

无线传感网络中基于综合因素的分布式路由算法

成 鹭¹ 成庚民²

(西安交通大学电信学院 西安 710049)¹ (西安财经学院 西安 710061)²

摘要 近年来由于在多方面的广泛应用,无线传感器网络受到了越来越多的关注。然而限于无线传感器网络自身的限制,如何更好地节省能量,仍为无线传感器路由协议设计中面临的主要问题之一。LEACH 等基于分簇的路由协议通过成簇来减少能量消耗,但是成簇过程却带来额外消耗以及冗余。对 LEACH 协议中簇头生成算法进行了研究并提出了改进,提出了基于节点能量、节点距离以及节点度的分布式优化算法,并对优化算法进行分析与仿真。仿真试验表明,基于综合因素的分布式簇头选举算法优化了簇头选举方式和簇头的分布,从而节省了能量消耗,延长了网络生存周期。

关键词 无线传感器网络,簇头选举,能耗优化

Distributed Weight-clustering Algorithm in Wireless Sensor Networks

CHENG Lu¹ CHENG Geng-min²

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)¹

(Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an 710061, China)²

Abstract In recent years, the wireless sensor networks (WSN) attract increasing attention due to its bright application prospect in both military and civil fields. Energy conservation becomes a crucial problem in WSN routing protocol. Cluster-based routing protocols such as LEACH conserve energy by forming clusters which only cluster heads need to consume extra energy to perform data aggregation and transmit it to base station. Unfortunately, cluster formation not only dissipates lots of energy but also increases overhead. We proposed a distributed, weighted clustering algorithm which improves the cluster formation process of LEACH by taking residual energy, mutual position, workload balance and MAC functioning in to consideration. The algorithm is flexible and coefficients can be adjusted according to different networks. The simulation experiments demonstrate the algorithm proposed in this paper is better in performance than LEACH.

Keywords Wireless sensor networks, Energy efficient, Cluster formation

微电子技术、计算技术以及无线通信技术的发展极大地促进了无线传感技术的提高。无线传感器网络作为大量小型传感器节点的集合,能够布置在各种环境中感知环境变化并相互沟通。但是,由于传感器节点多分布在恶劣环境中,并且缺乏储备能源,一旦放置就不可轻易移换直至死亡,因此能耗问题是无线传感器网络诸多研究问题中的重点。怎样有效地利用有限的能源始终是无线传感器网络面临的难题。根据无线传感器网络自身特点,常见的无线路由协议可以分为以下 3 种:SPIN^[1]和 Directed Diffusion^[2,8]等注重数据传输效率的平面型路由协议,以 LEACH^[3]为代表的注重能效与负载均衡的层次型路由协议以及 GAF^[4],GEAR^[5]等地理位置型路由协议。层次型路由协议如 LEACH, PEGASIS^[6]和 HEED^[7]的基本思想是通过分簇,使簇头对簇内节点采用数据融合和转发等机制来减少数据的传输量以及距离,进而降低通信能量损耗,达到网络节能的目的。其中,簇头选取的优化是算法设计中需要考虑的重要问题之一,它是影响网络能量损耗分布、延长网络生存周期的关键因素。本文对层次型

路由协议进行了深入的研究,针对其不足提出了一种高效的分布式簇头选举优化算法。在簇头选举阶段,通过对节点剩余能量、节点相互位置以及节点的度等因素的综合考虑,选举出最优簇头。这种算法十分灵活,能够适应不同的网络要求。

1 LEACH 协议分析及问题描述

LEACH 协议是在无线传感器网络中使用最为广泛的一种路由协议。它通过随机选取簇头以及簇头轮换机制达到节点间的负载平衡。LEACH 协议将整个无线传感器网络分成若干个簇,每个簇选取一个簇头,其他节点将自己所采集的信息传输给所属的簇头,簇头将所有接收的信号和自己采集的信号通过数据融合,传给接收器。LEACH 协议以轮为单位,每一轮分为两个阶段:簇建立阶段和稳定传输阶段。在簇建立阶段,选举簇头并形成簇;在稳定阶段,成员节点向簇头传输信息,簇头收集信息并传输给基站。LEACH 协议相对于平面型协议,较好地解决了能量有限问题,能够实现能量消耗均衡机制。

但是协议本身也存在着很多不足。首先,LEACH 协议没有考虑到簇头节点的分布问题。在 LEACH 协议中,簇头节点都是随机选择的,并没有考虑到簇头节点与邻居节点之间的关系。因此在 LEACH 协议中,很有可能造成簇头节点分布不均匀,如图 1 所示。

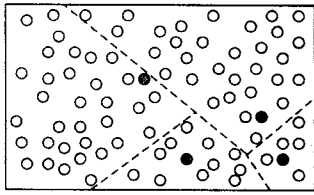


图 1 簇头节点的不均匀分布

在图 1 中,黑色节点代表簇头,白色节点代表簇内成员节点。可以看到,由 LEACH 随机簇头选取机制选择的簇头没有均匀地分布在网络中,而是聚集在某一处。这就增加了簇头与簇内成员间的距离,从而增加了节点的传输能量消耗。

LEACH 协议并不能保证簇的均衡性。从图 1 可以看出,簇头 A 只负责管理 4 个簇内节点,而簇头 D 负责管理多达 30 多个簇内节点。与簇头 A 相比较,簇头 D 需要消耗更多的能量来进行数据收集以及传送。并且由于相应的簇内节点远离簇头 D,簇头 D 及其簇内节点需要耗费更多的能量进行数据传输。不均匀的簇分布影响了系统负载以及能量的均衡性。

LEACH 协议忽略了成簇的效率。LEACH 协议并没有考虑邻居节点的相关信息。如图 2 所示,A,B,C 和 D 4 个节点有着相同的剩余能量和传输距离。B,C,D 3 个节点在节点 A 的传输范围内,但它们之间不能直接通信。

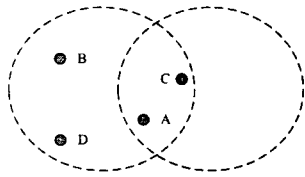


图 2 4 个节点的分布

在理想情况下,A 被选举成簇头,管理 B,C 和 D 3 个簇内节点。但是由于在 LEACH 协议中采用随机选举机制,所有的节点有着相同的几率被选为簇头。如果节点 C 成为簇头,节点 A 将会成为簇内成员。由于 B,C,D 3 个节点之间不能相互通信,B 和 D 节点被迫将自己选取为节点。这样将产生 3 个簇头,从而增加传输的信息和传输时的能量损耗。

2 基于综合因素的分布式簇头选举优化算法

在本节中,提出了一种高效的、基于综合因素的分布式簇头选举优化算法。该算法中,综合考虑了不同的参数,比如节点间剩余能量、节点间距离以及节点的度。算法具有很强的灵活性,通过给这些不同参数分配不同的系数,使其能够适应多种无线传感器网络要求。

2.1 算法的前提条件

该算法基于以下的网络模型:

所有的传感器节点均匀分布。

所有的传感器节点均不可移动。它们拥有相同的传输范围和初始能量,并且发送和接收消息消耗同样多的能量。

所有的传感器节点均不知道自己的地理位置。它们通过接收到的信号强弱来判断自己与邻居节点间的关系。

2.2 算法描述

簇头的选择极大地影响整个网络的性能。好的簇头不仅能够减少整个网络的能量消耗,还能延长网络生存周期。当考虑一个节点是否适合作为簇头时,应考虑以下 3 个因素。

1) 节点的剩余能量。无线传感器网络最显著的特点之一就是有限的节点能量。一旦节点被布置,它就开始工作,直至能量消耗完毕。由于需要承担数据收集、数据融合以及传送等任务,簇头要消耗更多的能量。如果一个只有不多的剩余能量的节点被选举为簇头,那么由于要完成额外的数据融合等任务,这个节点的能量将会很快耗尽,整个簇也将陷入瘫痪状态。因此在簇头选择阶段,节点的能量是一个很重要的考虑因素。

2) 节点间距离以及节点与基站之间的距离。在数据传输过程中,发送节点与接收节点都要消耗能量。通讯能量的消耗随着发送方与接收方两节点之间的距离远近而变化。簇头往往只需要消耗较少的能量与附近的邻居节点进行交流,而需要较多能量接收远距离邻居节点的数据信息。因此恰当地选择簇头,使得簇头与邻居节点之间的距离最小,便能够有效减小节点间通信的能量开销。

3) 节点的度。节点的度由节点所拥有的邻居节点的个数决定。节点的度越高,说明节点所拥有的邻居节点越多。选择节点度高的节点作为簇头,可以有效地减少节点与基站之间的传送信息量,从而节省能量的消耗。但是,由于 MAC 层的限制,在理想条件下一个簇头节点最多可以管理 20 个成员节点。过多的成员节点会造成簇头节点负荷过重,每个成员节点将等待更长的时间才能够与簇头进行通信。这样,不仅增加了簇头的负担,也造成了数据延迟。因此,合理地选择簇头,使其拥有较为理想的节点的度,有利于提高系统效率和减少能量损耗。

在优化改进算法中,每个传感器节点都拥有一个邻居节点记录表(如表 1 所列),用以记录邻居节点的相关信息,比如节点号、能量、距离以及状态等等。

表 1 邻居节点表

Neighbor ID	Weight	State	Residual Energy	Mutual Distance	Distance to BS
-------------	--------	-------	-----------------	-----------------	----------------

每个节点都处在初始状态、簇头、簇内成员 3 个状态中的某一个。最初每个节点都处在初始状态,经过簇头选择阶段,每个节点会根据自己的信息将自己的状态声明为簇头或者簇内成员。以下为优化算法的具体步骤:

1) 计算传感器节点与基站之间的距离 D_{bs} 。传感器节点并不知道自身的确切地理位置,它们通过接收到的信号强弱来估计与发送方之间的距离。在初始阶段,基站向全网络广播一条信息,传感器节点通过接收到的信息的强度来计算自己与基站之间的距离。由于基站一般远离传感器节点,在计算数据传送的能量损耗时采用多路径信道模型,即能量与距离的四次方成正比, $D_{bs} = d_{toBS}^4$ 。

2) 发现邻居节点。每一个传感器节点 v 都广播一条包含有自身节点号、剩余能量以及与基站之间距离等信息的邻居发现消息。为了防止传输中的冲突,每一个节点都随机选择时间广播消息。设定一个时间值 $T_{NeighborDiscovery}$,在时间值

$T_{NeighborDiscovery}$ 内节点会收到所有邻居节点的消息,并且将它们存储在邻居节点记录表中。通过查看邻居节点记录表,每个节点就能知道邻居节点的个数,从而计算出节点的度。若 d_v 代表节点的度, tx_{range} 表示节点的传输范围,则

$$d_v = |N(v)| = \sum_{w \in V, w \neq v} \{dist(v, w) < tx_{range}\}.$$

3) 计算节点的度差 Δv 。对于每个节点来说, $\Delta v = |d_v - \delta|$ 。其中, δ 表示一个簇最多能够管理的簇内成员个数。

4) 计算邻居节点间的相互距离。每个节点通过估算接收到的邻居节点发送的邻居发现消息的强度来确定与该邻居节点之间的距离。由于节点间的距离相对较近,我们采取自由空间信道模型计算能量损耗。用 D_{cm} 来表示传感器节点与其邻居节点之间的平均距离,有

$$D_{cm} = \frac{\sum_{w \in V, w \neq v} d_{toCH}^2}{d_v}.$$

5) 计算剩余能量比 E_p :

$$E_p = E_{init} / E_v$$

其中, E_v 表示传感器节点现有剩余能量, E_{init} 表示节点的初始能量。剩余能量比越大,则节点的剩余能量越多。

6) 计算节点的综合因子 W_v 。对于每个节点 v ,使用以下公式计算每个传感器节点的综合因子:

$$W_v = w_1 E_p + w_2 \Delta v + w_3 (D_{toCM} + D_{toBS})$$

$$W_v = w_1 \frac{E_{init}}{E_v} + w_2 \left(\sum_{w \in V, w \neq v} \{dist(v, w) < tx_{range}\} - \delta \right) + w_3 \left(\frac{\sum_{w \in V, w \neq v} d_{toCH}^2}{\sum_{w \in V, w \neq v} \{dist(v, w) < tx_{range}\}} + d_{toBS}^4 \right)$$

在这个公式中, w_1 , w_2 和 w_3 ($w_1 + w_2 + w_3 = 1$) 作为每个影响因子的权重,在计算综合因子的时候,由于其权重的不同,各个影响因子起到了不同的作用。

7) 节点间综合因子的大小信息交换。当节点计算出自己的综合因子大小后,它将与邻居节点交换信息。收到信息的邻居节点将消息存储在邻居节点表中。每个节点通过查询自身的邻居节点表便可决定是否选举自己为簇头。拥有最小的综合因子的节点宣布自己为簇头并发送消息给其他节点,其他节点根据自己与簇头之间的距离来决定加入合适的簇。

图3为基于综合因素的分布式优化路由算法的过程。除了成簇算法与 LEACH 有所区别,稳定阶段与 LEACH 算法相同。

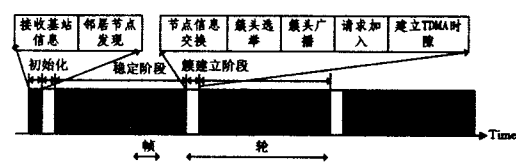


图3 基于综合因素的分布式优化算法过程

3 参数的选择

w_1 , w_2 和 w_3 作为影响因子的系数,在给定的网络中保持不变。但是可以根据网络系统的要求,在最初配置阶段对各个系数进行配置来适应不同的系统要求。这种灵活的系数选择方法使优化改进算法能够应用于各种需求的无线传感器网络。例如能量在无线传感器网络中起着很重要的作用,可以在3个参数中配置不同的系数来使能量在簇头选举过程中起到重要的作用。

第一个影响因子 w_1 对于延长网络生存周期起到很重要的作用。由于簇头需要消耗更多的能量来管理簇内节点,进行数据传送以及数据融合,因此选择剩余能量多的节点作为簇头,能够均衡能量分配,有效地提高网络效率,延长网络生存周期。第二个影响因子 w_2 能够改善 MAC 层的效率,表示在不损害 MAC 层效率的前提下,簇头能够管理的簇内节点最大值。由于每个节点只能够在给其分配的时隙内进行数据的传送,过多的簇内成员会造成数据延迟等问题,因此选择具有最小度差的节点作为簇头,能够防止簇头负担过重。此外,选择具有最小度差的节点能够有效地防止簇头节点的冗余。第三个影响因子 w_3 能够有效地减少簇头与簇内成员节点、基站之间的距离,从而减少通信和传输的能量损耗。当两节点之间距离很远时,节点需要更多的能量来进行通信。根据距离的不同,采取自由空间以及多路径信道模型来进行能量计算,能量的消耗分别与距离的平方、4次方成正比。

4 仿真与分析

4.1 仿真环境

我们采取与文献[3]相同的通信模型。 E_{elec} 表示传送。根据传输距离的远近不同,采用两种不同的信道模型计算 ξ_{amp} 。当两节点之间的距离小于 d_0 时,采用自由空间信道模型,能量与距离的平方成正比。当两节点之间的距离大于 d_0 时,采用多路径信道模型,能量与距离的4次方成正比。在该通信模型中,与接收节点距离为 d 的发送节点传输 k -bit 数据所需能量如下所示。

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d)$$

$$E_{Tx}(k, d) = kE_{elec} + k\xi_{fs}d^2, d < d_0$$

$$E_{Tx}(k, d) = kE_{elec} + k\xi_{mp}d^4, d \geq d_0$$

接收节点将消耗 $E_{Rx}(k)$ 能量来接收 k_{bit} 数据:

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k)$$

$$E_{Rx}(k) = kE_{elec}$$

表2列出了模拟中使用的系统参数。

表2 系统参数

参数	值
网络大小	100 * 100m ²
基站	(50, 175)
节点初始能量	2J
E_{elec}	50J/bit
ξ_{fs}	10pj/bit/m ²
ξ_{mp}	0.0013pj/bit/m ⁴
EDA	5nj/bit/signal
数据包大小	500bytes
包头大小	25bytes
距离的阈值	86m

4.2 性能分析

我们将优化算法的性能与 LEACH、LEACH-C 进行比较。图4显示了在成簇过程中能量的消耗。

相对于 LEACH,基于综合因素的分布式优化算法在成簇阶段消耗了较多的能量,但是其能量消耗明显小于 LEACH-C 算法。由于在簇头选举过程中,优化算法需要计算节点间的距离、发现邻居节点并且计算每个节点的综合影响力,因此与 LEACH 随机选取簇头的机制相比较,优化算法在成簇阶段消耗了更多的能量。

图5显示了单位能量内接收的数据量。

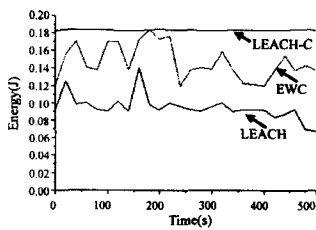


图4 成簇过程中的能量消耗

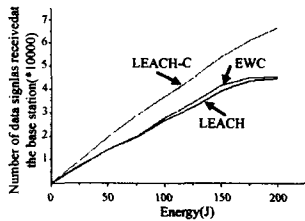


图5 单位能量内基站所接收的数据量

模拟显示了 LEACH-C 协议在给定能量条件下能够接收到最多的数据。这是由于 LEACH-C 协议采用中心控制模式,由基站通过收集各个节点的信息来作出节点选择的判断,因此 LEACH-C 协议能够通过分析所有节点的信息,做出最优判断。但是与 LEACH 协议相比较,优化算法考虑了距离、剩余能量以及节点度等诸多因素,其性能优于 LEACH 协议。与 LEACH 协议随机选取簇头的机制相比,优化算法通过考虑本地信息等各方面因素,从而做出了更优的簇头选择。

图6显示了不同算法的网络生存周期。

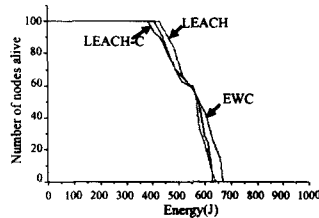


图6 网络生存周期

从图6中可以看出,基于综合因素的分布式优化算法具有最长的网络生存周期。这是由于优化算法更合理地进行了簇头选择,从而减少了数据传输中的能量损耗,延长了网络生存周期。

结束语 提出了一种基于综合因素的分布式簇头选举算法。算法通过在簇头选举过程中考虑距离、剩余能量等综合因素,改善了 LEACH 协议簇头选举过程中的缺点,均衡了网

络负载并且延长了网络生存周期。在此算法中,每个影响因素都分配有一个系数。通过对系数的调整能够使算法适应于不同的网络需求,从而增加了灵活性。仿真试验表明,与 LEACH 协议相比,此优化算法具有更好的性能表现、更长的网络存活时间。但是,该优化算法因为是分布式的,节点之间需要交互信息从而做出决定,所以会增加信息冗余。此外,如何有效地对系数进行分配,从而使优化算法性能更优等方面还需要更多的研究。在今后的工作中,将会在这方面进行更进一步的研究,使系数的分配更加合理,从而进一步优化系统效率。

参考文献

- [1] Heinzelman W, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks [C] // Proceeding of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. Seattle, WA, August 1999
- [2] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks [C] // Proceeding of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston, MA, August 2000
- [3] Heinzelman WR, Chandrakasan AP, Balakrishnan B. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks [C] // Proc. 33rd Hawaii Int. Conf. System Science. Maui, HI, Jan. 2000
- [4] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing [C] // Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy, July 2001
- [5] Yu Y, Estrin D, Govindan R. Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks [R]. UCLA-CSD TR-01-0023. UCLA Computer Science Department, May 2001
- [6] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power Efficient Gathering in Sensor Information System [C] // Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, March 2002
- [7] Younis O, Fahmy S. HEED: A Hybrid, Energy-efficient, Distributed Clustering Approach for Ad Hoc Sensor Networks [J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2004, 1(3): 366-379
- [8] Estrin D, et al. Next century challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks [C] // Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. Seattle, WA, August 1999

(上接第23页)

参考文献

- [1] Willinger W, Doyle J. Robustness and the Internet: Design and evolution [EB/OL]. 2002. <http://netlab.caltech.edu/Internet/>
- [2] Li J, Sung M, Xu J, et al. Large-scale IP traceback in high-speed Internet: practical techniques and theoretical foundation [C] // Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy. California, USA, 2004
- [3] Subramanian L, Padmanabhan VN, Katz RH. Geographic properties of Internet routing [C] // Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference. 2002, 6
- [4] Akella A, Seshan S, Balakrishnan H. The impact of false sharing on shared congestion management [C] // Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Network Protocols. 2003, 11
- [5] Jose M, Barcelo, Juan I, et al. Study of Internet autonomous system interconnectivity from BGP routing tables [J]. Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2004, 45(3): 333-344
- [6] 王大东, 王洪君, 王瑞军, 等. 一种基于 AS 的 Internet 拓扑模型 [J]. 计算机工程, 2005, 31(4): 23-25
- [7] West D B. 图论导引 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 1-47, 339-348
- [8] Munkress J R. 拓扑学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 2-52
- [9] Faloutsos M, Faloutsos P, Faloutsos C. On power-law relationships of the Internet topology [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1999, 29(4): 251-262
- [10] Siganos G, Faloutsos M, Faloutsos P, et al. Power laws and the AS-level Internet topology [J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2003, 11(4): 514-524