ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.17, No.7, July 2006, pp.1588−1600
DOI: 10.1360/jos171588
© 2006 by *Journal of Software*. All rights reserved.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

无线传感器网络分簇路由协议*

沈 波+, 张世永, 钟亦平

(复旦大学 计算机与信息技术系,上海 200433)

Cluster-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks

SHEN Bo+, ZHANG Shi-Yong, ZHONG Yi-Ping

(Department of Computing and Information Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-21-65643235, E-mail: 042021165@fudan.edu.cn, http://www.fudan.edu.cn

Shen B, Zhang SY, Zhong YP. Cluster-Based routing protocols for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2006,17(7):1588−1600. http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1588.htm

Abstract: Routing technology at the network layer is pivotal in the architecture of wireless sensor networks. As an active branch of routing technology, cluster-based routing protocols excel in network topology management, energy minimization, data aggregation and so on. In this paper, cluster-based routing mechanisms for wireless sensor networks are analyzed. Cluster head selection, cluster formation and data transmission are three key techniques in cluster-based routing protocols. As viewed from the three techniques, recent representative cluster-based routing protocols are presented, and their characteristics and application areas are compared. Finally, the future research issues in this area are pointed out.

Key words: wireless sensor network; cluster-based routing protocol; cluster; cluster head

摘 要: 在无线传感器网络体系结构中,网络层的路由技术至关重要.分簇路由具有拓扑管理方便、能量利用高效、数据融合简单等优点,成为当前重点研究的路由技术.分析了无线传感器网络分簇路由机制,着重从簇头的产生、簇的形成和簇的路由角度系统地描述了当前典型的分簇路由算法,并比较和分析了这些算法的特点和适用情况.最后结合该领域当前研究现状,指出分簇路由算法未来的研究重点.

关键词: 无线传感器网络;分簇路由协议;簇;簇头
中图法分类号: TP393 文献标识码: A

作为一种新的信息获取方式和处理模式,无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)[1]目前已成为国内外备受关注的研究热点.

作为一种典型的普适计算(pervasive computing)应用,WSN 通过大量部署在监测区域内的传感器节点,采集网络覆盖区域内感知对象的信息,通过多跳的无线通信方式,将收集、处理后的信息提供给终端用户.WSN 不需要固定的网络支持,具有快速展开、抗毁性强等特点,可广泛应用于军事侦察、环境监测、医疗监护、农业养殖和其他商业领域,以及空间探索和灾难抢险等特殊领域[2,3].

* Received 2005-12-20; Accepted 2006-02-23

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

1 WSN 分簇路由协议概述

在 WSN 体系结构中,网络层的路由技术对 WSN 的性能好坏有着重要影响.随着国内外 WSN 的研究发展,许多路由协议被提了出来,从网络拓扑结构的角度我们可以大体把它们分为两类:平面路由协议和分簇路由协议.

在平面路由协议中,所有网络节点的地位是平等的,不存在等级和层次差异.它们通过相互之间的局部操作和信息反馈来生成路由.在这类协议中,目的节点(sink)向监测区域的节点(source)发出查询命令,监测区域内的节点收到查询命令后,向目的节点发送监测数据.平面路由的优点是简单、易扩展,无须进行任何结构维护工作,所有网络节点的地位平等,不易产生瓶颈效应,因此具有较好的健壮性.典型的平面路由算法有 DD(directed diffusion)[4],SAR(sequential assignment routing)[5],SPIN(sensor protocols for information via negotiation)[6],Romor Routing[7]等.平面路由的最大缺点在于:网络中无管理节点,缺乏对通信资源的优化管理,自组织协同工作算法复杂,对网络动态变化的反应速度较慢等[8].

在分簇路由协议中,网络通常被划分为簇(cluster).所谓簇,就是具有某种关联的网络节点集合.每个簇由一个簇头(cluster head)和多个簇内成员(cluster member)组成,低一级网络的簇头是高一级网络中的簇内成员,由最高层的簇头与基站 BS(base station)通信(如图 1 所示).这类算法将整个网络划分为相连的区域.

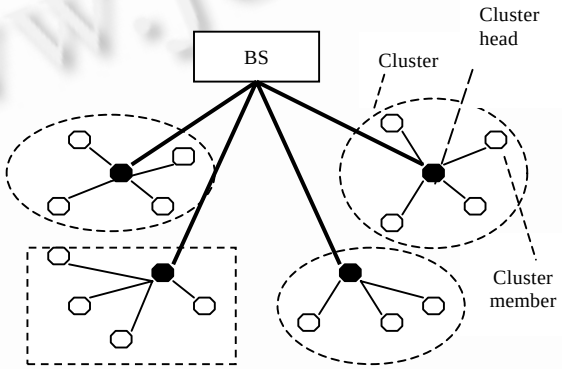

Fig.1 Topological architecture of cluster-based routing protocols

图 1 分簇路由协议拓扑结构

在分簇的拓扑管理机制下,网络中的节点可以划分为簇头节点和成员节点两类.在每个簇内,根据一定的机制算法选取某个节点作为簇头,用于管理或控制整个簇内成员节点,协调成员节点之间的工作,负责簇内信息的收集和数据的融合处理以及簇间转发.

分簇路由机制具有以下几个优点[9,10]:

(1) 成员节点大部分时间可以关闭通信模块,由簇头构成一个更上一层的连通网络来负责数据的长距离路由转发.这样既保证了原有覆盖范围内的数据通信,也在很大程度上节省了网络能量;

(2) 簇头融合了成员节点的数据之后再进行转发,减少了数据通信量,从而节省了网络能量;

(3) 成员节点的功能比较简单,无须维护复杂的路由信息.这大大减少了网络中路由控制信息的数量,减少了通信量;

(4) 分簇拓扑结构便于管理,有利于分布式算法的应用,可以对系统变化作出快速反应,具有较好的可扩展性,适合大规模网络;

(5) 与平面路由相比,更容易克服传感器节点移动带来的问题.

2 WSN 分簇路由协议解析

学术界对 Ad hoc 网络的研究比 WSN 要早,目前已有很多针对 Ad hoc 网络的分簇路由协议被提了出来.然

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

而,由于 WSN 特性不同于 Ad hoc 网络,特别是 WSN 节点能量更为有限,因此,针对 WSN 的特性,必须研究新的分簇算法.LEACH(low-energy adaptive clustering hierarchy)[11]是 WSN 中最早提出的分簇路由协议.它的成簇思想贯穿于其后发展出的很多分簇路由协议中,如 TEEN(threshold sensitive energy efficient sensor network protocol)[12],HEED(hybrid energy-efficient distributed clustering)[13]等.当然,还有很多分簇路由协议是独立开发的,如 ACE(algorithm for cluster establishment)[14],LSCP(lightweight sensing and communication protocols)[15]等.

LEACH 的基本思想是:通过等概率地随机循环选择簇头,将整个网络的能量负载平均分配到每个传感器节点,从而达到降低网络能量耗费、延长网络生命周期的目的.LEACH 的执行过程是周期性的,每轮循环的基本过程是:在簇的建立阶段,每个节点选取一个介于 0 和 1 之间的随机数,如果这个数小于某个阈值,该节点成为簇头.然后,簇头向所有节点广播自己成为簇头的消息.每个节点根据接收到广播信号的强弱来决定加入哪个簇,并回复该簇簇头.在数据传输阶段,簇内的所有节点按照 TDMA(时分复用)时隙向簇头发送数据.簇头将数据融合之后把结果发给基站.在持续工作一段时间之后,网络重新进入启动阶段,进行下一轮的簇头选取并重新建立簇.

从 LEACH 算法的执行过程我们可以发现,每轮循环大致包括以下几个阶段:(1) 簇头的产生;(2) 簇的形成;(3) 簇的路由.其实,无论是基于 LEACH 成簇思想衍变而来的分簇算法,还是独立开发而来的分簇协议,其分簇路由协议设计都大致包括以上 3 个阶段.

簇头的产生是簇形成的基础,簇的路由即簇的数据传输依赖于簇的结构.它们是 WSN 分簇路由协议设计的关键技术,三者紧密相关,却也相对独立.在簇头产生之后,可以采取不同的分簇策略,同样的簇也可以采用不同的数据传输机制.所有的 WSN 分簇算法都是围绕如何选择簇头、如何成簇、如何传输数据来考虑设计的.据此,国内外不少研究人员提出了许多优秀的算法和协议.其中,有些协议设计了一套从簇头选择到数据传输完整的算法,有些协议只是针对其中一个阶段提出了自己的算法,但无论哪个阶段的何种协议,如何节省能量和延长网络生命周期都是必须考虑的核心问题.下面就我们目前 WSN 主要的分簇路由协议,从分簇路由协议设计的 3 个关键技术,分别论述每个阶段多种不同的实现算法,并分析其适用情况和优缺点,希望能对今后的研究起到一定的引导和推动作用.

3 簇头产生算法

簇头的产生是簇形成的基础.分簇路由算法的第一步就是考虑怎样产生簇头.在一些协议中,比如 max-min zP_{min}[16],ECMR(energy-conscious message routing)[17],簇头是被预先指定部署的,且假设它们的能量并不受限.这与一般的 WSN 情况不同,大多数分簇路由协议是让资源受限的传感器节点承担簇头的任务.为了延长网络的生命周期,簇头需要周期性地更新.簇头的产生方法、数量和位置决定了最终形成的簇的结构、大小和数量,也影响了节点的能量耗费进度和网络的生命周期.目前的簇头选择算法一般基于以下一些准则:(1) 节点的剩余能量;(2) 簇头到基站的距离;(3) 簇头的位置分布,包括簇头的连通度和覆盖度;(4) 簇内通信代价.

根据簇头产生方式的不同,可以把簇头产生算法分为分布式和集中式两种.分布式算法包括两类:一类是由节点根据某个阈值自主决定是否当选簇头,如 LEACH[11];另一类是通过节点之间的信息交互动态产生簇头,如 HEED[13].集中式算法是指由基站基于整个网络信息挑选簇头,如 LEACH-C(LEACH-centralized)[18].下面详细介绍各种簇头产生算法.

3.1 LEACH[11]及DCHS[19]

每个节点产生一个 0~1 之间的随机数,如果这个数小于阈值 $T(n)$,则该节点向周围节点广播它是簇头的消息.$T(n)$的计算公式为

$$T(n)=\begin{cases}\dfrac{p}{1-p\times[r\bmod(1/p)]}, & n\in G\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{1}$$

其中:P 是簇头占所有节点的百分比,即节点当选簇头的概率;r 是目前循环进行的轮数;G 是最近 $1/P$ 轮中还未当选过簇头的节点集合.从 $T(n)$我们可以看出,当选过簇头的节点在接下来的 $1/P$ 轮循环中将不能成为簇头,剩余

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

节点当选簇头的阈值 $T(n)$增大,节点产生小于 $T(n)$的随机数的概率随之增大,所以节点当选簇头的概率增大.

P 值决定了每轮产生的簇头数量,在实际应用中,最佳 P 值的确定是十分困难的,这与网络规模和节点密度有关.另外,$T(n)$没有考虑能量因素,这种算法必须基于两个前提假设才能达到每个节点平均耗费能量的预期目标:(1) 每个节点初始能量均等;(2) 每个节点担任簇头期间耗费的能量均等.然而,由于每个簇的大小以及簇头到基站的距离不一样,前提假设(2)不符合现实.

针对 LEACH 中 $T(n)$计算公式(1)的不足,DCHS(deterministic cluster-head selection)将能量因素考虑进来,改进了 $T(n)$的计算方法.

$$T(n)_{new}=\frac{P}{1-P[r\bmod(1/P)]}\frac{E_{n_current}}{E_{n_\max}} \tag{2}$$

$E_{n_current}$ 表示节点的当前能量,$E_{n_\max}$ 表示节点的初始.公式(2)的改进,使能量消耗比例较低的节点优先当选簇头.实验结果表明,该节点选取算法能在 LEACH 基础上有效提高网络生命周期 20%~30%.然而,公式(2)的这种改进还有一个缺陷:当网络运行了相当长一段时间之后,所有节点的当前能量 $E_{n_current}$ 都变得很低,那么阈值 $T(n)$就会变小,所有节点成为簇头的概率都大大降低,每轮当选的簇头数量减少,最终导致网络能量耗费不均衡,网络生命周期缩短.为此,DCHS 再次改进了 $T(n)$的计算方法

$$T(n)_{new}=\frac{p}{1-P[r\bmod(1/P)]}\left[\frac{E_{n_current}}{E_{n_\max}}+\left(r_s div\frac{1}{p}\right)\left(1-\frac{E_{n_current}}{E_{n_\max}}\right)\right] \tag{3}$$

r_s 表示节点连续未当选过簇头的轮次.一旦当选了簇头,r_s 重置为 0.公式(3)的改进有效地解决了公式(2)的缺陷,综合考虑了节点能量和阈值大小对簇头选取的影响,使算法更公平合理.

3.2 LEACH-C[18]和LEACH-F[18]

LEACH-C(LEACH-centralized)和 LEACH-F(LEACH-fixed)都是集中式的簇头产生算法,由基站负责挑选簇头.

LEACH 是由每个节点根据随机数自主决定是否当选簇头,每轮产生的簇头没有确定的数量和位置.LEACH-C 根据全局信息挑选簇头,可以有效解决 LEACH 的这一不足.每个节点把自身地理位置和当前能量报告给基站.基站根据所有节点的报告计算平均能量,当前能量低于平均能量的节点不能成为候选簇头.从剩余候选节点中选出合适数量和最优地理位置的簇头集合是一个 NP 问题.基站根据所有成员节点到簇头的距离平方和最小的原则,采用模拟退火(simulated annealing)算法[20]解决该 NP 问题.最后,基站把簇头集合和簇的结构广播出去.

LEACH-F 也是在 LEACH 基础上做了一些改变.簇的形成与 LEACH-C 一样,也是基站采用模拟退火算法生成簇.同时,基站为每个簇生成一个簇头列表,指示簇内节点轮流当选簇头的顺序.一旦簇形成之后,簇的结构就不再改变,簇内节点根据簇头列表依次成为簇头.与 LEACH 和 LEACH-C 相比,LEACH-F 最大的优点就是无须每轮循环都构造簇,减少了构造簇的开销.但是,LEACH-F 并不适合真实的网络应用,因为它不能动态处理节点的加入、失败和移动.同时,它还增加了簇间的信号干扰.

3.3 DAEA[21]

DAEA(data aggregation-exact and approximate)是 3 层的分簇协议.簇是依地理位置事先划分成的大小相等、相邻且不重叠的正方形区域.基于这种结构,为了最大程度地节省能量和融合数据,DAEA 提出为每个簇选择簇头(即局部汇聚点 LA(local aggregation))和从 LA 中选择上层簇头(即主汇聚点 MA(master aggregation)).选择 LA 是基于节点的能量和节点已当选过簇头的次数.从 LA 集合中选取最优的 MA,由 MA 负责转发数据到基站,从而最大化网络生命周期,是一个 NP 完全问题.DAEA 采用 ILP(integer linear program,整数线性优化)技术求解,目标是最小化

$$\alpha\times\sigma+\beta\times\rho \tag{4}$$

其中:σ是每个 LA 耗费的能量;ρ是选出的 MA 个数,α,β是两个平衡因子.同时,DAEA 还提出 MA 的最大个数限

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

制、MA 转发数据到基站的能量限制等 9 个约束条件,采用 ILP 算法求解.此外,对于从 LA 中选择 MA,DAEA 还提出了 3 种次优的解决方法:遗传算法、*k*-means 算法和贪婪算法.

DAEA 提出的这种 3 层簇头数据融合结构是能量与延迟之间的折衷,分层的增加可以节省能量,但增加了延迟.DAEA 适用于中小型网络.

3.4 HEED[13]

HEED(hybrid energy-efficient distributed clustering)指出:延长生命周期、可扩展性和负载平衡是 WSN 中 3 个最重要的需求,并通过将能量消耗平均分布到整个网络来延长网络的生命周期.

簇头的选择主要依据主、次两个参数.主参数依赖于剩余能量,用于随机选取初始簇头集合.具有较多剩余能量的节点将有较大的概率暂时成为簇头,而最终该节点是否一定是簇头取决于剩余能量是否比周围节点多得多,即迭代过程是否比周围节点收敛得快;次参数依赖于簇内通信代价,用于确定落在多个簇范围内的节点最终属于哪个簇,以及平衡簇头之间的负载.考虑到分簇后簇内的通信开销,HEED 以 AMRP(簇内平均可达能量)作为衡量簇内通信代价的标准.

HEED 的簇头选择算法具有以下特点:完全分布式的簇头产生方式;簇头产生在有限次迭代内完成;最小化控制报文开销;簇头分布均衡.HEED 的主要改进是:在簇头选择中考虑了节点的剩余能量,并以主从关系引入了多个约束条件作用于簇头的选择过程.HEED 在簇头选择标准以及簇头竞争机制上都与 LEACH 不同.实验结果表明,HEED 分簇速度更快,能产生更加分布均匀的簇头、更合理的网络拓扑.

3.5 CEFL[22]

CEFL(cluster-head election using fuzzy logic)采用 Mamdani 模糊逻辑方法选择簇头.CEFL 的输入变量是节点能量、节点密集度和节点向心性.节点密集度是指节点所在位置周围节点的密度,节点向心性是指节点靠近簇的中心程度,用该节点到簇内其他节点的距离平方和来度量.节点能量和节点密集度被安排成 3 种等级的隶属度:*high*,*medium*,*low*;节点向心性也被安排成 3 种等级的隶属度:*close*,*adequate*,*far*;模糊输出集合包括 7 种结果:*very small*,*small*,*rather small*,*medium*,*rather large*,*large*,*very large*,表示节点当选簇头的可能性.CEFL 采用重心法(center of gravity)进行解模糊判决,从模糊输出隶属函数中找出一个最能代表模糊集合的精确量.该算法适合中等规模网络.实验结果表明,该簇头选择算法比 LEACH 更能延长网络生命周期.

4 簇的形成算法

簇头产生之后,簇头广播当选的消息到周围节点,周围节点根据接收到的簇头广播信号的强弱决定加入哪个簇.这是 LEACH 等大多数协议常用的簇的形成方法.这种方法实现机制比较简单,但没有从能量角度考虑簇的规模、数量以及负载均衡等问题.有不少算法从这些问题出发提出了不同的成簇方法.

Ghiasi 等人[23]把成簇算法归纳成:挑选 k 个簇头,把 n 个节点分成$(S_1,S_2,\ldots,S_k)k$ 个簇,使得:

(1) 每个节点属于且仅属于一个簇.

(2) 簇头之间负载平衡,即

$$\frac{1}{k}-\gamma \le \frac{S_i}{n} \le \frac{1}{k}+\delta, \qquad i=1,\ldots,k \tag{5}$$

δ是不平衡因子,依赖于簇头之间的实际负载能力差异.为了均匀耗费网络能量,我们的目标是追求簇头之间的负载平衡,即δ=0.

(3) 簇的能量消耗总和最小,即

$$C_i=\sum_{x\subset S_i} f(x,a_i) \tag{6}$$

a_i 是簇 S_i 的簇头,x 是簇中成员节点,函数 f 是簇头与成员节点之间的通信代价.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4.1 ACMWN[24]

ACMWN(adaptive clustering for mobile wireless networks)协议是针对 Ad hoc 网络提出的一种基于节点 ID 的分簇算法.由于 ACMWN 仅根据节点的 ID 来分簇,并没有考虑节点的能量耗费问题,不适用能量受限的 WSN.但它的成簇思想却可以借鉴到 WSN 分簇路由设计中,比如将分簇的原则从节点的 ID 转变为节点的能量,该分簇算法就可以应用到 WSN 中.

ACMWN 具体算法是,在每个节点独立运行分簇算法.ID 比周围邻居低的节点优先成为簇头,之后广播当选簇头消息,收到该消息的邻居节点加入簇内,然后广播它已加入簇的消息.其余未成簇的节点再根据周围剩余节点 ID 大小产生簇头,广播当选簇头消息,…,如此类推,直到所有节点已经成簇.

该算法的特点是:(1) 簇内节点之间最多两跳距离;(2) 在成簇过程中,每个节点只广播一条消息;(3) 根据局部节点 ID 从小到大依次成簇(当且仅当 ID 比它小的邻居节点已经成簇之后,节点才会成簇);(4) 算法时间复杂度为 $O(N)$,N 为节点个数.

除了基于节点 ID 之外,基于节点最大连通性的成簇算法也被提了出来[25].具有较多未成簇的邻居节点的节点具有较高的连通性.与基于 ID 的成簇算法相似,节点根据节点的连通性从高到低依次成簇.两种算法形成的簇都具有以下特点: (1) 没有任何两个簇头相邻;(2) 簇内任何两个节点最多两跳距离.

4.2 PEGASIS[26]

实际上,PEGASIS(power-efficient gathering in sensor information systems)并不是严格意义上的分簇路由协议,但它借鉴了 LEACH 中分簇算法的思想.PEGASIS 中的簇就是一条基于地理位置的链.其成簇的基本思想是,假设所有节点都是静止的,根据节点的地理位置形成一条相邻节点之间距离最短的链.这类似于旅行商问题,是一个经典的 NP 问题.算法假设节点通过定位装置或者通过发送能量递减的测试信号来发现距自己最近的邻居节点,然后从距基站最远的节点开始,采用贪婪算法来构造整条链.与 LEACH 算法相比,PEGASIS 中通信只限于相邻节点之间.这样,每个节点都以最小功率发送数据,并且每轮只随机选择一个簇头与基站通信,减少了数据通信量.实验结果表明,PEGASIS 支持的 WSN 的生命周期是 LEACH 的近两倍.

4.3 ACE[14]

ACE(algorithm for cluster establishment)是一种具有良好反馈机制的自适应分布式成簇算法.簇的形成包括簇的产生和簇的迁移两个逻辑部分.基于相邻节点之间的信息反馈,每个节点独立运行 ACE 算法,最终由两个逻辑部分交叉迭代形成簇.

算法运行过程中,ACE 把节点分为 3 种状态:unclustered,clustered 和 cluster-head.unclustered 节点未加入任何簇,clustered 节点已经成为一个或多个簇的成员,cluster-head 节点已经成为簇头.每轮迭代周期到来,节点依状态不同运行不同的迭代算法.

如果 A 是 unclustered 节点,它计算假如它成为簇头,邻居节点中忠诚节点(忠诚节点是指那些只属于一个簇的节点)的个数 L,如果 $L\geq f_{\min}(t)$,则 A 成为簇头,然后选择一个随机数作为簇 ID,广播 RECRUIT 消息,收到该消息的节点加入 A 簇.$f_{\min}(t)$是一个成簇限制函数,随着协议运行时间 t 的增加,$f_{\min}$ 会减小.这样有利于一开始形成拓扑比较合理的簇,而后降低成簇的阈值,使未被覆盖的节点较为容易地形成簇.

如果 A 是 cluster-head 节点,它从整个簇内找出最佳候选簇头 B(最佳候选簇头是指拥有最多忠诚节点的节点),B 的忠诚节点包括 B 邻居节点中 unclustered 的节点以及只属于 A 簇的成员节点.如果 B 就是 A 本身,则本轮迭代终止,簇结构不变;如果 B 是其他节点,则开始运行迁移算法:A 向 B 发出 PROMOTE 消息,B 收到后用 A 簇 ID 广播 RECRUIT 消息,收到该消息的所有节点加入 B 簇.A 收到 B 的 RECRUIT 消息之后广播 ABDICATE 消息.这样,原来 A 簇的节点如果是 B 的邻居节点,则从 A 迁移到了 B;不是 B 的邻居节点,则退出了该簇.由此完成了从 A 到 B 的簇的迁移.

如果 A 是 clustered 节点,则它什么都不做,等待它的下一个迭代周期.

当所有节点都完成迭代算法之后,有可能少量节点没有被覆盖,所以最后还需要进行一次“clean-up”迭代,

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

该过程不再发生簇的迁移,所有未被覆盖的节点成为簇头或者通过邻居节点成为其他簇的多跳成员节点.

ACE 算法具有良好的健壮性,对节点失效和报文丢失反应迅速,生成的簇能有效减少相互之间的重叠,降低簇间通信干扰的概率,并且成簇收敛速度与网络规模无关.

4.4 HYENAS[27]

HYENAS(hybrid energy-aware sensor network)中簇头的产生基本上与 LEACH-C 一样,都是由基站采用集中式算法生成.但不像 LEACH,ACE 等算法,每轮循环都需要重新分簇,HYENAS 中簇的结构并非每次循环都会改变.簇是否需要重组,取决于簇的相似度,相似度的判断是一个机器学习过程.具体过程是:

在 HYENAS 采用 CBR(case-based reasoning)技术来生成适当数目的簇的同时,生成了一个名叫 blacklist 的列表.每轮循环,如果哪个簇耗费的平均能量大于整个网络耗费的平均能量阈值的 2 倍,blacklist 就把这些簇当作坏簇,记录下它们的信息:(1) 簇内节点数目;(2) 簇头到每个成员节点的距离平方和;(3) 簇头到基站的距离;(4) 簇内每个节点耗费的平均能量.每轮循环,协议采用 k-NN 算法依次计算每个簇与 blacklist 中坏簇的相似度:如果相似度大于某个阈值,基站采用集中式算法重新选择簇头,进行分簇;如果相似度不大,簇结构无须改变,基站只需重新为该簇选择簇头.为了避免 k-NN 算法逐次比较,加快算法的收敛性,HYENAS 提出采用松弛算法来代替计算簇的相似度.

HYENAS 避免了簇的每次重组,节省了每轮成簇的开销,但需对节点的移动特别处理.

4.5 EECS[28]

如前所述,LEACH 等算法中节点根据自身通信代价最小原则选择加入哪个簇,不能保证簇的负载平衡,没有考虑距基站较远的簇头能量耗费过快等问题.针对这一点,EECS(energy efficient clustering scheme)提出一个新的通信代价公式(7)来决定节点加入哪个簇:

$$cost(j,i)=w\times f(d(P_j,CH_i))+(1-w)\times g(d(CH_i,BS)) \tag{7}$$

$$f=\frac{d(P_j,CH_i)}{d_{f_\max}},\qquad g=\frac{d(CH_i,BS)-d_{g_\min}}{d_{g_\max}-d_{g_\min}} \tag{8}$$

公式(8)中:$d_{f_\max}=EX(\max\{d(P_j,CH_i)\})$;$d_{g_\max}=\max\{d(CH_i,BS)\}$;$d_{g_\min}=\min\{d(CH_i,BS)\}$.

$cost(j,i)$是节点 P_j 加入簇头 i 的代价;$d(P_j,CH_i)$是节点到簇头的距离,式(8)中 f 子函数保证最小化节点与簇头之间的通信代价;$d(CH_i,BS)$是簇头 i 到基站的距离,式(8)中 g 子函数保证最小化簇头 i 到基站的通信代价;权值 w 的设置则是根据具体应用,在成员节点能量与簇头能量耗费之间的折衷,目标是最大化网络生命周期.节点 P_j 选择最小 $cost(j,i)$的簇头 i 加入,从而保证每个簇头负载均衡.

实验结果显示,EECS 的控制报文开销较 HEED 要少,网络生命周期较 LEACH 提高 135%.

4.6 LSCP[15]

在有些应用场景,传感器是通过采集目标发出的信号进行目标发现和跟踪的.目标发出的信号强度随距离的增加而衰减,从而在目标周围形成了以目标所在位置为峰值的一个信号强度的“磁场”.LSCP(lightweight sensing and communication protocols)就是针对这种应用提出来的,将传感器节点分簇确定目标的位置和数量.

LSCP 提出了 DAM(distributed aggregate management)的分簇算法:节点采集目标的信号强度,如果信号强度大于竞争簇头阈值,节点把信号强度值广播到邻居节点.邻居节点将这个值与它已经收到的其他节点的信号强度(包括其自身的信号强度)比较,如果该值最大,就转发该值并将转发该值的上游节点作为父亲节点;否则忽略该值.最终,该算法形成一棵以簇头为根的树,簇头是感知到目标信号强度最大的节点,即距目标最近的节点,其他节点按信号衰减从根到叶子有序分布.

5 簇的数据传输

按照成员节点到簇头的跳数,簇的结构一般可以分为单跳网络和多跳网络:单跳网络如 LEACH 等算法形

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

成的簇;多跳网络如 LSCP 等算法形成的簇.此外,还存在其他结构的簇,如 PEGASIS 形成的簇是一条链.簇的路由依赖于簇的结构,成簇算法生成的簇的结构在一定程度上决定了簇的数据传输模式.

5.1 PEGASIS[26]以及分层PEGASIS[29]

PEGASIS 形成的簇的结构是一条链.数据传输时,簇头产生一个令牌,发送到链的一端,通知末梢节点开始传送数据.链上每个节点收到上一个节点传来的数据之后,先与自己采集的数据进行融合处理,然后向链上的下一个邻居节点转发,直到数据报文到达簇头,簇头再将令牌发到链的另一端开始同样过程.簇头在融合了两端所传送来的数据报文之后,将报文转发到基站.由于 PEGASIS 的数据融合是在一条链上依次进行的,虽然节省了能量,但却增加了延迟.所以,Lindsey 等人提出了二进制和 3 层数据融合方案[29].

针对节点具有 CDMA 功能的二进制融合算法是:数据融合在 PEGASIS 链相邻节点之间同时进行,然后逐层往上,直到最后由簇头提交给基站(如图 2 所示).传输层级是 Log N(N 是节点个数).

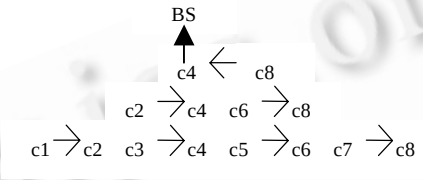

Fig.2 Data gathering in a chain-based binary scheme

图 2 基于链的二进制数据融合方案

针对节点不具有 CDMA 功能的 3 层融合算法[29]是:PEGASIS 链上多个相邻节点组成一组,每组依次进行数据融合,以此减少信号冲突.协议分为 3 层,最后由簇头负责提交数据给基站.

5.2 TEEN[12]

TEEN(threshold sensitive energy efficient sensor network protocol) 采用类似 LEACH 的分簇算法,只是在数据传送阶段使用不同的策略.根据数据传输模式的不同,通常可以简单地把 WSN 分为主动型(proactive)和响应型(reactive)两种类型.主动型 WSN 持续监测周围环境,并以恒定速率发送监测数据;而响应型 WSN 只是在被监测对象发生突变时才传送监测数据.

TEEN 的具体做法是在协议中设置了硬、软两个阈值,以减少发送数据的次数.在每轮簇头轮换的时候将两个阈值广播出去.当监测数据第一次超过设置的硬阈值时,节点把这次数据设为新的硬阈值,并在接下来的时隙内发送它.之后,只有监测数据超过硬阈值并且监测数据的变化幅度大于软阈值时,节点才会传送最新的监测数据,并将它设为新的硬阈值.

通过调节两个阈值的大小,可以在精度要求和系统能耗之间取得合理的平衡.采用这样的方法,可以监视一些突发事件和热点地区,减少网络通信量.仿真结果表明,TEEN 比 LEACH 更有效.但 TEEN 存在两个缺陷:一是如果阈值不能达到,节点不会传送任何数据.二是数据一旦符合阈值要求,节点立即传送,容易造成信号干扰,如果采用 TDMA,则会造成数据延迟.

5.3 APTEEN[30]

APTEEN(adaptive periodic threshold sensitive energy efficient sensor network protocol)是 LEACH 和 TEEN 两者的结合,兼有主动和响应两种类型的数据传输模式,是一种混合型数据传输模式的 WSN.APTEEN 基于邻近节点监测同一对象的假设,由基站采用模拟退火算法将簇内节点分成 sleeping-idle 节点对,idle 节点负责响应查询,sleeping 节点进入睡眠状态以节省能量,两个节点在簇头轮换时转换角色.APTEEN 修改了 LEACH 的 TDMA(如图 3 所示),每对 sleeping-idle 节点所属时隙相隔 TDMA 帧长的一半,如果有紧急数据,sleeping-idle 节点对可以相互占用对方时隙,提高数据响应速度.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

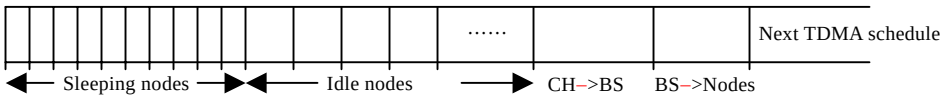

Fig.3 TDMA frame in APTEEN

图 3 APTEEN 修改后的 TDMA 帧格式

5.4 ECMR[17]

ECMR(energy-conscious message routing)是个多跳的路由传输协议.ECMR 假设簇头预先部署,能量不受限,能与成员节点直接通信,而成员节点需多跳路由才能到簇头.所以,协议考虑如何建立从多个成员节点到簇头的路由机制.这是一个从源点到终点的最小代价路径问题,ECMR 由簇头采用 Dijkstra 算法求解.其中,节点 i,j 之间链路的权值定义不仅计算了它们之间的通信耗费,也考虑了节点能量、数据延迟和链路负载等因素.

由于节点的能量耗费模型是确定的:通信能量计算模型[31]、数据处理能量计算模型[31,32]以及环境感知能量计算模型[31].每收到一则报文,簇头就可以根据报文长度和数据量,按照能量计算模型跟踪这则报文所经过的所有节点的能量变化.

每轮循环,协议把簇内节点状态分为 4 种:感知、转发、感知转发、不活动.感知节点只负责监测环境、采集数据;转发节点只负责转发数据;感知转发节点兼有两种功能;不活动节点进入休眠状态.簇头根据节点能量、拓扑关系和网络任务决定每个节点的状态.

路由生成之后,簇头将节点状态和路由信息广播到各个节点.由于报文丢失、数据处理以及延迟等原因,簇头的能量计算模型可能出现偏差,所以需要成员节点定时地直接发送能量更新报文到簇头,报告它的当前能量,由簇头重新生成最优路由,通知簇内成员节点.

ECMR 在运行过程中具有良好的节能性能、较高的吞吐量和较低的通信延迟.但是,该协议扩展性较差,需要部署新的簇头来扩展网络,而且对簇头依赖性大,不支持节点移动.

6 比较与分析

综上所述,我们看到了许多围绕簇头的产生、簇的形成和簇的数据传输而设计的 WSN 分簇路由算法.有些算法能够较快地产生簇头和形成簇,有些算法支持节点的移动,有些算法具有较好的健壮性和扩展性.在表 1 中,我们对上述各种算法从多个评价参数上进行了一个综合对比.其中,A:簇头产生算法;B:簇的形成算法;C:数据传输算法;D:簇头产生方式;E:簇头产生速度;F:簇的形成速度;G:簇的维护开销;H:簇的负载均衡性;I:数据传输结构;J:数据传输延迟;K:数据传输模式;L:是否支持节点移动;M:算法健壮性;N:算法扩展性;O:算法节能性.

通过表 1,我们可以从整体上对 WSN 分簇路由的各种协议有一个比较清晰的认识,有助于我们更加全面地了解已有的各种 WSN 分簇路由算法,并进一步发现和解决相关问题.

从表 1 中不难发现,现有的 WSN 分簇路由算法性能表现比较均衡良好的并不多,大多协议只是在某一方面表现出较好的特性,而整体性能差强人意.所以,尽管这些算法在 WSN 拓扑管理、数据融合和传输等方面有很多优势,但也存在许多不足,归纳起来集中体现在:

(1) 算法的节能性需要进一步提高.WSN 分簇路由协议设计的首要目标是通过高效的分簇算法形成合理的网络结构,通过主动的能量管理阻止网络连通性的下降,延长网络的生命周期.因此,能量消耗成了通信连接性能好坏、网络运行周期长短的主要决定因素,WSN 整体性能的高度依赖于各种能有效利用能量的分簇路由算法.

(2) 集中式簇头产生方式的成簇开销较大,而且限制了网络的扩展性.LEACH-C,HYENAS 等集中式算法由基站作出簇头选择决定,健壮性固然较好,但由于每个节点都须向基站周期性地报告它们的能量和位置等信息,因此,网络流量、时间延迟以及信号干扰的概率都会增加.所以,这类算法成簇开销较大,网络扩展性较差,一般只适合中小型网络.分布式算法则有较好的扩展性、较快的收敛速度和能量的高效性.

(3) 簇的负载均衡是分布式成簇算法的一大挑战.集中式算法基于全局信息成簇,一般生成的簇较均衡,而

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

分布式算法是通过节点之间的信息交互和反馈成簇,由于 WSN 节点是随机部署,分布并不完全均匀,因此,基于局部信息成簇容易导致网络负载整体不均匀,造成局部网络负载过重.

(4) 多跳数据传输结构的缺陷.LEACH,TEEN 等单跳网络中的簇内成员节点在属于它的 TDMA 时隙内把数据直接传送到簇头,其余时间关闭通信模块节省能量.而 PEGASIS,ECMR 等多跳网络,簇内数据的传输必须依赖中间节点转发,这就存在一个致命的缺陷:靠近簇头的节点因为承担了更多的转发任务,能量耗费较快,因而影响了网络的生存周期.

(5) 算法健壮性的考虑.由于传感器节点易失效,而且分簇结构存在瓶颈和潜在的危险性,簇头的高负载使网络瘫痪的可能性增加,网络的不可靠特性要求算法具有一定的容错能力.

Table 1 Comparison of WSN cluster-based routing algorithms

表 **1** WSN 分簇路由算法比较

Protocol	A	B	C	E	D	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
LEACH	√	√	√	Fast	Distributed	Rather fast	Rather high	Poor	One hop	Rather high	Proactive	Y	Good	Rather good	Poor
DCHS	√			Fast	Distributed							Y	Good	Rather good	Rather poor
LEACH-C	√	√		Slow	Centralized	Slow	High	Good				Y	Good	Rather poor	Rather poor
LEACH-F	√	√		Fast	Centralized	Fast	Low	Good				N	Rather poor	Rather poor	Rather poor
DAEA	√	√	√	Slow	Centralized	Fast	Low	Poor	One hop	Rather high	Proactive	Y	Good	Poor	Moderate
HEED	√	√		Rather fast	Distributed	Fast	Rather high	Good				N	Good	Good	Good
CEFL	√			Rather slow	Centralized							N	Good	Rather poor	Rather poor
ACMWN	√	√		Rather slow	Distributed	Rather slow	Rather low	Poor				Y	Rather poor	Rather good	Poor
PEGASIS	√	√	√	Fast	Distributed	Slow	Low	Poor	Multiple hops	High	Proactive	N	Poor	Poor	Moderate
ACE	√	√		Rather fast	Distributed	Fast	Low	Good				Y	Good	Good	Good
HYENAS	√	√		Slow	Centralized	Fast	Low	Good				N	Good	Rather poor	Moderate
EECS	√	√		Rather slow	Distributed	Rather slow	Moderate	Good				N	Good	Good	Rather poor
LSCP	√	√		Rather slow	Distributed	Rather slow	Low	Good				N	Good	Good	Rather poor
TEEN			√						One hop	Rather slow	Reactive	Y	Rather poor	Good	Rather good
APTEEN			√						One hop	Low	Hybrid	Y	Rather poor	Good	Moderate
ECMR			√						Multiple hops	Rather slow	Proactive	N	Rather poor	Poor	Rather good

7 小结与展望

针对 WSN 分簇路由,近年来国内不少研究人员也进行了卓有成效的研究,提出了许多改进算法或新的协议.林亚平等人[33]提出了一种分布式数据汇聚分簇路由算法,该算法利用能量核的思想汇聚数据和减少传输到目的节点的信息.刘明等人[34]提出了一种分布式的高效、节能的传感器网络数据收集和聚合协议 DEEG (distributed energy-efficient data gathering and aggregation protocol),DEEG 中节点自主地根据其剩余能量以及邻居节点的信号强度来竞争簇头,同时为了减小簇头节点的能量开销,簇头之间以多跳方式将收集到的数据发送到指定的簇头节点,然后通过该节点将整个网络收集的数据发送到基站.针对单簇头故障、干扰等原因带来的不可靠性,郑增威等人[35]提出每个簇采用多簇头方式共同承担簇头的作用,改善能量使用效率,提高数据传输可靠性.张卿等人[36]提出了一种近似最优的最大化网络生命周期的数据收集和聚集算法 MLDGA(maximum lifetime data gathering algorithm),MLDGA 一方面试图最小化每轮数据收集中所消耗的总能量,另一方面试图最

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

大化每轮数据收集中所使用的路由树的生命周期.

总体而言,国内对 WSN 分簇路由的研究还处于初级阶段,本文综合国内外的相关研究,着重从簇头的产生、簇的形成和簇的路由角度系统地阐述了当前典型的分簇路由算法及其特点.我们认为,在分簇路由协议设计中,可以从以下 3 个角度入手进一步解决 WSN 分簇路由的问题:

(1) 在簇头选择中,考虑更有效的簇头选择算法和簇头负载平衡算法.能量并非挑选簇头的唯一约束因素,在复杂的特定应用中,我们还必须考虑节点的位置、到基站的距离、计算能力和移动性等,特别是 Actuator 节点的应用.一般地,我们都是基于节点的某个“度”来选择簇头,如同 DCA(distributed clustering for ad hoc networks)算法[37]的假设,“度”这个参数的选取与具体应用有关,反映系统倾向于何种性质的节点成为簇头.簇头的数量和位置分布以及节点如何选择加入簇,对网络的负载平衡具有重大影响.

(2) 在簇的形成过程中,考虑减少拓扑生成过程中的控制报文开销以及降低拓扑结构变动的频率,减少网络通信开销.像 SCSN(scalable coordination in sensor networks)[38]和 CBRP(cluster based routing protocol)[39]算法,如何利用 WSN 分布式的特点建立更高效的启发机制、通过节点之间的互动和信息反馈来分簇,是目前重点研究的一个方向.结合具体网络的动态性,设计合理的簇的重建频率,降低簇的维护开销.信号干扰是分簇路由的一大困扰.解决这个问题一方面需要来自数据链路层协议的支持,另一方面,信道分配与簇的形成紧密相关,如何把二者结合起来,降低网络初始化的功耗,也是分簇算法需要深入考虑的问题.

(3) 设计兼有平面结构和分簇结构优点的新型数据传输模式,是目前很有趣的一个研究方向.在某些基于簇的路由协议中,并没有簇头的概念,每个节点知道它将转发的下一个节点,我们把这类协议叫做基于虚拟簇的平面路由协议.我们认为,它们本质上还是平面路由协议.这类协议包括 max-min zP_{min}[16],GAF(geographical adaptive fidelity algorithm)[40],TTDD(two-tier data dissemination model)[41]等.这类协议既能有效地管理网络拓扑结构,较好地处理节点的移动性,又能有效地利用能量传输数据.此外,如何在簇内和簇间进行数据融合和处理,也很值得探索.

在今后的研究中,还需要解决由视频和图像传感以及实时应用引起的 QoS 问题.能量感知的 QoS 分簇路由越来越受到重视,它将在目标的实时追踪等方面得到应用,这就对带宽保证和能量高效路径的有效利用提出了严格要求.此外,传感器硬件的发展对路由协议的设计也将产生重要影响.例如,一般传感器的能量不能再续,但硬件技术的发展使得能量补充成为可能.Voigt 等人就提出了一种基于太阳能传感器的 LEACH 改进协议[42],使簇头的选择更青睐于能够通过太阳能补给能量的节点.

References:

[1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine, 2002,40(8): 102−114.

[2] Sun LM, Li JZ, Chen Y, Zhu HS. Wireless Sensor Networks. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese).

[3] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. Journal of Software, 2003,4(7):1282−1291 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm

[4] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, Heidemann J. Directed diffusion for wireless sensor networking. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2003,11(1):2−16.

[5] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, Pottie GJ. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. IEEE Personal Communications, 2000,7(5):16−27.

[6] Heinzelman WR, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In: Proc. of the ACM MobiCom’99. Seattle: ACM Press, 1999. 174−185. http://nms.lcs.mit.edu/papers/spin-mobicom99.html

[7] Braginsky D, Estrin D. Rumor routing algorithm for sensor networks. In: Proc. of the 1st Workshop on Sensor Networks and Applications. Atlanta: ACM Press, 2002. 22−31.

[8] Yu HB, Zeng P, Wang ZF, Liang Y, Shang ZJ. Study of communication protocol of distributed sensor network. Journal of China Institute of Communications, 2004,25(10):102−110 (in Chinese with English abstract).

[9] Akkaya K, Younis M. A survey of routing protocols in wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, 2005,3(3):325−349.

[10] Al-Karaki JN, Kamal AE. Routing techniques in wireless sensor networks: A survey. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(6):6−28.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[11] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. Maui: IEEE Computer Society, 2000. 3005−3014.

[12] Manjeshwar A, Grawal DP. TEEN: A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In: Proc. of the 15th Parallel and Distributed Processing Symp. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001. 2009−2015. http://ieeexplore.ieee.org/search/wrapper.jsp?arnumber=925197

[13] Younis O, Fahmy S. Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004,3(4):660−669.

[14] Chan H, Perrig A. ACE: An emergent algorithm for highly uniform cluster formation. In: Proc. of the 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks. LNCS 2920, Berlin: Springer-Verlag, 2004. 154−171. http://citeseer.ist.psu.edu/672023.html

[15] Fang Q, Zhao F, Guibas LJ. Lightweight sensing and communication protocols for target enumeration and aggregation. In: Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. ACM Press, 2003. 165−176. http://portal.acm.org/citation.cfm?coll=GUIDE&dl=GUIDE&id=778436

[16] Li Q, Aslam J, Rus D. Hierarchical power-aware routing in sensor networks. In: Proc. of the DIMACS Workshop on Pervasive Networking. Rutgers University, 2001. http://cmc.cs.dartmouth.edu/papers/li:hierarchical.pdf

[17] Younis M, Youssef M, Arisha K. Energy-Aware routing in cluster-based sensor networks. In: Proc. of the 10th IEEE Int'l Symp. on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems. Fort Worth: IEEE Computer Society, 2002. 129−136. http://citeseer.ist.psu.edu/younis02energyaware.html

[18] Heinzelman W. Application-Specific protocol architectures for wireless networks [Ph.D. Thesis]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2000.

[19] Handy MJ, Haase M, Timmermann D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. In: Proc. of the 4th IEEE Conf. on Mobile and Wireless Communications Networks. Stockholm: IEEE Communications Society, 2002. 368−372. http://citeseer.ist.psu.edu/handy02low.html

[20] Murata T, Ishibuchi H. Performance evaluation of genetic algorithms for flowshop scheduling problems. In: Proc. of the 1st IEEE Conf. on Evolutionary Computation. Orlando: IEEE Press, 1994. 812−817. http://ieeexplore.ieee.org/iel2/1125/8059/00349951.pdf?arnumber=349951

[21] Al-Karaki JN, Ul-Mustafa R, Kamal AE. Data aggregation in wireless sensor networks—Exact and approximate algorithms. In: Proc. of the IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing. Phoenix: IEEE Communications Society, 2004. 241−245. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1303478

[22] Gupta I, Riordan D, Sampalli S. Cluster-Head election using fuzzy logic for wireless sensor networks. In: Proc. of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conf. Halifax: IEEE Computer Society, 2005. 255−260. http://ieeexplore.ieee.org/search/wrapper.jsp?arnumber=1429977

[23] Ghiasi S, Srivastava A, Yang X, Sarrafzadeh M. Optimal energy aware clustering in sensor networks. MDPI Sensors, 2002,2(7):258−269.

[24] Lin CR, Gerla M. Adaptive clustering for mobile wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997,15(7):1265−1275.

[25] Gerla M, Tsai JTC. Multicluster, mobile, multimedia radio network. Wireless Networks, 1995,1(1):255−265.

[26] Lindsey S, Raghavendra CS. PEGASIS: Power-Efficient gathering in sensor information systems. In: Proc. of the IEEE Aerospace Conf. Montana: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2002. 1125−1130. http://ceng.usc.edu/~raghu/pegasisrev.pdf

[27] Tillapart P, Thumthawatworn T, Pakdeepinit P, Yeophantong T, Charoenvikrom S, Daengdej J. Method for cluster heads selection in wireless sensor networks. In: Proc. of the 2004 IEEE Aerospace Conf. Chiang Mai: IEEE Press, 2004. 3615−3623. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?isnumber=29905&arnumber=1368179&count=72&index=11

[28] Ye M, Li CF, Chen GH, Wu J. EECS: An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Performance Computing and Communications Conf. New York: IEEE Press, 2005. 535−540. http://www.cse.fau.edu/~jie/research/publications/Publication_files/chen-wu-05.pdf

[29] Lindsey S, Raghavendra CS, Sivalingam K. Data gathering in sensor networks using the energy*delay metric. In: Proc. of the IPDPS Workshop on Issues in Wireless Networks and Mobile Computing. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001. 2001−2008. http://www.eecs.wsu.edu/~dawn/Papers/2001/e_d_final.pdf

[30] Manjeshwar A, Agrawal DP. APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks. In: Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing. IEEE Computer Society, 2002. 195−202. http://ieeexplore.ieee.org/search/wrapper.jsp?arnumber=1016600

[31] Bhardwaj M, Chandrakasan A, Garnett T. Upper bounds on the lifetime of sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications. Helsinki: IEEE Computer Society, 2001. 785−790. http://citeseer.ist.psu.edu/429731.html

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[32] Heinzelman WR, Sinha A, Wang A, Chandrakasan AP. Energy-Scalable algorithms and protocols for wireless microsensor networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Istanbul: IEEE Press, 2000. 3722–3725. http://mtlweb.mit.edu/researchgroups/icsystems/pubs/conferences/2000/wendi_icassp00.pdf

[33] Lin YP, Wang L, Chen Y, Zhang J, Chen ZP, Tong TS. A distributed data-centric clustering hierarchical routing algorithm for sensor networks. Acta Electronica Sinica, 2004,32(11):1801−1805 (in Chinese with English abstract).

[34] Liu M, Gong HG, Mao YC, Chen LJ, Xie L. A distributed energy-efficient data gathering and aggregation protocol for wireless sensor networks. Journal of Software, 2005,16(12):2106−2116 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/2106.htm

[35] Zheng ZW, Wu ZH, Lin HZ, Zheng KG. Reliable clustering routing algorithm for wireless sensor networks. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005,39(10):1461−1464 (in Chinese with English abstract).

[36] Zhang Q, Xie ZP, Ling B, Sun WW, Shi BL. A maximum lifetime data gathering algorithm for wireless sensor networks. Journal of Software, 2005,16(11):1946−1957 (in English with Chinese abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/1946.htm

[37] Basagni S. Distributed clustering for ad hoc networks. In: Proc. of the '99 Int'l Symp. on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks. IEEE Computer Society, 1999. 310−315. http://citeseer.ist.psu.edu/basagni99distributed.html

[38] Estrin D, Govindan R, Heidemann J, Kumar S. Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks. In: Proc. of the ACM/IEEE MobiCom'99. New York: ACM Press, 1999. 263−270. http://citeseer.ist.psu.edu/estrin99next.html

[39] Jiang M, Li J, Tay Y. Cluster based routing protocol (CBRP) functional specification. IETF Internet-Draft, 1998. http://www3.ietf.org/proceedings/98dec/slides/manet-cbrp-98dec/

[40] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-Informed energy conservation for ad hoc routing. In: Proc. of the 7th Annual ACM/IEEE Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Rome: ACM Press, 2001. 70−84. http://citeseer.ist.psu.edu/xu01geographyinformed.html

[41] Ye F, Luo H, Cheng J, Lu S, Zhang L. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks. In: Proc. of the 8th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. Atlanta: ACM Press, 2002. 148−159. http://citeseer.ist.psu.edu/ye02twotier.html

[42] Voigt T, Ritter H, Schiller J, Dunkels A, Alonso J. Solar-Aware clustering in wireless sensor networks. In: Proc. of the 9th IEEE Symp. on Computers and Communications. Alexandria: IEEE Communications Society, 2004. 238−243. http://page.mi.fu-berlin.de/~hritter/publications/VDAR04-ISCC.pdf

附中文参考文献:

[2] 孙利民,李建中,陈渝,朱红松.无线传感器网络.北京:清华大学出版社,2005.

[3] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络.软件学报,2003,14(7):1282−1291. http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm

[8] 于海斌,曾鹏,王忠锋,梁英,尚志军.分布式无线传感器网络通信协议研究.通信学报,2004,25(10):102−110.

[33] 林亚平,王雷,陈宇,张锦,陈治平,童调生.传感器网络中一种分布式数据汇聚层次路由算法.电子学报,2004,32(11):1801−1805.

[34] 刘明,龚海刚,毛莺池,陈力军,谢立.高效节能的传感器网络数据收集和聚合协议.软件学报,2005,16(12):2106−2116. http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/2106.htm

[35] 郑增威,吴朝晖,林怀忠,郑扣根.可靠传感网聚类路由算法研究.浙江大学学报(工学版),2005,39(10):1461−1464.

沈波(1982－),男,四川洪雅人,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络.

钟亦平(1953－),女,教授,主要研究领域为网络安全,协议分析与测试.

张世永(1950－),男,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为计算机网络的应用和安全,数据通信.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn