



无线传感器 网络能耗平衡策略的研究

注：重庆市科委自然科学基金项目资助（CSTC，2005BB2198）

摘要：无线传感器网络中存在的多对一数据流使得节点能量消耗极不平衡，严重缩短了网络的生存时间。

文章首先分析了网络中能耗不平衡的成因以及产生的影响，然后详细阐述了解决无线传感器网络能耗不均匀的几种策略，并分别指出了各种策略的特点，最后探讨了解决此类问题的发展方向。

关键词：无线传感器网络；多对一；能量空洞；能耗均衡

中图分类号：TP393 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2007)03-0032-05

►► 王亮 钟先信 石军锋

一、引言

无线传感器网络是一项新兴而先进的技术。它是由大量的廉价微型传感器节点组成，通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织网络系统，可以广泛用于国防、工业、环境、健康等多个领域。无线传感器网络中的节点能量十分缺乏，硬件资源非常匮乏，通信与计算能力有限，传感器网络节点的电池更换通常很难完成。

无线传感器网络中节点的主要任务是搜集获取外界信息，并将其通过多跳转发的方式传送到基站，基站再将数据发送到用户端。无线传感器网络的监测应用就是典型的多对一（Many-To-One）网络。通常来说，多跳转发的通信方式在能量效率和带宽利用率上要远高于直接与基站连接的通信方式。无线传感器网多对一网络的所有节点在布置完成以后几乎不移动，大量节点所采集的数据通过多跳方式流向极少数的基站，势必造成基站附近节点比远端节点要发送多得多的数据包。这种节点间负载的巨大差异使得基站附近的节点很快将能量消耗殆尽，最终造成整个网络的断裂，远端节点不能将数据发送到基站。这种存在于多对一网络中的问题被称为热点问题（Hot Spot Problem），靠近基站的节点被称为热点节点（Hot Spot Nodes）。如何减轻热点节点的负担，使所有节点的负载尽量均衡从而延长传感器网络的生命周期和提高传感器网络的工作性能，成为目前无线传感器网络研究的一个焦点。

本文阐述了目前针对多对一无线传感器网络公平性问题的研究现状与解决策略，分析比较了各种策略的优劣并对未来的发展方向进行了展望。

二、研究现状

传统的网络解决多对一问题的策略不能用于无线传感器网络。传统的网络以服务和功能为中心，一般网络的无线部分都是通过单跳的方式进行通信，而且其中的网络设备通常不受软硬件资源和电源的限制，因此可以采用强大的通信处理设备来改善多对一网络中热点节点的性能。例如经常使用的星型拓扑是一种多对一网络，为了解决数据在中心的拥塞，通常处于中心的节点较其他成员节点有更高的处理速度、更大的存储空间和更强的通信能力。而无线传感器网络在应用中以数据为中心，而且受到自身体积和环境的限制，不能简单参照传统网络的模式来解决这个问题。近年来，无线传感器多对一网络的公平性引起了学术界的关注。如何减轻热点问题，使得所有节点的负载尽量均衡以延长传感器网络的生存时间和提高网络的工作性能，成为

目前无线传感器网络中研究的一个热点。

1、量空洞 (Energy Hole Problem)

基站附近的节点由于能量消耗很快而迅速死亡,使得基站与外界失去联系,文献[1]把这种现象称之为能量空洞 (Energy Hole Problem),并建立数学模型去研究能量空洞问题。模型假设所有的节点均匀分布在 $L \times L$ 的正方形区域内(如图1),区域内节点的密度为 ρ ,基站位于这个区域的中心,所有节点按照固定的发射功率工作。将这个方形区域按照半径 nr 的等宽圆环从基站向外划分,每一个环带(最中心为圆)代表其中的节点距离中心基站具有相等的跳数,设一共有 M 个环带, $L = 2Mr$,每个节点按照相同的数据率 b 以基站为目标节点发送数据,为环序数,正中心的圆序数为0,向外依次递增。按照这样的模型,在 i 值不取很大的情况下,得出不同环中节点的负载如下:

$$Load_{ring^0} = \frac{\rho((2Mr)^2 - \pi(ir)^2)b}{\rho(\pi((i+1)r)^2 - \pi(ir)^2)} = \frac{4\frac{M^2}{\pi} - i^2}{2i+1}b \quad (1)$$

从中可以看出,节点负载只与环序数(或者距离基站的跳数)有关,而且中心的节点负载与外围相比相差很大,基站附近存在着严重的能量空洞,节点能耗随着地理位置的差异而显著不同,必须采用有效的策略来缓解这种负载不平衡的状况。下面将分别探讨几种缓解能量空洞的策略。

2、变基站的位置和增加基站的数量

基站位置对节点负载有没有影响呢?依据前面建立的模型,现在假设基站节点处于方形区域的一角,按照基站向外划分等宽扇形环(如图2),那么此时各环节点的负载是:

$$Load'_{ring^0} = \frac{\rho\left(\frac{(2Mr)^2}{4} - \frac{\pi(ir)^2}{4}\right)b}{\frac{1}{4}\rho(\pi((i+1)r)^2 - \pi(ir)^2)} = \frac{16\frac{M^2}{\pi} - i^2}{2i+1}b \quad (2)$$

其中, i 为环序数,基站所在的扇形序数为0,向外依次递增。

比较(1)式,发现在相同的条件下,此时距基站相同跳数的节点负载有较大增加,这是由于区域中总跳数增加造成热点区域节点减少而形成的。在这样的情况下,能量空洞更加严重。

由于基站具有直接与用户端通信的能力,凭直观感觉基站数量的增加有助于减少节点的负载。仍然采用上面的模型来分析,假设有四个基站,将方形区域平均分成四块小方形,如果将这四个基站放置在区域的四个角上,理想的情况下这四个区域的节点独立工作,节点的负载为:

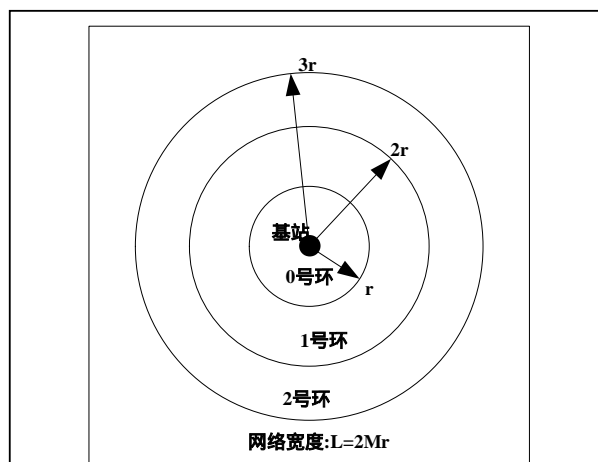


图1 基站在中心位置

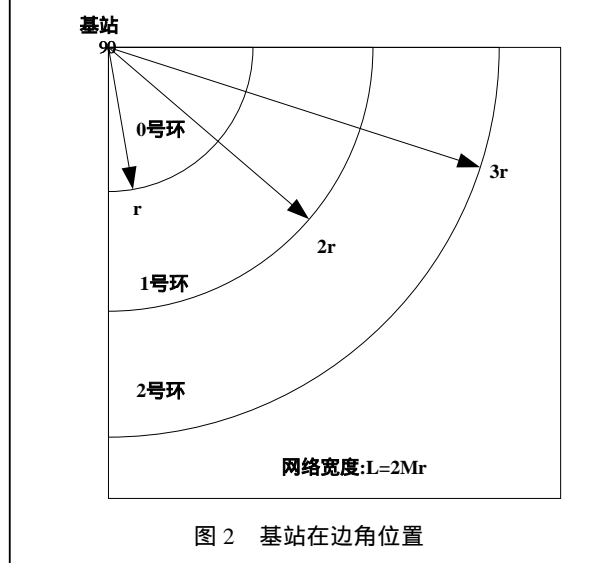


图2 基站在边角位置

$$Load''_{ring^0} = \frac{\frac{1}{4}\rho((2Mr)^2 - \pi(ir)^2)b}{\frac{1}{4}\rho(\pi((i+1)r)^2 - \pi(ir)^2)} = \frac{4\frac{M^2}{\pi} - i^2}{2i+1}b \quad (3)$$

将四个基站分别放置在这四个小区域的中心,在理想的情况下这四个区域的节点独立工作,这时节点的负载为:

$$Load'''_{ring^0} = \frac{\rho\left(\frac{1}{4}(2Mr)^2 - \frac{\pi(ir)^2}{4}\right)b}{\rho(\pi((i+1)r)^2 - \pi(ir)^2)} = \frac{\frac{M^2}{\pi} - i^2}{2i+1}b \quad (4)$$

比较(1)、(2)、(3)、(4)式,发现增加基站的数量能够增加能量空洞内节点的数量,使得这部分节点能量消耗减慢,有助于提高网络的使用寿命。

在理论上,在均匀分布的固定发射功率的网络中,节点负载只与节点跳数以及基站的位置和数量有关,与区域中



节点分布的密度无关, 基站应尽量放置在网络的中心位置。

前面都是在假设基站布置后位置不能移动的前提下讨论的。如果网络中基站位置可以按照要求移动的话, 可以消除节点能耗不平衡的状况, 但是频繁移动基站会造成网络拓扑的频繁变化, 使得路径发现的代价升高, 增大了整个网络的功耗。文献[5]提出了一种 TTDD 算法, 对多个移动基站在网络中的使用进行了探讨。文献[10]通过线性规划的方式求解网络最大生存时间, 分析基站应如何移动才能获得最优得网络生存时间和平衡网络的能量消耗, 并提出了相应的能效路由算法。

改变基站位置受到实际条件的制约, 在应用中存在着困难; 增加基站数量会造成网络成本的增加。在使用一个基站的前提下实现节点能耗平衡才是具有现实意义的研究。

3、根据合策略(Data aggregation)

造成空洞问题的根本原因是由于大量的单向数据流所致。在无线传感器网络内部采用数据融合机制可以减少单向数据流量, 减轻热点节点的负载。

HE等人在文献[2]中指出, 数据融合按照与实际应用之间的关系, 可以分为跟应用有关的融合 (application dependent data aggregation, ADDA), 跟应用无关的融合 (application independent data aggregation, AIDA), 以及以上两者的结合。ADDA的融合方式是针对应用数据来压缩处理的, 数据融合需要理解应用数据的意义。这种融合方式往往会得到比较大的压缩比, 但是可能会丢失一些信息。AIDA的融合机制是节点在转发时将接收到的数据包和自己的数据包整合成一个大的数据再进行发送, 以此来节省数据报头所需要的通信开销, 提高能量的效率, 减轻下游节点的负载。采用这种融合方式数据不会损失, 适用于需要完整数据的场合。

仍然采用上面的模型, 为了便于分析, 采用ADDA, 假设每次融合的压缩比为 <1 , 得到最内层节点的负载大约为:

$$\begin{aligned} aggregationLoad_{ring0} &\approx b + \sum_{i=1}^{M-1} \alpha^i (2i-1)b \\ &<< Load_{ring0} = 4 \frac{M^2}{\pi} b \end{aligned} \quad (5)$$

因此, 采用数据融合的策略可以大大减少热点节点的负载, 使得能量空洞效应被减轻。但是单纯采用数据融合, 仍不能完全消除能量空洞效应, 例如采用(5)式, 假设 $a=0.5$, $M=5$, 那么最外层节点的通信负载为 b , 最内层节点的通信负载约为 $3.3b$, 相差仍然很大。特别在大规模网络中节点数

量巨大, 即使采用了融合策略, 基站附近节点所承担转发任务依然很重。

4、采用网内分簇的策略

前面探讨的都是在平面拓扑结构下的情况, 而层次拓扑下的分簇的路由协议一直被认为是可扩展性好, 通信性能优秀的协议。采用分簇的路由协议可以分散热点节点, 平衡网络内节点的能耗, 这和前面通过增加基站来缓解能量空洞的结论是一致的。在分簇协议中, 簇头实际上部分充当了基站的角色, 它将整个大区域划分成了若干个小区域。

传统的分簇协议如文献3提出的LEACH算法和文献[4]提出的TEEN算法都是按照一定的规则在网络中选择节点轮流担任簇头, 并由簇头收集数据并直接传给基站。仿真表明这样的算法相比平面多跳网络能够将生命周期延长15%, 但由于这种算法要消耗较大的能量来传递控制信息, 并且在大规模网络中离基站较远的簇头直接与基站通信会有很大困难。文献6提出了一种简单有效的平衡能量策略, 假设了网络内有少数高能节点 (strong node), 它们比一般的节点具有更多的能源和更强的通信及计算能力。这些高能节点将在网络中担任簇头, 负责组织和管理附近的节点。一般的节点只把数据发送到附近的簇头, 簇头之间连接成网络骨干网, 将数据转发到基站。骨干网要保证数据传输的可靠性。由于高能节点具有更多的能源和更大的发射功率, 因此它们可以承受高得多的通信负载; 又因为它们具有更强的运算能力和存储空间, 因此可以将节点发送过来的数据进行数据融合以后再转发。这种异构分簇策略使网络内的热点节点由高能节点担任, 使得整个网络的能量分布更加合理。文献6得出了一个高能节点数量的优化公式, 并指出高能节点之间的骨干网为保证连接质量需要消耗很大的能量, 即使在大规模网络中也要严格控制高能节点的数量, 在控制节点深度和控制骨干节点能耗之间找到一个平衡点对于分簇策略是至关重要的。仿真结果表明采用高能节点的网络在能量消耗和负载平衡方面有着明显的优势。

分簇策略降低了网络内节点的深度, 显著提高了节点能耗的公平性, 但由于分簇算法的复杂度较高会增加网络能耗, 而采用异构方式的分簇策略对节点硬件要求较高, 不能作为一种普遍的解决问题的手段。

5、非均匀分布策略

能量空洞的问题归根到底是由基站附近的节点能量不足造成, 文献[7]、[8]中提出了根据离基站距离不同相应的

增加节点数量的策略,文献8推导出相邻跳数节点的密度关系,指出节点密度只与节点所在的地理位置有关。仿真结果证明了这种策略能够有效的提高网络生存时间和能量利用率,在一个具有200节点的方形区域,仅仅增加20个节点就可以将网络生存时间提高4倍;而当网络断裂时所剩余的能量低于10%。但是此类策略存在着这样的问题:节点密度较大地区采集数据的冗余性。增加的那部分节点所采集到的数据实际上是基站不需要的。笔者认为,额外增加的节点应该不具有传感功能,而仅作为中继站向基站转发数据。这样既能够节省硬件的成本,同时数据转发的效率也更高。传感节点和中继节点相配合,使得网络的性能更加优秀。

除了节点数量的非均匀分布,文献[9]提出了根据距离基站由近到远设置了不同初始能量的能量非均匀分布的策略。文献[9]建立数学模型并计算了相应等级的初始能量,仿真结果表明即使采用少许能量等级也能使得网络生存时间增长几倍。

非均匀分布策略从调整网络能量密度来解决能量空洞的问题,在基站附近能量密度较高从而能够承受大量的通信开销。存在的问题是在随机布置的环境中,节点的实际分布很难达到预先设定的分布。

6、功率控制和能量控制

功率控制是自组织(Ad hoc)网络所经常采用的一种优化策略,主要用于点对点连接网络,目的是使节点用最小的发射功率发现可靠的链路。最近也有文章用功率控制来解决无线传感器网络中能量消耗不平衡的问题。与ad hoc网络中减小发射功率不同,无线传感器网络是让节点自由的调整自身的发射功率。对于远离基站的节点,它发射功率大,传输的距离长;对于基站附近的节点发射功率小,传输距离短。凭直观感觉,这样的通信方式能使整个网络内的能耗平衡。文献[12]对这个问题进行了研究,建立了一个大规模的网络模型,对动态功率控制算法的性能进行模拟仿真后分析发现:单纯的功率控制是以消耗大量的额外开销获得了整个网络内能量的平衡,即使在最外层节点发射距离没有限制的情况下,网络性能的改善也只是微乎其微;单独的功率控制策略不会达到理想效果。文献[11]分析了功率控制算法对网络能耗、吞吐量、公平性等指标,指出功率控制算法的主要任务是获取邻居节点的数量,调整发射功率以使邻居节点数量控制在一个需要的范围内。文献[11]用TinyOS操作系统和22个Mica2Dot节点对功率控制算法进行了测试,实验结果表明,在多对一网络中,当功率控制算法和数据融合策略相结合的时候,才能使网络

中各节点的负载更加平衡。

能量控制策略是最早针对无线传感器网络提出的优化策略,它依据节点剩余能量来选择数据的转发路径。能量控制策略可以分为两种方式:主动式能量控制和被动式能量控制。主动式能量控制的策略是:网络中所有节点都定期对外广播自身的剩余能量信息,节点选择剩余能量最多的邻居节点作为转发的目标。被动式能量控制的策略是:网络中各节点采用广播的数据发送方式,所有节点都接收上一跳节点所发出的数据包。节点根据自身的剩余能量设置相应的等待时间,剩余能量越多,相应的等待时间就越短。如果在等待时间内节点收到了同一跳节点发出的相同数据包,就证明这个节点的剩余能量比自己高,于是就丢弃这个数据包不再转发;如果在等待时间内没有收到同一跳节点所发出的相同数据包,那么就将这个包广播出去。主动能量控制是一种预处理转发策略,网络时延小,但是定期广播剩余电量信息会消耗较多的通信开销;被动能量控制是一种节能的转发方式,但是会造成较大的转发时间延迟。与功率控制类似,能量控制一般也要与其他策略相结合才能使网络中能量平衡达到较好的效果。

三、结束语

由于无线传感器网络应用的特点,网络中的数据流呈现多对一的特点。针对无线传感器网络多对一连接所造成的能量空洞,本文详细阐述了几种均衡各节点能量消耗的策略,并分析了各种策略的特点。如何在实现网络能耗平衡的同时保证网络的低能耗和低时间延迟是目前无线传感器网络的研究热点,要获得一种非常优秀的均衡策略仍然需要长时间的研究和改进。相信随着软硬件技术的迅速发展,无线传感器网络中所存在的多对一数据流问题最终会得到完美的解决。

参考文献:

- [1] J. Li and P. Mohapatra. An analytical model for the energy hole problem in many-to-one sensor networks[A]. Proc. Of IEEE VTC Fall 2005[C]. Vol.4, 25-28 Sept 2005. 2721-2725.
- [2] T. He, B. M. Blum, J. A. Stankovic, and T. Abdelzaher. Aida: Adaptive application-independent data aggregation in wireless sensor networks[A]. Trans. on Embedded Computing Sys[C]. 2004, 3(2): 426-457.
- [3] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks[A]. In: Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. Maui: IEEE Computer



Society[C].2000. 3005~3014.

[4] Manjeshwar A, Agrawal DP. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco: IEEE Computer Society[C].2001. 2009~2015.

[5] Haiyun Luo, Fan Ye, Jerry Cheng, Songwu Lu, Lixia Zhang. TTDD:Two-tier Data Dissemination in Large-scale Wireless Sensor Networks[A].ACM Mobile Networks and Applications (MONET)[C]. Journal,2003.

[6] . Ai, D. Turgut, and L. Bölöni. A Cluster-based Energy Balancing Scheme in Heterogeneous Wireless Sensor Networks[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Networking (ICN'05)[C].April 2005. 467~474.

[7] Helena Rivas, Thiemo Voigt, and Adam Dunkels. A simple and efficient method to mitigate the hot spot problem in wireless sensor networks[A]. Workshop on Performance Control in Wireless Sensor Networks.Coimbra[C], Portugal, May 2006.

[8] X.B. Wu, G. Chen and Sajal K. Das. On the Energy Hole Problem of Nonuniform Node Distribution in Wireless Sensor Networks[A]. 3rd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (IEEE MASS2006)[C]. Vancouver, Canada, October 9-12, 2006.

[9] Mihail L. Sichitiu and Rudra Dutta. Benefits of Multiple Battery Levels for the Lifetime of Large Wireless Sensor Networks[A]. Proc. of Networking 2005[C].(Waterloo, Canada), May 2005.

[10] Ioannis Papadimitriou and Leonidas Georgiadis. Energy-aware Routing to Maximize Lifetime in Wireless Sensor Networks with Mobile Sink[A]. 13th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM 2005 - Symposium on Future Wireless Systems)[C].Marina Frapa - Split, Croatia, September 2005.

[11] J. Jeong, D. Culler, and J.-H. Oh. Empirical analysis of transmission power control algorithms for wireless sensor networks[R]. EECS Department University of California, Berkeley Technical Report No. UCB/EECS-2005-16 November 21, 2005.

[12] M. Perillo, Z. Cheng, and W. Heinzelman. On the Problem of Unbalanced Load Distribution in Wireless Sensor

Networks[A]. Proceedings. of the IEEE GLOBECOM Workshops on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks[C].2004. pp. 74-79.

[13] Dong-Wook Lee, Jai-Hoon Kim and Young-Bae Ko, An Energy Balanced Data Dissemination Scheme for Lifetime Extension in Wireless Sensor Networks[A]. Proc. of the Wireless Networks And Emerging Technologies (WNET 2005)[C].Jul. 2005.

Research On Schemes Of Energy Balance In Wireless Sensor Networks

Abstract : The data traffic in wireless sensor networks is the many-to-one pattern. Unbalanced energy consumption is an inherent problem in wireless sensor networks. As a result, the life time of the network is drastic reduced. The reason and the effects caused by the unbalanced energy consumption are analyzed in this paper. Then several schemes which prevent the unbalanced energy consumption are expatiated, and the characteristics of these schemes are pointed out respectively. At last the future direction of balanced energy schemes is discussed.

Keywords : wireless sensor networks ; many-to-one ; Energy volution ; balanced energy

作者简介 :

王亮: 重庆大学光电工程学院硕士研究生, 研究方向为无线传感器网络

手机号码: 13594124715 Email: wyloe@126.com

通讯地址: 重庆大学光电工程学院主教学楼1307室

邮编: 400044

钟先信: 重庆大学光电工程学院博导, 教授 主要从事微系统及精密机械方面的研究

手机号码: 023-65103134 Email: xxzhong@cqu.edu.cn

通讯地址: 重庆大学光电工程学院主教学楼 1311 室

邮编: 400044

石军锋: 西南大学讲师, 在读博士, 研究方向为无线传感器网络

手机号码: 13110119342 Email: sjfstone@21cn.com

通讯地址: 重庆大学光电工程学院主教学楼 1307 室

邮编: 400044

本文编辑: 陈明 读者服务卡编号 009□