

## 基于负载均衡的簇间路由协议

谢茂涛<sup>1</sup>, 王晓立<sup>2</sup>

(1. 中南民族大学 计算与实验中心, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 管理学院, 武汉 430074)

(xmt01@163.com)

**摘要:**针对无线传感器网络簇头节点负载不均衡的问题,提出一种基于负载均衡的簇间路由协议。该协议通过记录邻居簇头节点到 Sink 节点的最小跳数信息建立到 Sink 节点的多条路径,根据簇节点的剩余能量和负载选择合适的路径进行路由,从而实现了簇头节点间的负载均衡。仿真实验结果表明,该路由协议能有效地均衡网络负载和簇头节点能量消耗,减少数据传输延迟,延长网络生存时间。

**关键词:**无线传感器网络;簇;负载均衡;最小跳数

**中图分类号:** TP393; TN915.04 **文献标志码:** A

## Load balancing inter-cluster routing protocol

XIE Mao-tao<sup>1</sup>, WANG Xiao-li<sup>2</sup>

(1. Center of Computing and Experiment, South Central University for Nationalities, Wuhan Hubei 430074, China;

2. College of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** A load balancing inter-cluster routing (LBC) protocol in wireless sensor networks was proposed to balance cluster head load. Based on the minimum hops to sink node, multiple paths were built from cluster heads to the sink node. And the routing strategy took the residual energy and load into consideration, thus load balancing between cluster heads could be achieved. Simulation results show LBC can effectively balance the load and energy consumption of cluster heads, decrease the delay of packets, and obviously prolong the lifetime of networks.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); cluster; load balancing; minimum hops

### 0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是大量传感器节点以自组织和多跳的方式构成的无线网络,其目的是协作感知、采集、处理和传输网络覆盖区域内感知对象的监测信息并报告给观察者。由于传感器节点计算能力、存储空间和通信能力相对较弱,因此设计的路由协议应该简单有效,使得节点的运算开销尽量小。传感器节点通常采用能量有限的不可更换的电池提供能量,这就要求无线传感器网络路由协议必须以节约能量为主要目的,最大限度地延长网络的生存时间<sup>[1]</sup>。

无线传感器网络路由协议按照网络的拓扑结构,可以分为平面路由协议和分层路由协议两种。在平面路由协议中,所有节点地位平等,节点采集到的数据通过多跳的方式传送到汇聚节点(Sink)。虽然平面路由协议简单、鲁棒性较好,通过控制机制可使网络流量均匀分散在整个网络中,但是可扩展性比较差,维护动态变化的路由需要大量的控制信息。而在分层路由协议中,整个网络通常划分成相连的区域,每一个区域称为一个簇(Cluster)。每个簇由一个簇头节点和多个簇内成员节点组成,低一级网络的簇头是高一网络中的簇内成员,由最高层的簇头与目的节点或 Sink 节点通信。分层路由协议是有中心结构与无中心结构的综合体,特别适合于大规模的无线传感器网络环境,具有可扩展性好、便于管理等特点。因此,基于簇的路由协议已成为无线传感器网络的研究热点。

本文在分析了现有的簇间路由协议的基础上,针对无线传感器网络簇间路由中簇头节点负载不均衡的问题,提出了一种基于负载均衡的簇间路由协议。该协议通过记录邻居簇头节点到 Sink 节点的最小跳数信息建立到 Sink 节点的多条路径,根据簇节点的剩余能量和负载选择合适的路径进行路由,从而实现了簇头节点间的负载均衡。

### 1 簇间路由协议及其存在问题

在基于簇的路由协议中,由于簇内的通信距离较短,故收发数据的能耗也较小。相对于簇内通信来说,簇间通信的能耗较大,而且簇头节点的死亡将会导致簇中所有成员节点采集的信息均无法被转发出去。因此,建立合理的簇间通信机制,均衡簇头节点负载和能量消耗,是簇间路由协议需要解决的问题。低功耗自适应集簇分层型(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)协议<sup>[2]</sup>是一种典型的基于簇的路由协议。该协议通过等概率地随机循环选择簇头,非簇头节点根据接收到广播信号的强弱来决定加入哪个簇。在数据传输阶段,簇内的所有节点按照时分多址(Time Division Multiple Access/Address, TDMA)时隙向簇头节点发送数据,簇头节点将融合后的数据直接发送到 Sink 节点。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。虽然 LEACH 协议具有节点能耗低、网络延迟小等优点,但是,在 LEACH 协议中,簇头节点是单跳路由直接将数据发送给 Sink 节点,这就要求节点具有较大功率通信能力,因此该协议可扩展性差,不适合大规模网络;同

收稿日期:2009-03-16;修回日期:2009-05-08。

作者简介:谢茂涛(1971-),男,湖北鄂州人,讲师,硕士,主要研究方向:无线传感网络; 王晓立(1979-),女,湖北襄樊人,博士研究生,主要研究方向:信息系统处理。

时这也将导致离 Sink 节点较远的簇头节点能耗很大,极易使局部节点提前死亡,从而影响网络的寿命。

为了减少这种远距离的通信能耗,现有的簇间路由协议簇头节点间一般采用多跳合作的方式与 Sink 节点进行数据传输<sup>[3]</sup>。如果采用简单的多跳路由,那么离 Sink 节点较近的簇头节点由于多次转发远端簇头节点的数据,其能量将会首先耗尽,也会影响整个网络的寿命,所以簇头节点间一般采用多跳的树型结构进行路由。文献[4]提出一种基于能量高效的非均匀分簇(Energy-Efficient Uneven Clustering, EEUC)协议,该协议根据簇头节点的剩余能量和链路的能量开销两个指标将簇头节点组成了一棵以 Sink 节点为根节点的树,簇头节点在选择其路由的下一跳节点时,不仅考虑候选节点的剩余能量,还考虑候选节点相对 Sink 节点的位置。虽然 EEUC 协议能够有效地平衡簇头节点的能量消耗,但是由于每个簇头节点到 Sink 节点的距离是根据其接收到 Sink 节点发出信号的强调计算出来的,所以网络的可扩展性差。文献[5]提出一种基于能量有效的分簇路由协议(Novel Clustering based Energy-Efficient Routing, NCEER),该协议根据簇头节点距离 Sink 节点跳数和剩余能量将簇头节点组成了一棵以 Sink 节点为根节点的层次路由树,既缩短了簇头节点与 Sink 节点的传输距离,又避免了能量较低的簇头节点作为中继节点进行数据传输。NCEER 协议将最小跳数路由协议和分簇的路由结合起来,克服了 EEUC 协议网络的可扩展性差的缺点。然而这种层次路由树会造成簇头节点在簇间数据传输阶段一直使用一条固定路径与 Sink 节点通信(只要不重新分簇,这条路径就一直存在,而且为了避免额外的处理开销,数据传输阶段持续的时间一般相对较长),这会使该路径覆盖的簇头节点过早用完它们的能量,造成网络分割;同时这也会造成簇头节点间的负载不均衡,网络延迟较大。很多无线传感器网络应用,如军事和交通领域的目标跟踪传感器网络,对网络延迟要求较高,所以,理想的无线传感器网络路由协议在考虑能量均衡的同时也应考虑负载的均衡。

## 2 基于负载均衡的分簇路由协议的设计

为了解决上述问题,本文将基于最小跳数<sup>[6]</sup>的多路径路由协议的思想 and 分簇的思想结合起来,提出了一种基于负载均衡的簇间路由协议。采用基于最小跳数的多路径路由协议,可以保证簇头节点发出的任何信息都沿着最优的路径向 Sink 节点发送,而且算法实现简单,便于将负载均衡到多个传输路径上,通过分簇克服了其可扩展性比较差的缺陷。所有簇头节点只要记忆自己的转发邻居簇头节点集、最小跳数、邻居簇头节点的剩余能量和负载,就可以实现信息路由。

### 2.1 簇间路由由建立阶段

无线传感器网络通常被划分为簇,每个簇由一个簇头和多个簇成员组成。簇头节点不仅要负责簇内信息的收集和融合处理,还要负责簇间数据转发。基于簇的网络模型中,数据通信一般分为三个阶段:第一阶段是簇建立,第二阶段是簇内数据的收集和融合处理,第三阶段是簇间的数据传递。簇间路由的建立是在第三阶段内完成的,即簇内数据传输完成之后, Sink 节点发送路由建立请求包(request), request 包以洪泛的方式在整个簇头节点间进行传播。request 包中包含了以下3种信息:簇头节点的标志符(id),簇头节点当前的权重值(weight)和簇头节点距离 Sink 节点的最小跳数值(h)。簇头节点的路由表由2个表项组成:邻居簇头节点标志符(id)和权重值(weight), weight 的值由以下公式得出:

$$weight = energy^{\alpha} / load^{\beta} \quad (1)$$

其中:energy 表示邻居簇头节点剩余能量,load 表示邻居簇头节点负载大小,本文中用数据链路层的缓存队列长度来衡量簇头节点的负载, $\alpha$  和  $\beta$  分别是剩余能量权重调整因子和负载权重调整因子。初始将 Sink 节点的跳数值设置为  $h = 0$ , 将簇头节点的跳数值设置为  $h = \infty$ , 各簇头节点按式(1)计算出自己的权重值 weight。当 Sink 节点的邻居簇头节点  $m$  收到 request 包后,将它到 Sink 节点的最小跳数  $h_m$  改为 1, 然后簇头节点  $m$  又向其邻接簇头节点广播带有自己的 id、 $h_m$  和 weight 的 request 消息。当簇头节点  $n$  收到簇头节点  $m$  发送的消息后作如下处理:

- 1) 若  $h_n < h_m + 1$ , 则不做任何处理;
- 2) 若  $h_n = h_m + 1$ , 则在自己的路由表中登记簇头节点  $m$  的 id 和权重值;
- 3) 若  $h_n > h_m + 1$ , 则首先清空现有的路由表内容, 然后设置簇头节点  $n$  的最小跳数为  $h_n = h_m + 1$ , 并将簇头节点  $m$  添加到路由表中, 最后簇头节点  $n$  向其邻居簇头节点广播路由创建 request 消息。

随着 request 包在簇头节点间的传播, 每个簇头节点均建立起以下一跳簇头节点为转发节点的路由表。这样每个簇头节点均建立了到 Sink 节点的多条最小跳数路径, 为簇间数据包的路由传输做好了准备。

### 2.2 簇间路由由维护

经过簇间路径建立阶段, 各个簇头节点完成了自身路由表的构建。在簇间数据传递阶段, 簇头节点在自己的路由表中选取权重值最大的邻居簇头节点作为目的节点进行发送, 使得剩余能量高、负载较小的邻居簇头节点得到更多的转发机会, 从而将通信负载均匀分布不同的路径上, 降低了网络延迟, 延长了网络的寿命。

由于在 WSN 中, 簇头节点的剩余能量和数据链路层的队列长度会时常变化, 为了实现路由维护功能, LBC 协议中修改了媒体介质访问控制(Medium Access Control, MAC)协议, 采用捎带技术, 在确认帧 ACK 中增加了记录簇头节点权重值的字段。当簇头节点发送数据给下一跳簇头节点时, 如果簇头节点收到该邻居簇头节点确认帧 ACK, 它就用该确认帧 ACK 中记录的该邻居簇头节点的权重值替换掉路由表中的旧值; 如果收不到下一跳节点的确认帧, 那么该簇头节点就认为该邻居簇头节点无法接收数据, 并将其从路由表中删掉, 然后从路由表中另选下一跳簇头节点接收数据。通过捎带技术确保路由表中的权重值和邻居簇头节点实际大小一致, 簇间路由选择及维护流程如图1所示。

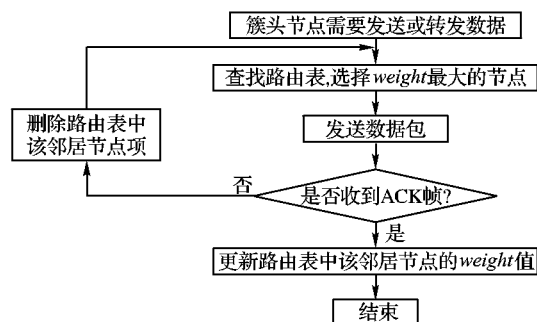


图1 簇间路由选择及维护流程

## 3 仿真结果及分析

### 3.1 仿真环境和性能评价指标

为了验证路由协议的有效性, 利用 NS2<sup>[7]</sup> 网络仿真工具

对路由协议进行仿真。模拟场景为 400 个节点随机分布在  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  区域内, Sink 节点位于坐标为 (100, 250) 的位置。数据包大小为 4096 b, 簇头节点发送分组间隔为 5 s,  $\alpha$  和  $\beta$  分别设置为 1 和 5。网络中的每个节点初始能量设为 1.5 J, 发送和接收数据的能量消耗为 50 nJ/b。

LEACH 是比较典型的基于簇的路由协议, 它的成簇思想贯穿于其后发展出的很多基于簇的路由协议, 本文对 LEACH 协议进行了修改, 数据链路层采用 RTS/CTS 机制的 IEEE 802.11 DCF 协议, 数据链路层的缓存队列总长度设为 256 KB, 簇间采用本文提出的基于负载均衡的簇间路由协议(在实验中称 LBC 协议), 同时也在 LEACH 协议基础上实现了 NCEER 协议的簇间路由协议(在实验中称 LEACH-M 协议), 并从网络生存周期和数据报平均延时等方面对它们进行性能对比, 所有结果均取 20 次的平均值。网络生存周期是指网络节点因能量耗尽而死亡时网络工作所经过的轮数, 数据包平均延时是指目的节点收到所有数据包的平均延迟。

### 3.2 仿真结果分析

图 2 显示了网络中存活的节点数目随时间(轮数)变化的曲线。从图中可以看出, LEACH-M 协议第一个簇头节点在第 328 轮时死亡, 本文提出的 LBC 协议则在 383 轮时第一个簇头节点死亡, 这说明 LBC 能很好地均衡了网络中簇头节点的能量消耗。虽然 LEACH-M 协议也考虑簇头节点的剩余能量, 但是簇头节点在簇间数据传输阶段一直使用一条固定路径与 Sink 节点通信, 这会使该路径覆盖的簇头节点消耗更多的能量。而 LBC 协议不仅考虑各簇头节点的剩余能量, 还考虑各簇头节点负载, 尽可能地避免了因数据链路层缓存队列发生溢出而引起的数据包在网络中重传; 另外, 各簇头节点建立的路由表中具有多条候选路径, 从而能够保证簇头节点发出的任何信息都沿着最优的路径向 Sink 节点发送, 因而 LBC 协议更加节能。

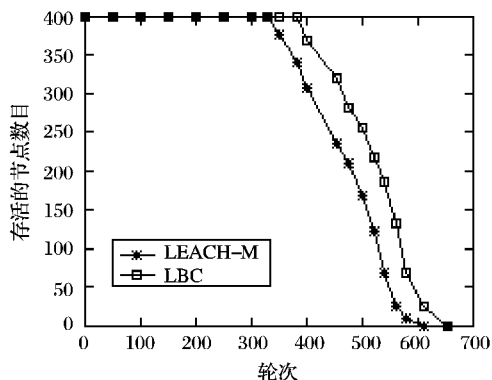


图 2 网络的生存周期

图 3 表明在负载比较大时, LBC 协议的延迟比 LEACH-M 协议要小。这是由于本文中所提出的基于负载均衡的簇间路

由协议在簇头节点之间通过构造路由表形成多路径, 便于将簇头节点的负载均衡分布不同的路径上, 采用捎带技术实时更新路由表, 并根据剩余能量和负载大小选择路由, 在剩余能量相同的情况下, 负载较小的簇头节点将有过多的机会转发数据报, 避免了拥塞发生, 降低了数据包的延迟。LEACH-M 协议由于没有考虑簇头节点负载, 在负载较大增加了分组在缓存中的排队等待时间, 所以延迟较大。

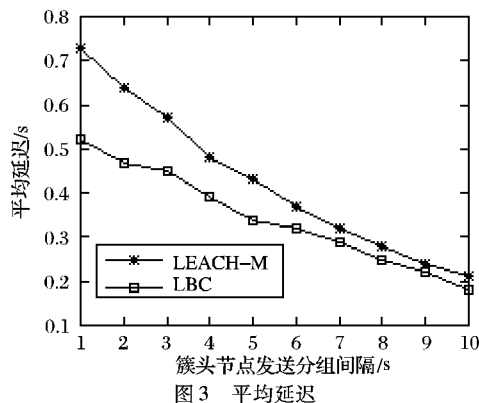


图 3 平均延迟

## 4 结语

本文提出了一种基于负载均衡的簇间路由协议, 该协议结合了最小跳数路由协议和分簇协议的优点, 充分考虑了簇头节点的剩余能量和负载, 将数据通信均匀分布在不同的路径上。仿真结果表明 LBC 能够有效地均衡簇头节点间的负载和能量消耗, 延长网络的生存周期, 降低网络延迟, 算法简单并具有良好的扩展性。

### 参考文献:

- [1] JENNIFER Y, BISWANATH M, DIPAK G. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(14): 3047 - 3061.
- [2] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660 - 670.
- [3] 李小亚, 黄道平, 吴洪艳. 无线传感器网络单跳与多跳路由的选择性[J]. 计算机工程, 2009, 35(3): 13 - 14.
- [4] 李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27 - 36.
- [5] 郭拯危, 毕俊蕾, 李致远. 一种新的传感器网络能量有效路由算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(10): 123 - 126.
- [6] HUANG S, JAN R. Energy-aware, load balanced routing schemes for sensor networks[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Parallel and Distributed Systems. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 419 - 425.
- [7] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 1 - 195.

(上接第 2170 页)

- [6] RAMASWAMY L, LIU L. Free riding: a new challenge to peer-to-peer file sharing systems[C]// Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 220 - 229.
- [7] MA R T B, LEE C M, LUI J C S, et al. Incentive and service differentiation in P2P networks: A game theoretic approach[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(5): 978 - 991.
- [8] ANCEAUME E, GRADINARIU M, RAVOAJIA A. Incentive for P2P fair resource sharing[C]// Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005: 253 - 260.
- [9] The VNT Project. The UCB / LBNL / VNT Network Simulators: Version 2 [EB/OL]. [2006 - 02 - 11]. <http://mash.cs.berkeley.edu/ns>.