显. 此外, 当 $\alpha < 1$ 时, 我们得到: 在节点数给定后, α 越大(即 α 越接近于 1), 相应的网络生存时间越大, 且平均能耗越小(此处, 我们省略实验结果图).

固定 $\alpha = 1$, 并让 $\beta < 1$, 分别取 $\beta = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$, 得到图 9 与图 10. 可以看出: 在节点数给定后, β 越接近于 1, 网络生存时间越大(图 9), 但能耗也越大(图 10). 在取 $\beta = 1$ 的情况下, β 越大, 网络生存时间越小, 且能耗越大(此处省略实验结果图).

图8 α 对能耗的影响图9 β 对网络生存时间的影响图10 β 对能耗的影响图11 λ 对网络生存时间的影响

综上所述, 在 Ratio-W 算法中, 如果强调优化网络

生存时间, 则选择 α 、 β 接近于 1; 如果强调优化能耗, 则选择 α 接近于 1, β 接近于 0. 下面研究 Sumr-W 的参数变化对网络指标的影响. 由于式(5)的参数是归一化的, 即 $\alpha + \beta = 1$, 因此, 只对其中一个参数对网络生存时间、能耗和时延方面的影响进行研究即可. 固定网络中的节点数为 25, 令 λ 取值 0.01, 0.02, ..., 0.2, 得到图 11 与图 12. 可以看出, 随着 λ 的增大, 网络生存时间出现波动并呈缓慢下降趋势(图 11), 同时能耗也随着波动(图 12). 因此, 在用 Sumr-W 算法时, 如果侧重于网络生存时间, 应该让 λ 取较小的值(即接近于 0 的值); 否则, 取较大的值(即接近于 1 的值).

图12 λ 对能耗的影响

6 结束语

本文基于最短路径树,通过构造不同的权值函数,提出了 Ratio-W 与 Sumr W 两种路由算法,这两种路由算法,能够延长网络生存时间并将能耗维持在一个经济的水平.同时,通过对算法参数的调整,可以平衡网络生存时间与能耗.

参考文献:

- [1] Tubaishat M, Madria S. Sensor networks: An overview [J]. IEEE Potentials, 2003, 22(2): 20 - 23.
- [2] Wang J, Howitt I. Optimal traffic distribution in minimum energy wireless sensor networks [A]. 2005 IEEE Global Telecommunications Conference [C]. Washington DC, USA: IEEE Communications Society, 2005. 3274 - 3278.
- [3] Liang W, Liu Y. Online data gathering for maximizing network lifetime in sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(1): 2 - 11.
- [4] Cheng Z, Perillo M, Heinzelman W B. General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies [J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2008, 7(4): 484 - 497.
- [5] Hedetniemi S, Liestman A. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks [J]. Networks, 1998, 18(4): 319 - 349.
- [6] Haas Z J, Halpern J Y, Li L. Gossip-based Ad hoc Routing [A]. Proc. of the IEEE INFOCOM [C]. New York: IEEE Communications Society, 2002. 1707 - 1716.
- [7] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks

[A]. Proc. of the 33rd Annual Hawaii International Conference on Systems Science [C]. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2000. 3005 - 3014.

- [8] Chang J H, Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2004, 12(4): 609 - 619.
- [9] Zhang Q, Xie Z P, Ling B, Sun W W, Shi B L. A maximum lifetime data gathering algorithm for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2005, 16(11): 1946 - 1957.
- [10] Tan H O, Korppeoglu I. Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks [J]. ACM SIGMOD Record, 2003, 32(4): 66 - 71.
- [11] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Trans. Wireless Commu, 2002, 1(4): 660 - 670.
- [12] Zhu Y H, Wu W, Leung V C M, Yang L. Energy-efficient tree-based message ferrying routing schemes for wireless sensor networks [A]. ChinaCom 2008 [C]. Hangzhou, Zhejiang, China, Aug. 25 - 28, 2008.

作者简介:

朱艺华 男, 1961 年生于浙江玉环, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 中国计算机学会高级会员, 中国电子学会高级会员, 主要研究方向为移动计算、无线网络的协议、算法、性能分析与优化, 在《IEEE Transactions on Wireless Communications》、《IEEE Communications Letters》、《IEEE Transactions on Vehicular Technology》、《Journal of Computer Science and Technology》、《电子学报》、《计算机研究与发展》及 IEEE 国际会议论文集上发表学术论文 100 余篇。
E-mail: yhzhu@zjut.edu.cn

沈丹丹 女, 1983 年生于浙江杭州, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络路由算法、最优化理论与算法。

吴万登 男, 1983 年生于浙江瑞安, 硕士研究生, 主要研究方向为移动自组织网络及无线传感器网络路由算法。

沈振伟 男, 1982 年生于浙江嘉兴, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络路由算法。

汤一平 男, 1958 年生于浙江杭州, 博士, 教授, 主要研究方向为全方位视觉传感器、普适计算技术, 已经授权和公开的国家发明专利 70 多项, 发表学术论文 90 余篇。