

Routing Protocol Based on Cluster-Head-Chaining Incorporating LEACH and PEGASIS*

ZHANG Zhen, YAN Lianshan*, PAN Wei, LUO Bin, LIU Jiangtao, LI Xiaoyin

(School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Reducing the energy consumption and extending network lifetime are key techniques for wireless sensor networks (WSNs). A novel reliable routing algorithm is proposed by taking advantages of both LEACH and PEGASIS algorithms. The new algorithm randomly selects five cluster heads linked into chains and the one with maximum residual energy is chosen to transfer information to the sink. Nodes with energy less than the threshold can not be selected as the cluster head thus to enhance the overall network robustness. Theoretical analysis and simulation results demonstrate that, compared with LEACH, the proposed algorithm can prolong the network lifetime by 117% ~ 351% and balance the energy consumption of network nodes as well. At the same time, compared with the PEGASIS, the algorithm improves by 290% in terms of the network latency.

Key words: Wireless sensor networks; routing protocol; low-energy adaptive clustering hierarchy; power-efficient gathering in sensor information systems

EEACC: 6150P

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.08.026

基于 LEACH 和 PEGASIS 的簇头成链可靠路由协议研究*

张震, 闫连山*, 潘炜, 罗斌, 刘江涛, 李晓银

(西南交通大学信息科学与技术学院信息光子与通信研究中心, 成都 610031)

摘要:减少能耗、延长网络寿命是无线传感网络的关键技术。基于 LEACH 和 PEGASIS 算法, 提出一种改进的有效路由算法。改进的算法规定 LEACH 中簇头数目为 5 个, 利用 PEGASIS 算法使簇头成链, 并选择剩余能量最多的簇头传送信息给基站。在选择簇头时, 考虑节点的剩余能量, 给节点设置一个能量阈值, 小于该值则不能当选为簇头, 因此提高了网络的健壮性。理论分析和仿真结果表明, 改进后的算法比 LEACH 算法生命周期提高 117% ~ 351%, 且能耗更加均匀, 同时与 PEGASIS 相比, 时延提高 290%。

关键词:无线传感网络; 路由协议; LEACH; PEGASIS

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)08-1173-06

无线传感网络 (WSN) 被认为是 21 世纪最重要的技术之一, 是一种新型的信息获取和处理技术。WSN 综合了基于微电子的传感器技术、分布式信息处理技术和无线通信技术, 通过网络节点之间协作实时监测、感知和采集网络分布区域内的各种环境或监测对象信息。无线传感网络具有十分广泛的应用前景, 在军事国防、工农业、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、危险区域远程控制等许多领域都有重要的理论价值和巨大的实用价值, 它已经引起了世界许多国家军事界、学术界和工业界的高度重视^[1-2]。

因为 WSN 由大量低成本的微型节点组成, 能量、带宽、计算、存储等资源非常有限。有效管理和使用这些资源, 最大限度地延长网络寿命是 WSN 研究所面临的一个关键技术挑战。传感器节点通常随机分布在被监测区域内。由于一般采用电池供电, 被监测区域内的传感器节点能量有限, 随意更换传感器节点显得不切实际。因此, 网络的能耗和路由协议是无线传感网络的重要研究内容^[3]。

1 路由协议

目前无线传感网络路由协议主要有平面路由协

项目来源: 国家自然科学基金项目资助 (60972003); 教育部新世纪优秀人才项目资助 (NCET-08-0821); 中央高校基本科研业务费专项资金项目资助 (SWJTU09ZT14)

收稿日期: 2010-02-03 修改日期: 2010-03-23

议和分层路由协议型两大类。LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 协议是由 MIT 的 Heinzelman 等人在 2000 年提出的一种低功耗自适应层次路由协议,是 WSN 中最早和广泛应用的分层路由协议。很多路由协议都是基于 LEACH 协议基础改进而来的,其中 PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) 就是在 LEACH 基础上发展起来的。

1.1 LEACH 路由协议

LEACH^[4-5] 协议中定义了“轮”(round)的概念,每轮包括初始化和稳定工作两个阶段,簇头节点进行轮换,以达到分散各节点能量消耗的目的。

在每一轮的初始化阶段,每个传感器节点自主决定是否在本轮充当簇头。这个决定主要取决于整个网络中簇头个数的百分比。节点产生一个 0~1 的随机数,如果这个数小于阈值 $T(n)$ ^[4],则广播成为簇头的信息,否则就放弃当选簇头。

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

其中, P 是网络中簇头节点数占总节点数的百分比; r 是已完成轮数; G 是在前 $1/P$ 轮中没有充当簇头节点的集合。

当节点选定为簇头时,簇头主动向网络中的其他节点广播自己当选为簇首的信号 (Advertisement Message, ADV)。而其它非簇头节点接收来自不同簇头节点的广播信息后,根据信号的强弱选择所属簇首,并发送确认消息给相应簇头节点。

在稳定工作阶段,簇头节点收到非簇头加入簇的信息后,会产生一个 TDMA^[6] 时刻表,为簇内所有节点分配发送时隙,并把时刻表广播给簇内成员。此后,簇头接收到成员节点发来的数据,并融合成一个数据包发送给基站。当数据发送完毕后,新一轮的工作开始。

1.2 PEGASIS 路由协议

PEGASIS^[7] 协议使用贪婪算法把所有节点连接成一条链。从离基站最远的节点开始构造链,确保每个节点都有其相邻的节点,每个节点只同距离它最近的邻居节点通信。在每轮通信中,只有一个节点当选为领导节点与基站直接通信。

在数据传输时,领导节点产生一个令牌^[8] (Token)。在每轮中,Token 控制数据从链一端向领导节点方向传输数据,然后 Token 到达链的另一端控制数据向领导簇头方向传输数据。每个节点将收到的数据和自己的数据进行数据融合处理,然后将融

合后的数据再发送到下一节点。当链中有一个节点死亡时,链就需要重新构建^[9]。

2 改进算法描述

2.1 LEACH 协议存在的问题

(1) 每轮簇头节点个数不确定,簇头个数波动比较大,不满足 LEACH 最优簇头数目。如果产生簇头数较多,由于簇头节点要和基站直接通信,簇头会消耗较多能量;如果产生簇头数较少,普通节点要与远距离簇头通信消耗较多能量。

(2) 在选择簇头时,并没有考虑簇头剩余能量。可能某个节点当选为簇头后,剩余的能量不够本轮的通信使用,导致整个簇失效,丢失簇内成员节点的数据,被监测区域就会出现盲区。

(3) 多个簇头与基站直接通信,特别是当簇头节点位于距离 Sink 较远的时候,传输数据消耗大量的能量,使簇头节点过早死亡,网络总能量消耗过快。

2.2 PEGASIS 协议存在的问题

WSN 通常应用在恶劣的环境中,被监测的区域分布有大量的传感器节点,如果中间有一个节点失效,这次的数据传输就会失效。PEGASIS 协议是形成一条链,数据顺着链向上融合和传输的,虽然节省了能量,但却增加了延迟,从而降低了监控的实时性。

2.3 改进算法介绍

基于 LEACH 协议以上 3 个缺点,结合 PEGASIS 协议中采用贪婪算法成链的思想,并且只有一个节点即领导节点能与基站直接通信。研究表明,建立在簇基础之上的数据融合和多跳路由的方式,可以更好地节约节点能量^[10-11],因此本文提出了一种改进的有效路由协议 LEACH-P。

(1) 由最优簇头数目计算公式(2)及文献[12]仿真结果可知,当传感器节点个数为 100,WSN 区域边长为 100 m,对应簇头个数为 5 时,每轮消耗能量最少,网络生命周期最长。所以本文规定在未出现死亡节点前每轮簇头的数目为 5 个,可以最大地延长 WSN 生命周期。最优簇头数目公式如下:

$$m = \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}} \frac{M}{d_{toBS}^2}} \quad (2)$$

其中, m 表示最优簇头数目; N 表示节点数目; ε_{fs} 表示自由空间信号放大倍数; ε_{mp} 表示多径衰减信道信号放大倍数; M 表示区域边长; d_{toBS} 表示簇头节点到基站的距离。

(2) LEACH 算法中节点是否当选为簇头由公

式(1)决定,并未考虑到节点的剩余能量。在 LEACH 中某节点根据公式(1)当选为簇头,可能其剩余能量很少,已经没有足够能量完成完整一轮通信,从而使整个簇失效,节点数据丢失。改进的算法规定当选为簇头节点的剩余能量要满足能量阈值。能量阈值为完成一轮通信所需的最小能量。簇头完成本轮通信所需的能量值阈值 $E(r)$ 为:广播信息 + 接收簇内成员数据包和确认信息 + 簇头节点向相邻簇头发送信息所需要的能量。

广播范围根据实际节点的功耗而定,在仿真时设定广播范围为区域对角线长度的一半,此长度小于 d_0 ,广播消耗的能量为:

$$ETX \cdot cPL + \varepsilon_{fs} \cdot cPL \cdot DB^2;$$

每个簇头接收簇内成员确认信息和数据包需要能量为:

$$19 \cdot ((ERX + E_{DA}) \cdot PL + ERX \cdot cPL);$$

在每个簇内,簇头需要接收平均有 19 个普通节点的信息。

簇头节点向相邻簇头发送信息所需要的能量为:

$$(ETX + E_{DA}) \cdot PL + \varepsilon_{fs} \cdot PL \cdot DB^2;$$

簇头之间的距离是随机的,设定簇头之间的距离为节点的广播距离。计算得此阈值为 0.004 8 J。

其中, DB 表示传感器节点广播距离/m;其它参数如表 1 所示。

(3) 在 LEACH 路由协议中,每轮平均有 5% 的簇头节点与基站直接进行通信。在 WSN 中簇头节点离基站较远,每次发送数据需要消耗大量能量,使簇头节点过早死亡。本文结合 PEGASIS 协议的成链思想,将 LEACH 算法中簇头节点连接成链^[13],在链中选择剩余能量最大的簇头作为领导节点与基站直接进行通信,其它簇头节点通过数据融合,减少了需要传输的数据量,减少了能量消耗。LEACH-P 采用文献[14]中的无线通信模型,发送传输 k bit 的数据到距离为 d 的接收方所消耗的能量为:

$$E_t(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2 & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\varepsilon_{mp}d^4 & d \geq d_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, E_{elec} 表示发射电路消耗的能量; ε_{fs} 和 ε_{mp} 为功率放大器所消耗的能量; d_0 为常量。节点接收 k bit 的数据所消耗的能量为:

$$E_r(k) = kE_{elec} \quad (4)$$

将 L 个长度为 k bit 的数据包融合所消耗的能量为:

$$E_f(L, k) = LkE_{DA} \quad (5)$$

其中, E_{DA} 表示融合 1 bit 的数据所消耗的能量。

链路性能的优越性在文献[15]中已经阐述并证明过。改进后的算法拓扑结构如图 1 所示,图中相同符号的节点属于同一簇内节点,共有 5 个簇头, 5 种符号,其中一个簇头作为领导簇头,负责与基站的信息交流。

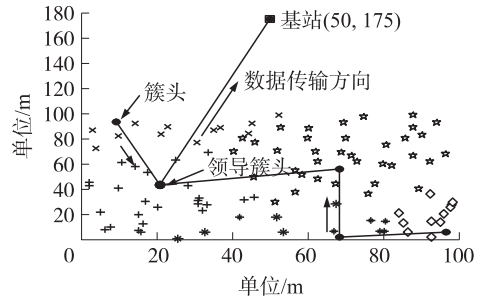


图 1 改进算法拓扑结构示意图

新算法既改进了 LEACH 协议中多簇头节点与基站直接通信,消耗能量多的问题,又克服了 PEGASIS 协议中延时的缺点。在每轮通信中,改进算法仍分为两个阶段:准备阶段和稳定工作阶段。在准备阶段选举簇头时分两种情况:WSN 中出现死亡节点前,每轮簇头数目规定为最优数 5 个;出现死亡节点后,簇头个数按 LEACH 协议中的 5% 概率随机选择,两种情况中当选为簇头的节点剩余能量均大于 $E(r)$ 。簇首节点选出之后,广播自己当选簇首的信号(Advertisement Message, ADV),周围节点收到消息后,根据信号强度,选择所属簇首,然后发送一个请求加入信息,此消息除了包含簇首节点 ID 以及自己的 ID 号以外,还需要包含自己的剩余能量状态。簇建立后,簇头连接成链。在稳定阶段,簇内普通成员根据 TDMA 时隙表向簇头发送信息。簇头接收数据并融合成一个数据包,同时受令牌(Token)控制,使数据包顺着链向领导节点传送,领导节点将接收到的数据融合成一个数据包发送给基站。整个算法流程如图 2 所示。

3 仿真结果

本文利用 MATLAB 软件对改进算法与 LEACH 算法和 PEGASIS 算法进行了仿真比较,分别从网络生存周期和数据传输时延两方面考虑,评价改进算法的性能。在传感区域为 100 m × 100 m 的空间内有 100 个传感器节点,LEACH 协议中假设节点不知其地理位置,且节点随机分布。本文采用 LEACH 协议中原有的参数来仿真改进前后的 LEACH 协议。具体参数^[12]如表 1 所示。

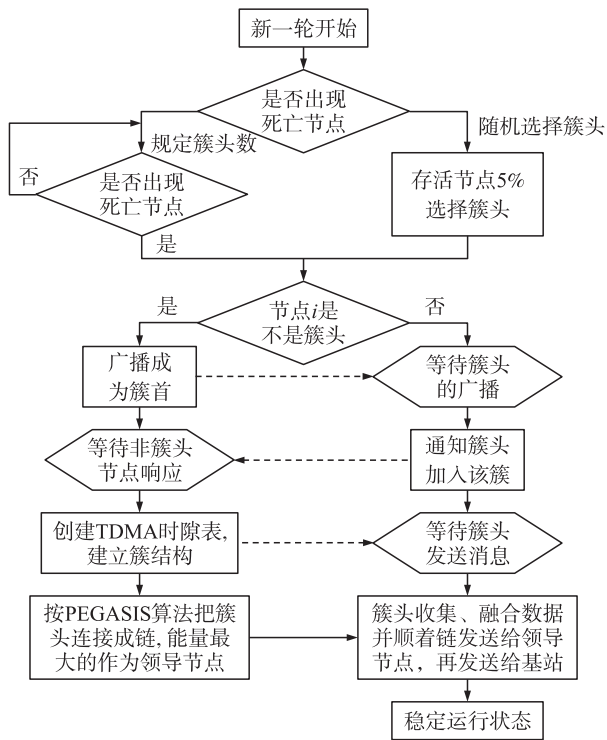


图 2 改进后的算法流程图

表 1 仿真所用参数值

参数设置	参数值
基站位置	(50, 175)
传感区域	100 × 100
节点总数 (N)	100
节点初始能量 (E_0)/J	0.5
数据包长度 (PL)/bit	4 000
控制包长度 (cPL)/bit	200
发送射频电路能耗 (ETX)/nJ	50
接收射频电路能耗 (ERX)/nJ	50
数据融合消耗能量 (E_{DA})/nJ	5
自由空间信号放大倍数 (E_{fs})/pJ/bit·m ⁻²	10
多径衰减信道信号放大倍数 (E_{mp})/pJ/bit·m ⁻⁴	0.001 3

改进的协议以延长网络存活时间、平衡所有节点总的能量消耗为主要设计目标。定义网络开始运行到出现指定死亡节点的轮数为 WSN 的生存期。文中对 LEACH 协议和改进后协议的 1% 节点, 20% 节点, 50% 节点死亡的生命周期进行了比较, 结果如表 2 所示。由表 2 可知: 改进后协议的生存期比 LEACH 协议的生存期提高 117%, 20% 和 50% 死亡节点的轮数也得到了改善。由于 WSN 中传感器节点随机分布, 单次生命周期计算起伏较大, 所以表 2 中的数据是进行 100 次循环得到的统计平均值。

表 2 两种算法生命周期比较结果

死亡节点数	LEACH	LEACH-P
1%	639.19	751.40
20%	715.33	847.66
50%	788.35	919.33
100%	1 296.54	1 276.23

图 3 是改进协议和 LEACH 协议生命周期的另一种比较表达方式, 由仿真结果得: LEACH 协议第一个节点和全部节点死亡分别出现在 639 轮和 1 240 轮左右, 改进后协议第一个和全部节点死亡分别出现在 751 轮和 1 300 轮左右。其中图 3 的下半部分也显示了新算法运行过程中簇头数目变化情况。从表 2 和图 3 可以看出: 改进算法的生命周期比 LEACH 协议有所提高; 改进后的协议将能量消耗更加均匀的分配到每个传感器节点, 有效的延长了 WSN 的生存期。

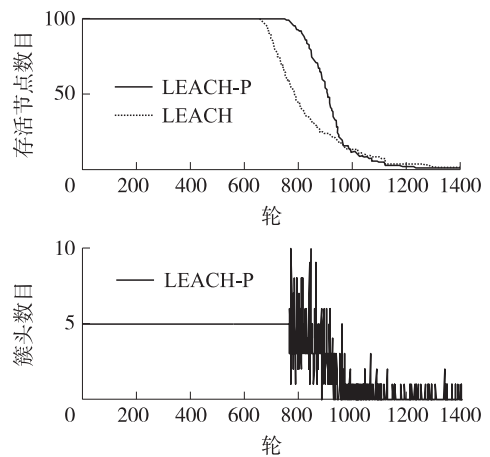


图 3 改进协议和 LEACH 对应的轮数和存活节点关系

由于 WSN 一般部署在环境恶劣的区域, 基站位置离 WSN 区域较远。基站位置的远近对传感网络的生命期有很大的影响, LEACH-P 的簇头之间采用多跳方式传输数据到达基站, 所以基站与监测区域之间的距离的增加对网络寿命的影响不大, 而在 LEACH 协议中, 基站与监测距离过大, 就会导致一些簇头节点能量过快的损耗, 从而影响了网络的寿命。图 4 是根据基站与 WSN 区域之间的距离变化, 分别计算 LEACH 算法和 LEACH-P 算法的网络生存期(基站的横坐标不变, 纵坐标从 100 ~ 400 变化)。从图 4 可知: ①基站纵坐标由 100 ~ 250 变化时, 采用 LEACH-P 算法 WSN 的生存期均是 760 轮左右, 对 WSN 的生命周期影响不大, 而采用 LEACH 算法时 WSN 的生存期从 737 轮减少到 328 轮, 基站的远近对 WSN 的生命周期有很大的影响; ②基站纵

坐标由 250 ~ 400 变化时, 采用 LEACH-P 算法和 LEACH 算法, WSN 的生存期都有所减少, 但采用 LEACH-P 算法时, WSN 生存期减少得更加缓慢。

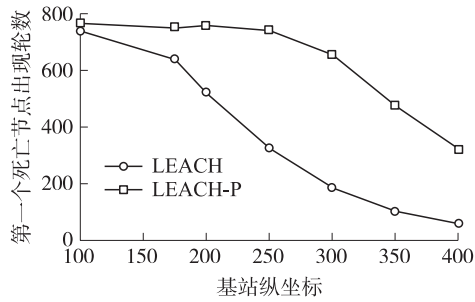


图 4 基站位置与第一个死亡节点轮数的关系

图 5 是基站位置为 (50, 300) 时 LEACH 算法和 LEACH-P 算法网络存活节点比较图。此时, LEACH 算法第一个死亡节点为 187 轮, LEACH-P 算法第一个死亡节点为 658, 改进的算法比 LEACH 提高 351%。由图 3 和图 5 可知, 随着基站远离被监测区域, 改进算法能量消耗更好地平均分布在每个传感器节点上, 而 LEACH 算法能量消耗很不均匀, 体现出簇头成链的优越性, 使得整个无线传感网络能量消耗更加均匀。

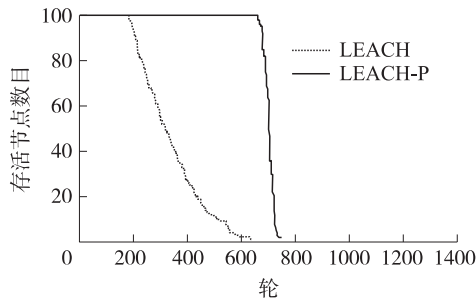


图 5 基站位置为 (50, 300) 时两种算法性能比较

改进后的协议另一个显著优点是既克服了 PEGASIS 协议中延时长的问题, 又继承了它贪婪成链的思想。本文通过计算 LEACH、PEGASIS 和改进后的协议每轮通信数据所需传输的最远距离来证明时延的改进情况。

LEACH 协议传输数据时, 所有节点按照 TDMA 时隙向簇头发送数据。簇头将数据融合之后发送给基站。完成一轮通信的最长的数据传输距离为: 普通节点到簇头与簇头到基站之间距离总和的最大值。

PEGASIS 协议采用令牌机制传输数据。在一条链中只有一个令牌, 令牌需要经过整条链。完成一轮通信的最长的数据传输距离为整条链的长度与领导节点到基站之间距离的总和。

改进后的协议既采用 TDMA 传输机制, 又采用令牌传输机制。在每个簇内, 簇头给普通节点分配

TDMA 时隙, 将数据传给簇头。在簇头间, 采用 PEGASIS 链条思想将簇头连接起来, 然后使用令牌数据传输机制将数据传输给领导节点, 领导节点融合数据并发送给基站。完成一轮通信的最长的数据传输距离为: 链两端簇内普通节点到簇头最远距离、链条长度与领导节点到基站距离的三者总和。

由于传感器节点是随机分布在被检测区域, 并且每轮通信中簇头位置以及链条连接情况都不一样。因此, 每种协议循环计算 100 次从而得到计算传感网络未出现死亡节点时的距离平均值。

在 PEGASIS 算法中, 不同轮数节点分布位置不同, 链条的长度不同, 所以求得平均值起伏较大。对图 6 中的仿真数据求平均值得到 PEGASIS、LEACH、改进算法 (LEACH-P) 完成一轮通信的最远距离平均值分别为: 1026.7 m、209.9 m、357.33 m。改进后的算法把簇头连接成链, 实时性略低于 LEACH, 但和 PEGASIS 协议相比有 290% 提高。

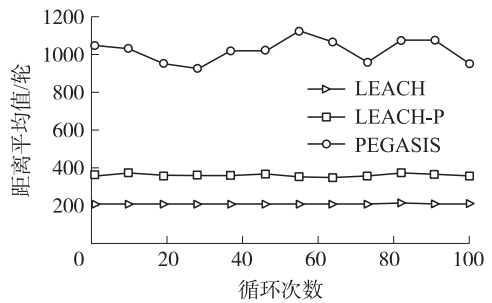


图 6 三种协议延时比较

4 结论

改进的 LEACH-P 算法综合了 LEACH 算法和 PEGASIS 算法的优点, 既改善了 LEACH 算法在大规模传感器网络中簇头节点能量消耗过大的问题, 同时也克服了 PEGASIS 算法在大规模传感器网络中实时性差的问题。采用 PEGASIS 成链的贪婪算法, 把簇头连接成链, 并规定簇头最优数目为 5 个, 从而减少了簇头与基站直接通信消耗的能量。仿真结果表明, 该算法更适用于大规模的无线传感器网络, 并使网络整体性能更加健壮。

参考文献:

- [1] Ren Feng-yuan, Huang Hai-ning, Lin Chuang. Wireless Sensor Network[J]. Journal of Software, 2003, 4(7): 1282 - 1291.
- [2] Lan F AKyildiz, Su Weilian, Yogesh Sankarasubramaniam, et al. A Survey on Sensor Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102 - 114.
- [3] 李晓维, 徐勇军, 任丰原. 无线传感器网络技术 [M]. 第 1 版, 北京: 北京工业大学出版社, 2007: 1 - 17.

- [4] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, Hari Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Computer Society, 2000(8): 30-47.
- [5] 胡钢, 谢冬梅, 吴元忠. 无线传感器网络路由协议 LEACH 的研究与改进[J]. 传感技术学报, 2007, 20(6): 1391-1396.
- [6] 庄雄, 杨永明, 丁唯, 等. 一种消除无线传感器网络簇间干扰的 TDMA 协议及实现[J]. 传感技术学报, 2009, 22(8): 1186-1192.
- [7] Stephanie Lindsey, Cauligi S, Raghavendra. PEGASIS: Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems[J]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002, 3(3): 1125-1130.
- [8] 孙献璞, 张艳玲, 李建东. 无线动态令牌协议及性能分析[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2039-2043.
- [9] Jung Sung-Min, Han Young-Ju, Chung Tai-Myoung. The Concentric Clustering Scheme for Efficient Energy Consumption in the PEGASIS[C]//Proceeding of 9th International Conference on Advanced Communication Technology, 2007: 260-265.
- [10] Katayoun Sohrabi, Jay Gao, Vishal Ailawadhi, Gregory J Pottie. Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 16-27.
- [11] 王国芳, 李腊元. 基于 LEACH 和 PEGASIS 的节能可靠路由协议研究[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(11): 115-127.
- [12] Wendi Beth Heinzelman. Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks[D]. (PhD). Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [13] 姜华, 郑春雷, 刘海涛. 无线传感网络中链路级能量有效策略的研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(6): 2738-2742.
- [14] ISO. 16484-5, Building Automation and Control Systems Part 5 Data Communication Protocol[S]. 2003.
- [15] Stephanie Lindsey, Cauligi Raghavendra, Krishna M Sivalingam. Data Gathering Algorithms in Sensor Networks Using Energy Metrics[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2002, 13(9): 924-935.



张震(1984-),男,汉族,湖北孝感人,硕士研究生,西南交通大学信息科学与技术学院通信与信息系统专业。主要从事无线传感器网络,光纤传感技术,光通信的研究, zz7219037@126.com;



闫连山(1971-),男,汉族,西南交通大学特聘教授,博士生导师。分别于浙江大学和南加州大学获得学士和博士学位。2005-2007年在美国通用光电公司担任首席科学家(Chief Scientist)。发表论文140多篇,SCI收录66篇,EI收录110篇,三篇国际杂志特邀综述文章和近10篇会议特邀报告,英文著作一章,7项美国专利和1项中国专利,论文被他人引用500多次(包括SCI他引271次)。IEEE高级会员,IEEE Photonics Journal副编辑,十多种SCI杂志的审稿专家,两种国际杂志编委会委员,Associate Vice President of IEEE Photonics Society,多个国际会议的共同主席或分主题委员,曾获得IEEE/LEOS优秀博士生奖。