

梯度相关的无线传感器网络成簇路由协议

郭文生, 廖 勇, 熊光泽

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

【摘要】分析了梯度和成簇无线传感器网络路由协议, 确定了协议中存在的缺陷, 设计了一种基于梯度的高效节能成簇路由协议(GBCRP)。采用基于跳数的梯度建立、能量相关的成簇算法、关键节点转发和功率自适应的簇头路由等技术, 解决了无线传感器网络的节点能耗和路由失败而导致的数据传输可靠性问题。仿真实验表明, 该协议有效地延长了网络的生命周期。针对不同密度的传感器节点, 网络生命周期具有很好的稳定性, 同时该协议也具有较好的可靠性保障。

关键词 成簇算法; 能量高效; 路由协议; 无线传感器网络

中图分类号 TP393

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.03.022

Gradient-Based Clustering Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

GUO Wen-sheng, LIAO Yong, and XIONG Guang-ze

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract A routing protocol based on gradient and cluster in wireless sensor network is analyzed. An energy-efficient gradient-based clustering routing protocol (GBCRP) is proposed and evaluated. The new protocol combines the advantages of gradient and cluster. It saves the energy and improves the reliability by the technologies of clustering, creating gradient based on the hop, key nodes transmitting and the adaptive power optimal routing of cluster header nodes. Simulation results show that the new routing protocol provides longer lifetime and higher reliability.

Key words clustering algorithms; energy efficiency; routing protocol; wireless sensor network

无线传感器网络由大量的无线传感器节点组成, 广泛应用于环境监测、办公室智能化、战场监视以及交通流量监测等^[1]。节点间通过低功耗的无线通信方式进行信息传递, 每个节点的MCU、存储空间、电池能量等资源都非常有限, 其路由协议具有不同的性能要求, 其中能耗要求一直是其最重要的性能要求之一^[2]。同时, 障碍物、无线通信距离和部分节点死亡等特性对无线传感器网络的路由产生极大的影响, 路由失败将直接导致节点等效死亡。为了保证无线传感器网络长时间有效的运行, 必须研究精巧、高效的路由协议保证网络生命周期, 提高数据传输的可靠性。

1 相关技术

文献[3-5]基于无线传感器网络数据流向Sink节点的定向特性, 提出了基于梯度的路由协议(gradient-based routing protocol, GBR), 该协议根据

节点到Sink节点的距离、跳数或能量开销等信息定义节点的梯度, 所有节点在发送数据到Sink节点的过程中, 选择一个较低梯度的节点进行数据转发。文献[6]为了提高数据传输的可靠性, 提出了具有鲁棒性的改进协议GRadiant broadcast(GRAB)。该协议在数据转发的过程中允许多个低梯度节点同时转发数据, 形成多路径路由转发的拓扑结构, 提高数据传输的可靠性。文献[7-11]提出并分析了基于簇的路由协议, 通过采用成簇和数据融合的方式降低路由转发的能量消耗。

但是, 基于梯度的转发方式将导致梯度越小的节点转发的数据越多, 消耗的能量越高, 进而降低网络的生命周期。同时, GRAB的多路由广播转发方式将导致二次转发冲突, 引起数据丢失, 降低数据传输的可靠性。

文献[9]提出了一种高效节能的路由协议LEACH, 采用簇的方式进行路由, 将路由协议划分

收稿日期: 2008-03-07; 修回日期: 2008-09-21

基金项目: 国家863计划(2006AA01Z173); 2007年粤港关键领域重点突破项目

作者简介: 郭文生(1976-), 男, 在职博士生, 主要从事无线传感器网络、实时网络技术与应用等方面的研究。

成节点设置和稳定工作两个阶段。在设置阶段, 它将节点划分成若干个簇, 每个簇中有1个簇头和多个一般节点, 簇头随机选举产生, 每个节点属于一个簇; 在稳定工作阶段, 它接收本簇内所有非簇头节点的数据, 并结合自身的监测数据进行数据融合, 然后将数据直接传输到Sink节点。簇头负责所有本簇内节点的数据接收和融合, 所以簇头的能量消耗大于非簇头节点。为实现节点的能量均衡消耗, LEACH协议还提出“轮”的概念, 即一次设置和稳定工作过程为一轮。每一轮使用不同的节点作为簇头, 以实现所有节点的能量开销平衡。但是该协议中簇头节点与Sink节点之间的数据传输采用直接传输的方式, 导致簇头节点能量的快速消耗。

基于LEACH协议, 文献[10]提出了更高效的能量相关成簇算法DEEG, 基于能量和邻居节点信号强度的簇头竞争机制, 同时对簇头到Sink的数据路由使用了近似最小汇集树的方式, 改进了簇头到Sink节点的通信, 延长了无线传感器网络的生命周期。

为适应异构能量的节点簇头选择, 文献[11]对DEEG协议中的成簇算法进行了改进, 提出了EADEEG协议, 引入了基于无线覆盖节点平均能量确定簇头的算法, 从而提升了异构能量的簇头选择性能。但是对于孤立簇的问题, 它使用孤立簇头直接发送信息到Sink节点的方式增加了节点的能耗。

在成簇算法中假设簇头都可以与Sink节点直接进行通信, 而在实际应用中无法保证其假设条件, 如簇头与Sink节点之间存在障碍物时, 簇头节点无法将数据发送给Sink节点, 从而导致选路失败。

针对上述路由协议及其存在的不足, 本文提出了一种基于梯度的成簇路由协议GBCRP, 通过成簇和基于能量的低梯度关键节点的动态选择, 均衡节点的能量开销, 延长网络的生命周期; 结合梯度建立的方式, 实现转发节点的连通性, 保障网络可路由, 提高可靠性。

2 GBCRP协议描述

GBCRP协议首先通过节点跳数广播建立梯度, 并记录相邻节点的能量信息。基于跳数的梯度建立可以检测并解决选路失败的问题。节点根据能量信息建立簇。所有簇成员只与簇头进行直接通信, 再由簇头和基于跳数选择的关键节点将数据路由由转发到Sink节点。

为均衡节点的能量负载, GBCRP协议采用了成簇协议中的按轮运行机制, 每一轮分为梯度建立和

成簇路由两个阶段, 每一轮由Sink节点触发初始化设置。

2.1 梯度建立

节点采用基于跳数的梯度生成方式, 所有节点根据接收到的梯度, 确定节点的梯度, 并记录相邻节点的地址、梯度和能量状态。

(1) 初始化时, Sink节点梯度 G_{sink} 设置为0, 能量 E_{sink} 为无穷大; 其他节点梯度 G_i 设置为无穷大, 能量设置为节点当前的能量值。Sink节点以半径 R 广播自己的梯度信息 G_{sink} 和能量信息 E_{sink} 。其他节点 i 收到广播信息后, 利用以下步骤进行处理。

(2) 节点 i 收到节点 n (发送梯度建立消息的节点)的梯度建立消息时, 保存节点 n 的地址、梯度和能量状态。如果收到的梯度 G_n 小于节点自身的梯度 G_i , 则将自身的梯度设置为 G_n 加1, 并以半径 R 广播自己新的梯度信息 G_i 和能量信息 E_i ; 否则不广播。

在梯度建立的过程中, 节点都会以半径 R 为参数设置自己的梯度值。 R 越大, 节点设置的梯度越小; 反之越大, 即梯度与无线广播半径 R 成反比。同时, 梯度值也代表了节点到达基站所需的最小跳数。

梯度建立结束时, 节点将存在获得梯度和未获得梯度两种状态。对于获得梯度的节点将记录所有梯度相邻节点的地址和能量信息, 对于未获得梯度的节点将在簇形成后进行相应的处理。

2.2 基于簇的路由机制

基于簇的路由机制分为成簇、簇间路由选择和数据聚集转发3个阶段。成簇阶段采用基于能量的成簇算法确定簇头和簇成员; 簇间路由选择阶段获得簇头的数据转发路径; 数据聚集转发阶段实现簇内数据聚集和聚集数据转发到Sink节点。

2.2.1 能量自适应的成簇算法

为了延长网络的生命周期, 均衡节点的能量开销, 在成簇过程中采用基于能量的簇头选择算法。节点根据所有相邻节点的剩余能量和节点自身的剩余能量计算平均剩余能量。基于平均剩余能量和节点自身剩余能量确定声明自己为簇头的时刻, 簇头声明广播数据的无线通信半径设置为 R 。具有高剩余能量的节点将会优先发送簇头声明广播, 其他节点收到广播后, 选择最优的簇头进行注册, 成为某个簇的成员。

簇头声明广播的时刻计算如下:

$$t = k \times \frac{E_{\text{avg}}}{E_{\text{avg}} + E_{\text{residual}}} \times T \quad (1)$$

式中 k 为[0.9~1]之间的随机值; E_{avg} 为平均剩余能

量; E_{residual} 为节点自身的剩余能量; T 为簇头声明持续时间。

由式(1)可知, 在同一个簇范围内, 如果节点剩余能量越大, 则 t 越小, 即越早发送簇头声明广播, 成为簇头的概率越大; 并且, 通过引入随机数 k , 可以在一定程度上降低声明簇头时产生的无线冲突。

如果节点在自身簇头声明时刻 t 之前收到1个簇头声明广播, 则节点不再发送簇头声明; 当 T 时刻到达后, 节点以高能量优先的原则加入簇, 即如果1个节点同时收到两个簇头的广播, 则节点选择能量较高的节点作为簇头。

簇生成后, 簇头根据簇成员的数量为每个成员节点分配时隙, 所有成员节点根据获得的时隙以半径 R 进行簇内通信。

2.2.2 功率自适应的簇头路由算法

为均衡节点之间的能量开销差异, 簇头路由过程中引入了关键节点和基于距离的发射功率自适应的数据转发机制。

成簇后簇头节点选择能量较高的低梯度节点作为关键节点。如果关键节点是簇外成员, 则簇头通知其成为关键节点, 并设置该节点为入口默认网关, 入口默认网关在簇内聚集阶段将自身数据发送到所属簇头; 如果关键节点是簇成员, 则成为簇聚集数据的出口默认网关, 负责聚集数据转发。出口默认网关在簇内聚集阶段无须发送数据到簇头, 但是需要对自身所属簇头传输的数据进行数据融合后再转发。入口和出口默认网关为实现数据转发, 也要选择一个能量较高的上级节点作为关键节点, 并且通知其作为聚集数据转发节点。在入口和出口默认网关选择关键节点时, 首先选择低梯度的簇头节点, 否则选择低梯度的能量较高的其他簇成员节点。如果默认网关选择的关键节点是簇头, 则无须其他的操作; 否则, 将低梯度的关键节点定义为转发默认网关, 转发默认网关在聚集数据转发阶段负责转发数据。

对于未获得梯度的簇头节点将无法选择关键节点, 此时簇头节点需要增加自己的发射半径为最大无线发射半径, 以使簇头基于距离最近的关键节点的梯度确定自身梯度, 并且在收到响应信息后, 将根据低梯度节点的距离自适应的调整发射功率, 从而缩小冲突范围, 降低能量开销。同时, 该簇头向相邻的其他未获得梯度的簇头广播自己的新梯度信息, 实现连通性网络。相邻簇头根据接收到的梯度更新自身梯度, 并选择1个低梯度的能量较高或距离

较近的簇头作为数据转发节点。

2.2.3 数据聚集转发

在数据聚集和转发的过程中, 簇头节点负责收集簇内成员的监测信息, 并进行数据融合。簇头节点基于簇头路由算法选择的关键节点进行数据转发。基于监测信息的区域相关性, 在数据转发的过程中, 转发节点不对转发的数据进行数据融合, 而是直接进行路由转发。

3 协议性能分析

本文将基于GlomoSim仿真平台对GRAB、EADEEG和GBCRP协议的生命周期和可靠性进行仿真分析。

仿真中, 能量消耗采用GlomoSim仿真平台中所使用的计算公式为:

$$W_{\text{send}} = t(\varepsilon \times \text{txPower_mW} + E_{\text{elec}}) \quad (2)$$

$$W_{\text{recv}} = tE_{\text{elec}} \quad (3)$$

式中 W_{send} 为发送数据消耗的能量; W_{recv} 为接收数据消耗的能量; t 为发送或接收数据的时间; ε 为发送增益系数; txPower_mW为距离相关的单位时间发送能耗; E_{elec} 为单位时间发射电路的耗损能量。

根据上述能量消耗计算公式, 本文确定的仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数

参数	取值
网络尺寸/m	100×100
节点数量/个	10、20、30、40
节点分布模式	RANDOM
Sink节点坐标	(50, 0)
无线通信模型	TWO-WAY
节点初始能量/mW·s	5 000
发射或接收电路耗损能量/mW·s ⁻¹	900
发射增益系数 ε /s	16
链路层协议	CSMA
链路带宽/b·s ⁻¹	2 000 000
梯度建立广播半径/m	35.29
节点最大发送距离/m	99.47
设置消息数据长度/byte	80
监测数据长度/byte	512

在能耗计算时, 仿真实验中只包括数据发送和接收所消耗的能量, 不计算监听和休眠的能量(因为不同的协议可以采用不同的监听睡眠策略)。

3.1 生命周期

在生命周期的仿真实验中, 本文将对无线传感器网络运行过程中节点死亡的情况进行了对比分析, 节点按轮运行, 每轮发送10个数据, 仿真结果如图1~图4所示。

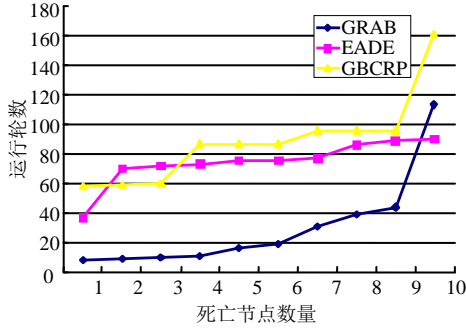


图1 10节点生命周期

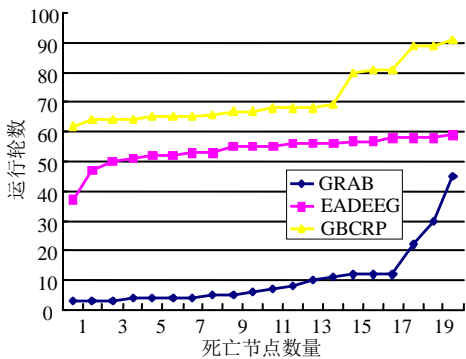


图2 20节点生命周期

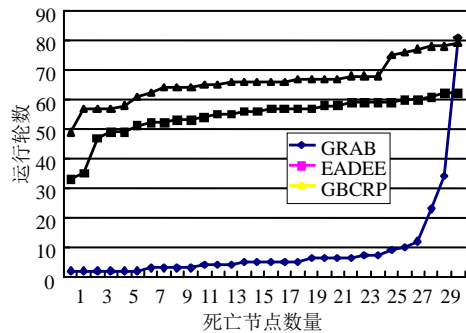


图3 30节点生命周期

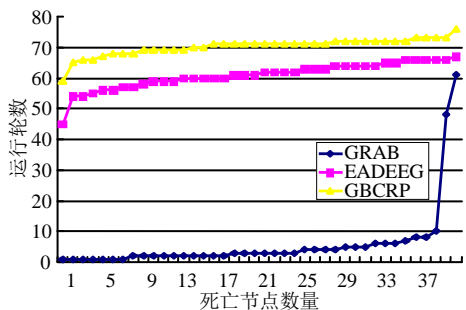


图4 40节点生命周期

图1~图4分别描述了不同节点数量的实验环境下, 无线传感器网络的生命周期。仿真结果表明, GBCRP协议通过引入梯度、关键节点和簇头发射功

率自适应等机制有效地提高了网络的生命周期, 并且节点数量对GBCRP协议的存活时间影响较小, 说明该协议具有较好的可扩展性。

3.2 可靠性

在可靠性仿真实验中, 所有的传感器节点周期性地产生数据, 并将数据发送到Sink节点。Sink节点接收到的数据与所有节点发送数据总量的百分比如图5所示。

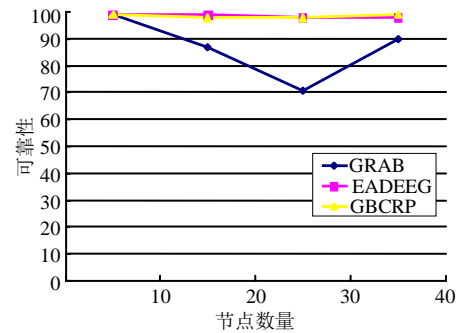


图5 不同节点数量可靠性

上述结果表明, 在无障碍物无线传感器网络通信时, GBCRP和EADEEG路由协议能够达到接近于1的可靠性; 而GRAB的多路径转发协议虽然在理论上具有可靠性的特性, 但由于其采用广播转发的方式缺乏确认机制, 并且多节点的转发带来大量的二次冲突, 从而导致可靠性并不理想。如果无线传感器网络布置在具有障碍物的环境下, GBCRP协议通过梯度的方式仍然能够实现节点可路由的特性, 可靠性影响较小; 而EADEEG协议要求所有节点都要与Sink节点直接进行通信, 所以会导致可靠性降低。

4 结束语

由于GBCRP协议使用跳数作为确定梯度的参数, 而基于跳数建立的梯度能够保障所有节点的梯度形成一个连续的梯度空间, 从而有效地避免了选路失败而导致的数据可靠性问题。降序的梯度路径上进行数据转发, 减少了中间节点的转发次数, 避免了转发回路。采用成簇算法和基于关键节点的路由机制均衡了节点的能量开销, 延长了网络的生命周期。仿真结果表明, GBCRP协议具有高效节能的特性和很好的可靠性。

参考文献

[1] AKYILDIZ I, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.

[2] 李建中, 李金宝, 石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J]. 软件学报, 2003, 14(10): 1717-1727.

- LI Jian-zhong, LI Jin-bao, SHI Sheng-fei. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(10): 1717-1727.
- [3] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(1): 2-16.
- [4] LI Xia, CHEN Xi, GUAN Xiao-hong. A new gradient-based routing protocol in wireless sensor networks[J]. LNCS 3605, 2005: 318-325.
- [5] FAN Ye, CHEN Alvin, LU Song-wu, et al. A scalable solution to minimum cost forwarding in large scale sensor networks[C]//Proceedings of Tenth International Conference on Computer Communications and Networks. Arizona: IEEE Communications Society, 2001.
- [6] FAN Ye, ZHONG Gary, LU Song-wu. Gradient broadcast: A robust data delivery protocol for large scale sensor networks[J]. Wireless Networks, 2005, 11(3): 285-298.
- [7] 沈波, 张世永, 钟亦平. 无线传感器网络分簇路由协议[J]. 软件学报, 2006, 17(7): 1588-1600.
- SHEN Bo, ZHANG Shi-yong, ZHONG Yi-ping. Cluster-based routing protocols for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2006, 17(7): 1588-1600.
- [8] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [9] 刘明, 龚海刚, 毛莺池, 等. 高效节能的传感器网络数据收集和聚合协议[J]. 软件学报, 2005, 16(12): 2106-2116.
- LIU Ming, GONG Hai-gang, MAO Ying-chi, et al. A distributed energy-efficient data gathering and aggregation protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2005, 16(12): 2106-2116.
- [10] 刘明, 曹建农, 陈贵海, 等. EADEEG: 能量感知的无线传感器网络数据收集协议[J]. 软件学报, 2007, 18(5): 1092-1109.
- LIU Ming, CAO Jian-nong, CHEN Gui-hai, et al. EADEEG: an energy-aware data gathering protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2007, 18(5): 1092-1109.

编辑 黄莘

(上接第396页)

- [5] BOYKO D, MACKENZIE P, PATEL S. Provably secure password-authenticated key exchange using diffie-Hellman [C]//Proceedings of Eurocrypt'01, LNCS1807. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 156-171.
- [6] 谭示崇, 张宁, 王育民. 新的口令认证密钥协商协议[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(1): 17-19.
- TAN Shi-chong, ZHANG Ning, WANG Yu-min. A new password-based authenticated key agreement protocol[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(1): 17-19.
- [7] GOLDREICH O, LINDELL Y. Session-key generation using human passwords only[C]//Proceedings of Crypto'01, LNCS2139. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 408-432
- [8] 殷胤, 李宝. 标准模型下可证安全的加密密钥协商协议[J]. 软件学报, 2007, 18(2): 422-429.
- YIN Yin, LI Bao. Provable secure encrypted key exchange protocol under standard model[J]. Journal of Software, 2007, 18(2): 422-429.
- [9] BECKER K, WILLE U. Communication complexity of groupkey distribution[C]//Proc of the 5th ACM Conference on Computer and Communications Security. New York, USA: ACM Press, 1998: 1-6.
- [10] ASOKAN N, GINZBOORG P. Key agreement in Ad hoc networks[J]. Proc of the Journal of Computer Communications, 2000, 23(17): 1627-1637.
- [11] BRESSON E, CHEVASSUT O, POINTCHEVAL D. Group diffie-hellman key exchange secure against dictionary attack[C]//Proceedings of Asiacrypt '02, LNCS 2501. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 497-514.
- [12] KIM H J, LEE S M, LEE D H. Constant-round authenticated group key exchange for dynamic groups[C]// Proceedings of Asiacrypt '04, LNCS 3329. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 245-259.
- [13] DUTTA R, BARUA R. Password-based encrypted group key agreement[J]. International Journal of Network Security, 2006, 3(1): 30-41.
- [14] LEE Su-mi, HWANG Jung-yeon, LEE Dong-hoon. Efficient password-based group key exchange[C]// Proceedings of 1th International Conference, LNCS 3184. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 191-199.
- [15] ABDALLA M, BRESSON E, CHEVASSUT O. Password-based group key exchange in a constant number of rounds[C]//Proceedings of PKC 2006, LNCS 3958. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 427-442.
- [16] BURMESTER M, DESMEDI Y. A secure and efficient conference key distribution system[C]// Proceedings of Eurocrypt '94, LNCS 2356. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 275-286.

编辑 熊思亮