

一种基于能耗度量的融合树构建算法

孙大洋^{1 3} 刘衍珩^{1 2} 王爱民^{1 2}

¹(吉林大学计算机科学与技术学院 长春 130012)

²(吉林大学符号计算与知识工程教育部重点实验室 长春 130012)

³(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)

(www.sunday@gmail.com)

An Aggregation Tree Constructing Algorithm Based on Energy Consumption Assessment

Sun Dayang^{1 3}, Liu Yanheng^{1 2}, and Wang Aimin^{1 2}

¹(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012)

²(Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012)

³(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract This paper first gives an analysis of data aggregation and data compression based on energy consumption of sensor nodes, after which an approach is proposed to construct an aggregation tree in the case of non-perfect aggregation, since GIT considers only the case of perfect aggregation and it does not work well if the aggregation is non-perfect. An assessment scheme that can get the information of hops from the aggregation point to the sink and the hops from the aggregation point to the source node is used to construct such an aggregation tree. Moreover, the energy consumption of the aggregation is also considered. This scheme can be used when perfect aggregation cannot be performed. In this paper, an approach to reduce the cost of reinforcement is also proposed, in which the reinforcement work is done by the source nodes themselves, not by the sink node. Simulation result shows that this approach can save more energy than GIT when the aggregation ratio is small. This result also provides a theoretical limit of aggregation to tell when GIT will lose its superiority and thus gives a direction to choose among the aggregation algorithms. Another result shows that the further the sources are away from the sink, the less reinforcement messages are needed. Finally a guidance to tell when to use the ECA (energy consumption assessment) scheme is given.

Key words wireless sensor networks; data aggregation; energy efficient; GIT; path reinforcement

摘要 基于传感器节点能耗情况对数据压缩以及数据融合进行了分析,针对在非完全融合情况下,贪婪增长树(GIT)算法构建融合树时并不能很好选择最优路由的问题,提出了一种基于能耗度量的融合树构建算法,通过融合节点反馈能耗以及到达 Sink 节点的跳数信息,对多个路由的能耗进行评估,进而选择低能耗路由。同时提出了一种由信息源节点进行路径加强的策略,减小了路径加强信息量以及多路径记录带来的负担。模拟实验数据表明,该算法在数据融合压缩比较小的情况下节能效果优于贪婪增长树 GIT 算法,并且随着信息源与 Sink 节点距离的增大,路径加强信息的数量也有很大降低。

关键词 无线传感器网络;数据融合;节能;贪婪增长树;路径加强

中图法分类号 TP393

收稿日期:2007-05-31;修回日期:2007-06-26

基金项目:国家自然科学基金项目(60573128);国家教育部博士点基金项目(20060183043)

本文通信作者:刘衍珩

能量受到严格的限制是无线传感器网络同传统网络的区别之一^[1]。由于传感器节点个数多、成本要求低廉、分布区域广,而且部署区域环境复杂,有些区域甚至人员不能到达,所以传感器节点通过更换电池的方式来补充能源是不现实的。如何高效使用能源来最大化网络生命周期是传感器网络面临的首要挑战。无线传感器网络的首要设计目标是能源的高效使用^[2]。

通常情况下,处理器执行指令的能耗远小于数据传输的能耗^[2-7],所以在数据传输之前应用数据压缩或者数据融合可以有效地减小网络的能量消耗。现有的研究对适合传感器网络应用的压缩算法进行了分析^[6],考虑压缩算法访存等因素,提出了优化压缩算法的方法^[7],但没有考虑数据多跳传输问题。文献[8]提出了基于区间小波变换的混合熵数据压缩方法,可更大程度地降低传感器节点数据传输的能耗,从而进一步延长整个网络的生命周期,但是没有考虑算法处理能耗和多跳路径问题。文献[9-10]分别从路径传输质量和路径能耗、最小化能耗来延长生存期的角度考虑了能量优化问题,但是都没有考虑数据融合。对数据融合算法的理论分析表明^[11],在完全融合(perfect aggregation)的情况下,寻找最优融合树的问题等同于求解最小 Steiner 树的 NP 完全问题。针对该 NP 问题,其中一种次优解决方案是采用 GIT(greedy incremental tree)^[11]算法,该算法可以在多项式级构建融合树,与 DD(directed diffusion)^[12]算法的随机融合机制相比,GIT 算法可以有效地节省数据传输能耗,但是该算法没有考虑非完全融合的情况。文献[13]提出了基于次优最小 Span 树的路由机制,但问题基于完全融合的假设,没有考虑非完全融合的情况。文献[14]考虑了计算处理能耗与传输能耗的权衡问题和非完全融合情况,但是没有考虑多跳总体能耗并以此构建融合树,而且权衡的计算是由 Sink 节点来完成的。

本文基于传感器节点的能耗情况对数据压缩以及数据融合的节能效果进行了讨论,对 GIT 算法进行了分析并指出该算法不适应非完全融合情况。在此基础上针对非完全融合情况提出了基于能耗度量的融合树构建算法,该算法可以在非完全融合情况下选择低能耗路由。同时,路径加强由各信息源节点完成,减小了路径加强所需要的消息数量以及 Sink 节点多路径记录的负担。

1 数据压缩以及数据融合的节能分析

1.1 数据压缩算法节能分析

在传感器网络中,通过对数据进行压缩处理可以有效地减小能量消耗^[6-7]。在数据传输前使用数据压缩技术,影响节能效果的因素主要有以下几个方面:

1) 信息压缩比 r 定义为 $r = \text{平均源信息长度} / \text{平均压缩编码长度}$ ^[15]。压缩算法的压缩比越大最终需要传输的数据量越小,传输过程中的能耗越小;同时,压缩比增大会导致压缩算法的指令数增加,增大微处理器计算过程的能耗。

2) 压缩算法的节点处理能耗 $E_c(m)$,其中 m 为进行压缩的信息量。进行压缩的信息量越大执行压缩的指令数就越多,压缩算法的能耗就越大。

3) 无线传输通信距离 d 。在此我们使用自由空间(freespace)模型和多路径衰减(multi-path fading)模型,当发送节点和接收节点之间的距离 d 小于某个值 d_0 时,采用自由空间模型,发射功率呈 d^2 衰减;否则采用多路径衰减模型,发射功率呈 d^4 衰减^[16]。

4) 数据传输的路径长度 h 。通过使用数据压缩技术,减小了每一跳数据传输过程的能耗,数据传输的路径长度越长,减小的数据传输的能耗就越多,数据传输过程中的能耗减少量同路径长度成正比,如图 1 所示:

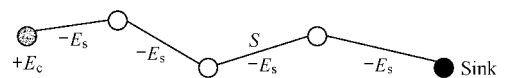


Fig. 1 Impact of hops on energy consumption.

图 1 路径长度对节能效果的影响

假设数据从数据源经过 h 跳到达 Sink 节点,多跳路径之间的路径长度为定值,执行数据压缩的节点处理能耗为 E_c ,数据量减少一跳节能为 E_s ,则当满足下式时即能达到总体节能效果:

$$E_c < hE_s. \quad (1)$$

设 1 b 数据传输 d 米能耗为 $e(d)$,对于 m b 信息,节点处理能耗为 $E_c(m)$,压缩比为 r ,则:

$$E_s = m(1 - 1/r)e(d). \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得:

$$E_c(m) < m < h(1 - 1/r)e(d). \quad (3)$$

式(3)即可作为压缩算法节能效果的评估公式。

1.2 数据融合算法节能分析

传感器网络是由大量密集传感器节点覆盖到

监测区域所组成的. 大量密集传感器节点导致了网络信息存在一定程度的冗余. 在冗余程度很高的情况下, 通过数据融合对冗余数据进行网内处理, 可以有效地减小需要传输的数据量, 从而达到节能的效果. 通过采用数据融合方法达到节能效果受到以下因素的影响:

- 1) 融合算法的信息压缩比 r , 这里, $r = \text{平均输入信息长度} / \text{平均输出信息长度}$;
- 2) 融合算法的节点处理能耗 $E_c(m)$, 其中 m 为进行数据融合的信息量;
- 3) 无线传输通信距离 d , 在此我们使用第 1.1 节中使用的无线信道传输模型;
- 4) 融合树的拓扑结构. 与数据压缩相比, 数据融合达到的节能效果不再简单地与传输路径长度有关. 由于融合算法发生的节点不是信息源节点, 融合节点的选取将导致多个路由的产生, 各个路径的能耗情况与融合节点的选取有关.

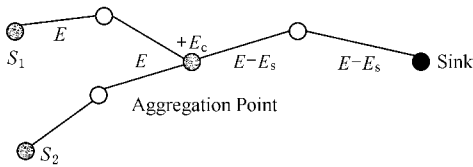


Fig. 2 Impact of aggregating point on energy consumption.

图 2 融合节点对路由能耗的影响

如图 2 所示, 考虑融合节点只对两个信息源节点信息进行融合的简单情况, 设 m_1 为 S_1 节点发送的信息量, m_2 为其他节点发送到融合节点的信息量, 把信息量的减少单纯地看做是 m_1 信息量的减少量, 假设融合节点到 Sink 节点的跳数为 h , 信息源节点到融合节点的跳数为 k , 源数据传输一跳能耗为 E , 则信息 m_1 从信息源节点 S_1 传送到 Sink 的路由能耗为

$$W = (k + h)E + E_c - hE_s. \quad (4)$$

由式(2)(4)得:

$$W = (k + h)m_1\epsilon(d) + E_c(m_1 + m_2) - h(m_1 + m_2)(1 - 1/r)\epsilon(d). \quad (5)$$

式(5)可以作为融合算法路由选择的评估公式.

2 GIT 算法分析

在 GIT 算法中, 融合树是逐步建立的. 最初的融合树仅由 Sink 节点和与之最近的信息源节点之间的最短路径构成. 随后的每一步, 算法选取距离当

前融合树最近的信息源节点加入到融合树中, 直到所有的信息源节点都加入到融合树中.

GIT 算法适合于完全融合(perfect aggregation)情况, 但是在数据融合为非完全融合的情况下, 使用 GIT 算法所选择的路由并不一定是低能耗路由. 在数据融合算法为非完全融合的情况下, 不能简单地根据到达当前融合树的能耗来选择节能路由, 信息源节点传送信息的路由能耗与第 2 节中讨论的各因素有关, 如图 3 所示, 路径 B 有可能是一条比路径 A 能耗低的路由. 特别地, 在路径 A 与路径 B 能耗相同的情况下, 从整个网络可生存性的角度看, 频繁使用一条路径进行传输会使得该路径上节点能量急剧下降, 最坏情况下将导致网络分裂为几个孤立网络^[17-18]. 非完全融合情况下, 节能路由的选择应该综合考虑影响节能效果的各个因素.

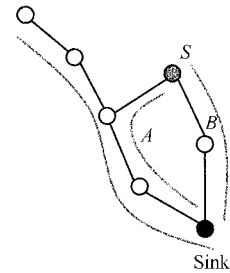


Fig. 3 Path chosen by GIT.

图 3 GIT 算法选路

GIT 算法通过 Sink 节点发送路径加强信息来加强选择路由, Sink 节点一旦收到一个新的探测事件不会马上加强这一路由, 而是建立一个加强路由计时器, 来触发 Sink 节点, 加强那些发送了探测事件或者能够导致最低能耗路由的邻居节点. 如果探测事件的能量耗费同增加耗费消息的值相等, 就加强发送探测事件的邻居节点^[11]. 这种方式要求 Sink 节点对每个探测事件都需要记录, 如果存在 n 个信息源节点, Sink 节点需要记录 n 个节点的信息进行路径加强. 同时, 路径的加强信息由 Sink 节点来完成, 当 Sink 节点距离数据融合节点跳数很大时, 路径加强的过程就造成了不必要的通信开销.

3 基于能耗度量的融合树构建算法

针对非完全融合情况下 GIT 算法选路缺陷以及路径加强过程中不必要的通信开销问题, 本文综合考虑了影响融合算法节能效果的各个因素, 提出了基于能耗度量(energy consumption assessment)的

融合树构建算法,通过对多路由能耗进行度量对比选择低能耗路由,采用信息源节点进行路径加强的策略,可以有效减少 Sink 节点与融合节点之间的通信开销。

算法思想:融合树上每个节点记录到达 Sink 节点的跳数,由融合节点向信息源节点返回融合节点到达 Sink 节点跳数、信息源节点到达融合树的跳数以及融合节点进行数据融合时的能耗信息,由信息源节点使用第 2 节给出的节能度量方法进行路由能耗度量并选择加强路由,该算法的一个情景如图 4 所示:

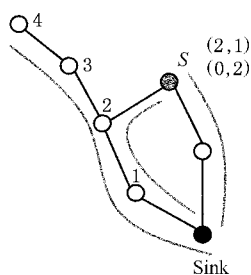


Fig. 4 Path chosen by ECA.

图 4 ECA 算法选路

算法步骤:

1) Sink 节点通过广播兴趣信息在传感器网络中建立梯度信息,梯度上的每个节点记录该节点到达 Sink 节点的跳数信息;

2) 逐步建立融合树,首先选择距离 Sink 节点最近的信息源节点,标记该节点与 Sink 节点之间的能耗最低路由,此路由作为最初融合树;

3) 信息源节点发送探测事件消息,当前融合树上任何收到探测事件的节点都向该信息源节点发送该节点距离 Sink 节点的跳数以及融合算法的能耗信息,并在传递信息的过程中,累加信息源节点到该节点的跳数;

4) 信息源节点根据收到的距离融合节点跳数以及融合节点距离 Sink 节点跳数使用式(5)度量,选择最优节能路由并加强该路由,标记该路由,使之加入到融合树中;

5) 重复 3) 4),直到所有信息源节点都加入到融合树中。

4 模拟实验分析

为了对算法进行具体的分析,我们对算法进行了模拟实验。在一个 100×100 的区域中随机部署

了 400 个节点,并随机指定 5 个信息源节点, Sink 节点设置在坐标原点。给定一个线性融合函数,即融合结果 bit 数为融合数据包内的数据项的线性函数 $r_c(S_i) = d_i \times |x| + h$,其中 S_i 为融合节点, d_i 是融合数据中数据项数目,每个数据项的数据位长度为 $|x|$,数据包头长度为 h ,通过改变 h 和 x 的值来模拟融合算法的信息压缩比的变化情况。ECA 算法通过使用信息反馈机制进行比较并确定融合节点。由于融合节点使用了包头融合算法,该融合算法处理简单,故在模拟中忽略了其能耗代价,另外路由选择是通过多路径能耗比较完成的,公式简单,计算代价较小,故在模拟中其能耗代价也被忽略。最终将实验结果同 GIT 算法进行了比较,如图 5 所示,其中横坐标为融合算法的信息压缩比,纵坐标为算法事件平均能耗(average dissipated energy^[11])。由图 5 可见,在融合算法信息压缩比较小的情况下,ECA 算法的节能效果优于 GIT 算法。

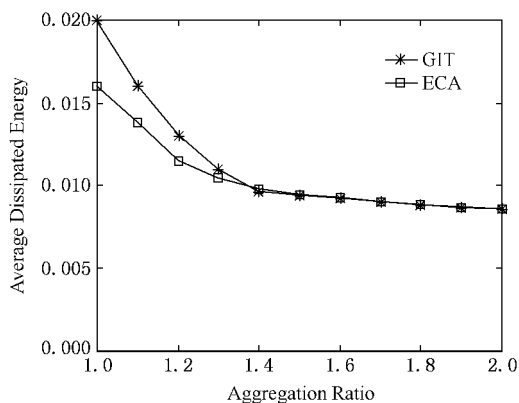


Fig. 5 ECA/GIT Energy dissipation.

图 5 ECA/GIT 算法能耗比较

另外,为了说明路径加强信息的数目同信息源与 Sink 节点距离之间的关系,在一个 100×100 的矩形区域内均匀随机部署了 10000 个传感器节点,并随机设定一个 10×10 区域中的 5 个节点为数据源,并将实验结果与 DD 算法进行了比较,如图 6 所示。图 6 的横坐标为信息源节点距离 Sink 节点的平均跳数,纵坐标为 ECA 算法和 DD 算法路径加强数据包的数目。由图中数据可见,当事件源距离 Sink 节点较近时,ECA 算法和 DD 算法所需要的路径加强的消息数目是接近的,但是随着距离的增大,ECA 算法的优势就显现出来。

在算法能耗比较实验相同的条件下,针对信息源节点的分布情况做了模拟实验。这些实验表明,当信息源节点比较集中的情况下,使用 ECA 算法

可以达到如图 5 所示的结果,但是当信息源节点比较分散、所有信息源节点到 Sink 节点的传输路径并没有交叉的情况下,并不适合使用该算法.另外,ECA 算法在融合节点的确定过程中需要一定的反馈延迟,所以 ECA 算法适合于对数据延迟要求并不十分苛刻的情形.

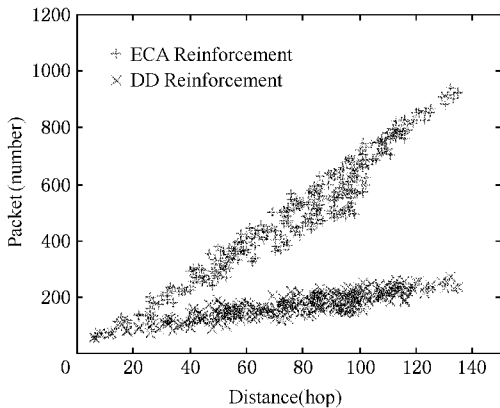


Fig. 6 Reinforcement packet number.

图 6 路径加强消息数目的比较

5 结 论

ECA 算法是一种针对非完全融合情况的融合树构建方法,该方法通过融合节点反馈能耗以及到达 Sink 节点的跳数信息,由信息源节点对多个路由的能耗进行评估,进而选择低能耗路由.同时 ECA 使用了一种由信息源节点加强路径的方法,该方法可以有效地减少路径加强过程中产生的消息数.模拟实验结果表明,ECA 算法能够根据路径信息评估并选择低能耗路由,在融合算法信息压缩比较小的情况下,其节能效果优于 GIT 算法;同时该算法减小了路径加强需要发送的消息数,随着事件源与 Sink 节点距离的增大,减小的消息量也呈现增大的趋势.

参 考 文 献

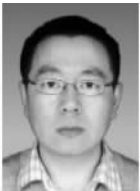
[1] Bhaskar Krishnamachari, Deborah Estrin, Stephen Wicker. Modeling data-centric routing in wireless sensor networks[C]. In: I Stojmenovic, S Olariu, eds. Proc of the IEEE INFOCOM 2002. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 2002. 2-14

[2] Sun Limin, Li Jianzhong, Chen Yu, et al. Wireless Sensor Network[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese)

(孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005)

- [3] J M Kahn, R H Katz, K S J Pister. Emerging challenges: Mobile networking for smart dust [J]. Journal of Communications and Networks, 2000, 2(3): 188-196
- [4] V Raghunathan, C Schurgers, S Park, et al. Energy-aware wireless microsensor networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(2): 40-50
- [5] G J Pottie, W J Kaiser. Embedding the Internet: Wireless integrated network sensors [J]. Communications of the ACM, 2000, 43(5): 51-58
- [6] Naoto Kimura, Shahram Latifi. A survey on data compression in wireless sensor networks [C]. In: Proc of the Int'l Conf on Information Technology: Coding and Computing. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 2005. 8-13
- [7] Kenneth Barr, Krste Asanović. Energy aware lossless data compression [G]. ACM Trans on Computer Systems, 2006, 24(3): 250-291
- [8] Xie Zhijun, Wang Lei, Lin Yaping, et al. An algorithm of data aggregation based on data compression for sensor networks [J]. Journal of Software, 2006, 17(4): 860-867 (in Chinese) (谢志军,王雷,林亚平,等. 传感器网络中基于数据压缩的汇聚算法 [J]. 软件学报, 2006, 17(4): 860-867)
- [9] Olga Saukh, Pedro José Marrón, Andreas Lachenmann, et al. Generic routing metric and policies for WSNs [C]. In: Proc of 3rd European Workshop on Wireless Sensor Networks. Berlin: Springer, 2006. 99-114
- [10] Noseong Park, Daeyoung Kim, Yoonmee Doh, et al. An optimal and lightweight routing for minimum energy consumption in wireless sensor networks [C]. In: Proc of the 11th IEEE Int'l Conf on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications. New York: IEEE Computer Society Press, 2005. 1533-2306
- [11] Chalermek Intanagonwiwat, Deborah Estrin, Ramesh Govindan, et al. Impact of network density on data aggregation in wireless sensor Networks [C]. In: Proc of the 22nd Int'l Conf on Distributed Computing Systems. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 2002. 457-458
- [12] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, Deborah Estrin. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks [C]. In: Proc of the ACM MOBICOM. New York: ACM Press, 2000. 56-67
- [13] Hüseyin, Özgür Tan, İbrahim Körpeoğlu. Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks [J]. ACM SIGMOD Record, 2003, 32(4): 66-71
- [14] I Kadayif, M Kandemir. Tuning in-sensor data filtering to reduce energy consumption in wireless sensor networks [C]. In: Proc of Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 2004. 1530-1591
- [15] Eebra A Lelewer, Daniel S Hirschberg. Data compression [J]. ACM Computing Surveys, 1987, 19(3): 261-296

- [16] T Rappaport. Wireless Communications :Principles and Practice [M]. Englewood Cliffs , NJ : Prentice-Hall , 1996
- [17] R Shah , J Rabaey. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks [C]. In : Proc of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Orlando : IEEE Communications Society , 2002. 350-355
- [18] M Julius Hossain , Oksam Chae , Md Mamun-Or-Rashid , *et al.* Cost-effective maximum lifetime routing protocol for wireless sensor networks[C]. In : Proc of the Advanced Industrial Conf on Telecommunications/Service Assurance with Partial and Intermittent Resources Conference/E-Learning on Telecommunications Workshop. Los Alamitos , CA : IEEE Computer Society Press , 2005. 314-319



Sun Dayang , born in 1979. Ph. D. candidate of Jilin University. His main research interests include network security , wireless sensor network , *etc.*

孙大洋 ,1979 年生 ,博士研究生 ,主要研究

方向为网络安全、无线传感器网络。



Liu Yanheng , born in 1958. Professor and Ph. D. supervisor of Jilin University. His main research interests include network security , network management , mobile IP and QoS.

刘衍珩 ,1958 年生 ,教授 ,博士生导师 ,主要研究方向为计算机网络安全、网络管理、移动 IP 和 QoS(lyh_lb_lk@ yahoo. com. cn)。



Wang Aimin , born in 1970. Associate professor of Jilin University. His main research interests include ad hoc , network , mobile communication , multimedia communication and wireless sensor network.

王爱民 ,1970 年生 ,副教授 ,主要研究方向为自组织网络、移动通信、多媒体通信、无线传感器网络(wangam@jlu.edu.cn)。

Research Background

Power consumption is a very important issue in wireless sensor network. A lot of work has been done to diminish the network energy dissipation. Such work includes data compression , data aggregation , sleep scheduling , *etc.* The work of data aggregation results in the shift from address-centric routing schemes to data-centric ones. In this paper , further work in data aggregation is done to give great improvement. One part of the work is to construct an aggregation tree in the case of non-perfect aggregation. It is based on the fact that GIT considers only the case of perfect aggregation and it does not work well if the aggregation is non-perfect. The other part of the work is to reduce the cost of reinforcement , which gets the reinforcement work done by the source nodes themselves , not by the sink node. The work in this paper is supported by the National Natural Science Foundation of China(60573128) and the Ph. D. Programs Foundation of Ministry of Education of China(20060183043).