

一种新型的无线传感器执行器网络协议

孔 鹏, 余镇危

(中国矿业大学(北京) 机电学院, 北京 100083)

摘 要: 针对无线传感器执行器网络节点能量消耗公平性的问题, 提出了一种基于加权维诺图和度约束最小生成树的协议. 协议基于加权维诺图的方法将网络分簇, 每个簇由一个簇头执行器节点和一些传感器节点组成. 协议将网络运行分成多个循环执行的回合, 每个回合根据网络情况重新使用度约束最小生成树算法来计算路由路径. 仿真结果显示协议可以提升网络节点剩余能量的公平性, 延长网络寿命.

关键词: 无线传感器执行器网络; 维诺图; 度约束最小生成树

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)12-0008-04

A Novel Protocol in Wireless Sensor and Actor Network

KONG Peng, YU Zhen-wei

(School of Mechanical Electronic & Information Engineer, China University of
Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: This paper proposes a protocol for wireless sensor and actor network based on weighted Voronoi diagram and degree-constrained minimum spanning tree (VDMST), considering residual energy balance of network nodes. Based on weighted Voronoi diagram, the protocol organizes network nodes to some clusters which include an actor and some sensors. The operation of VDMST protocol is divided into rounds and the degree-constrained minimum spanning trees are dynamically generated according to network states in each round. The simulation results show that VDMST protocol can improve the residual energy balance of network nodes and prolong network lifetime.

Key words: WSN; Voronoi diagram; degree-constrained minimum spanning tree

1 引言

无线传感器执行器网络(Wireless Sensor and Actor Network, WSN)是由部署在监测区域内大量低成本、低功耗、具备感知、数据处理、存储和无线通信能力的传感节点, 以及少量具备处理和通信能力, 能主动对外部环境实施操作, 能量资源丰富(更长的电池寿命或者恒定电源)的执行器节点通过自组织方式形成的网络, 其目的是由传感节点协作采集、处理和传输网络覆盖区域中被感知对象的信息, 执行器节点根据传感节点感知信息并对外部环境实施相应的行为^[1]. 与之相比, 单纯的无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)只有感知和汇聚数据的功能^[2], 所以 WSN 具有更为广泛的应用前景.

WSN 中存在传感器节点与执行器两种节点, 所以节点间的协作是无线传感器执行器网络的特点之一. 这既是其相对于 WSN 的优势所在, 也决定了它不能直接应用 WSN 的现有网络协议, 需要单独设计网络协议.

无论是对传感器节点还是执行器节点来说^[3], 能量都是 WSN 中最重要的网络资源. WSN 的一个重要研究方向就是节能, 随着研究的进展, 目前已经不能仅仅停留在减少网络节点的整体能耗上, 还要求提升网络节点能耗的公平性, 即各个同类节点的能耗尽量均匀, 这样才能避免关键节点耗尽能量而导致 WSN 无法运行.

在无线传感器执行器网络中, 已经提出了多种基于分簇的网络协议, 可以通过由簇头节点代表所

有簇内节点发送数据的办法来减少网络整体能量消耗^[3-5].文献[6-8]提出了三种改进协议,但都存在不足之处.

本文提出了一种面向能量有效性的 WSN 协议, VDMST (Protocol based on weighted Voronoi diagram and Degree-constrained Minimum Spanning Tree), 主要思想为利用加权维诺图方法将网络中的节点包括传感器节点和执行器节点分成不同簇, 并使用约束最小生成树算法来计算执行器节点和传感器节点间的路由路径, 以便减少网络能耗, 并且提升网络节点能量消耗的公平性.

2 VDMST 协议

2.1 执行器节点分簇

定义1 以 $d(a, b)$ 代表点 a 和 b 之间的欧氏距离, 在平面中可以得到 $d(a, b) = \sqrt{(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2}$.

令 $\Lambda = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_N\}$ 为 2D 监控平面内不同执行器节点的集合, 这些节点可以看做维诺多边形的生长中心. 任意 A 为监控区域内一点, 令 $V_{(A_i)} = \bigcap_{i \neq j} (A | d(A, A_i) \leq d(A, A_j))$, $(i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$, 则 $V_{(A_i)}$ 为执行器节点 A_i 的维诺多边形. 任意 Λ 内一执行器节点 A_i , 就有一对应的维诺多边形 $V_{(A_i)}$. 显而易见, 整个执行器节点的监控区域就是由这些维诺多边形组成的, 记为 V_A , 则有 $V_A = \bigcup_{A_i \in \Lambda} V_{A_i}$, $i = (1, 2, 3, \dots, n)$. 维诺多边形 $V_{(A_i)}$ 是由一个执行器节点 A_i 和一组传感器节点 $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_n\}$ 组成, 也就是 WSN 的一个维诺分簇. 簇内所有传感器节点到执行器节点 S_i 的距离比其他任何一个执行器节点都要小. 图 1 展示了一个典型的执行器节点维诺分簇图, 图中实心圆点代表执行器节点, 周围的多边形区域就是维诺分簇. 显然的, 当执行器节点个数为 n 的时候, 整个 WSN 被分割为 n 个维诺分簇. 维诺图有两个显著的特点: 一是维诺分簇的个数随执行器节点数量的增加而线性增加, 并不复杂; 二是局部动态特性, 执行器节点数目改变只对邻近的维诺分簇产生影响.

以上描述的维诺图只是最基本的一种情况, 但是, 在实际应用中, 虽然起始阶段执行器节点能量丰富, 但是每个执行器节点的操作和通信所消耗的能量是不一样的, 所以当网络运行一定时间之后, 每个执行器节点的剩余能量可能有所不同; 除此之外, 由于执行器节点硬件上的差异, 可能每个执行器节点

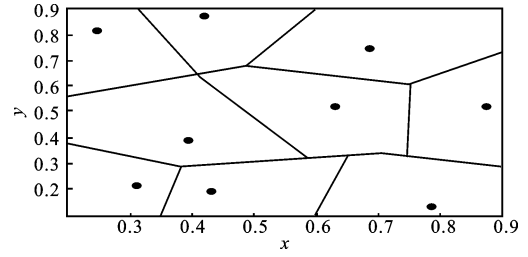


图1 执行器节点维诺分簇图

的执行能力也并不相同. 为了提升网络公平性, 需要统筹安排执行器节点的通信和操作行为. 主要思想为, 剩余能量较多的执行器节点承担较多的通信任务, 并且结合执行器节点本身的执行能力来决定每个执行器节点负责操作区域的范围. 考虑到执行器节点的剩余能量和执行能力, 本文提出了基于加权维诺图对执行器节点进行分区的协议.

定义2 加权维诺图 令 $\Lambda = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_N\}$ 为 2D 监控平面内不同执行器节点的集合, E_i^{res} 为每个执行器节点的剩余能量, C_i^{exe} 为每个执行器节点的执行能力, 则加权维诺图可以表示为 $V_{(A_i)}' = \bigcap_{i \neq j} (A | \frac{d(A, A_i)}{E_i^{\text{res}}} * C_i^{\text{exe}} \leq \frac{d(A, A_j)}{E_j^{\text{res}}} * C_j^{\text{exe}})$, $(i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$. 记执行器节点的加权维诺图为 V_A' , 则有 $V_A' = \bigcup_{A_i \in \Lambda} V_{A_i}'$, $i = (1, 2, 3, \dots, n)$.

2.2 协议设计

VDMST 协议在运行过程中分成多个循环执行的回合, 每个回合都会对簇进行维护, 每个回合可以分成两个阶段, 即聚簇阶段和数据传输阶段.

(1) 聚簇阶段

VDMST 协议在聚簇阶段的操作步骤如下: 算法假设传感器节点和执行器节点已经成功部署. 首先执行器节点互相通信, 交换剩余能量信息和执行能力信息, 其次执行器节点使用分布式或者集中式的方法, 根据获取的信息构造加权维诺图. 接下来每个执行器节点把分簇信息转发给簇内的传感器节点, 最后, 每个传感器节点向自己簇头的执行器节点发送 ACK 信息, 确认加入.

(2) 数据传输阶段

聚簇阶段之后, WSN 被分成多个簇, 每个簇包括一个执行器节点和一组传感器节点. 现在要解决的问题是如何建立路由. 最简单的办法是如 VDSPT 协议^[9]一样使用最短路径方法, 但是这样做存在一个问题: 当使用最短路径方法的时候, 执行器节点一跳内的节点很可能得不到有效利用, 极端情况下, 使用最

小生成树寻找到的最短路径,可能仅有一个传感器节点与执行器节点直接相连,这极易引发“空洞”现象.为缓解上面提到的问题,本文采用了度约束最小生成树来寻找簇内路由路径,具体思想如下所示.

定义 3 k 度约束最小生成树. 令图 G 是包含执行器节点 A_0 的无向连通图,其中 A_0 有 n 个邻居节点. 寻找一个最小生成树 T , 满足 A_0 的度最大为 k , 则 T 为图 G 的 k 度约束最小生成树.

① 将该点(以下用 A_0 表示)从图中删除,将得到 m 个连通分量.

② 对每个连通分量求最小生成树,得到 m 个最小生成树.

③ 从每个连通分量中找与 A_0 关联的权值最小的边,与 A_0 相连接,这样将得到 A_0 的 m 度约束最小生成树.

④ 如果 $k < m$, 那么这种树是不存在的.

⑤ 如果 $k \geq m$, 那么考虑构建 $m+1$ 度约束最小生成树,将与 A_0 关联的且不在当前的树中的边加入生成树中.

⑥ 如果将其加入生成树中,必然会产生一个环,那么删掉该环中与 A_0 不关联的权值最大边,将得到加入该边后的最小生成树,且是 $m+1$ 度的最小生成树.

⑦ 枚举上述 ⑥ 的边,找到权值最小生成树,即 $m+1$ 度约束的最小生成树. 如果 $m+1$ 度约束最小生成树的值大于 m 度约束最小生成树的话,直接输出当前 m 度约束最小生成树即可.

⑧ 重复 ⑤ ~ ⑦,直至 $k = n$, 则 k 度约束最小生成树出现.

对于图 2 所示的拓扑来说,如果按照 VDSPT 协议使用最短路径树的方法来建立路由表,那么传感器节点 D 、 E 、 F 和 G 都要先将数据发送到传感器节点 B ,再由传感器节点 B 转发给执行器节点 A ,这样就会造成传感器节点 B 的能量迅速耗光而影响整个网络寿命. 而在数据传输阶段使用度约束的最小生

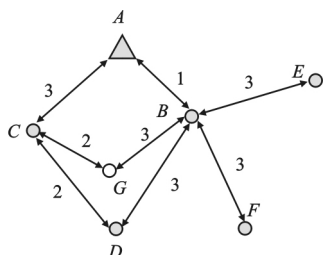


图 2 WSN 某簇示例拓扑图

成树方法来建立路由表,那么节点 D 、 G 都会先将数据发送给传感器节点 C ,再由传感器节点 C 转发给执行器节点 A ,这样就分担了能耗,提升了网络的公平性,这也是 VDMST 协议相对于 VDSPT 协议的优势所在.

在数据传输阶段,WSAN 根据每个簇的拓扑信息,使用度约束最小生成树计算路由路径.接着执行器节点把路由表发送给自己簇内的每一个传感器节点,簇内的每一个传感器节点都按照接收到的路由表向执行器节点传输数据.

VDMST 协议把网络运行分成多个回合,每一回合都要重新计算路由表,传感器节点也会按照最新的路由表向执行器节点发送数据,重复这个过程,直至 WSN 网络寿命耗尽.

3 分析和仿真

本文仿真采用文献[3]中的能量模型、文献[9]中的应用场景,分别使用 EACBR 协议^[8]、VDSPT 协议^[9]和 VDMST 协议.

EACBR 和 VDMST 协议中的分区和路由路径分别如图 3、图 4 展示,其中圆点代表传感器节点,三角形代表执行器节点.图中的执行器节点 A_1 、 A_4 能量丰富、执行能力较强,与能量较少、执行能力较差的执行器节点 A_2 和 A_3 相比,承担较多的通信任务,负责对较大的操作区域执行操作.

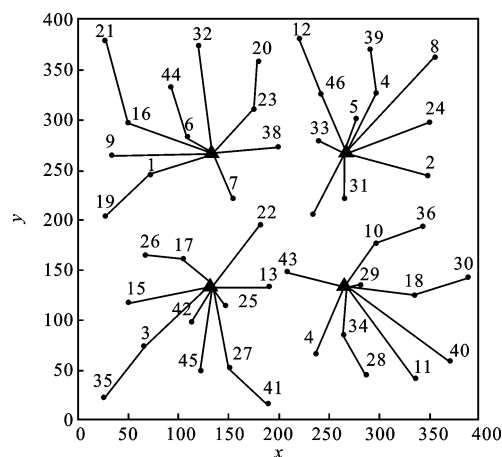


图 3 EACBR 分区

图 5 展示了 EACBR、VDSPT 和 VDMST 协议运行同样时间周期后某簇传感器节点的剩余能量. 仿真结果显示与 EACBR 和 VDSPT 协议相比, VDMST 协议网络能耗的公平性更好.

虽然执行器节点是能量丰富节点,而且操作消耗的能量比通信消耗的能量更多,但是节省通信消

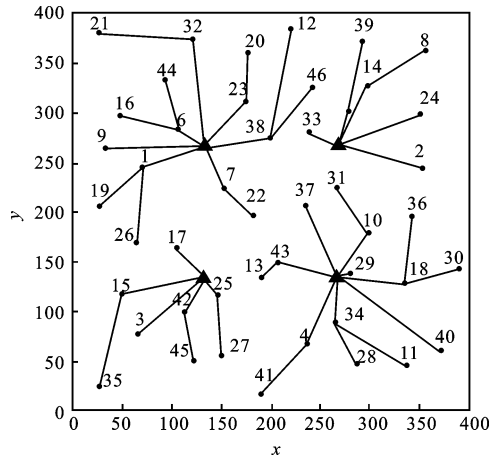


图4 VDMST 分区

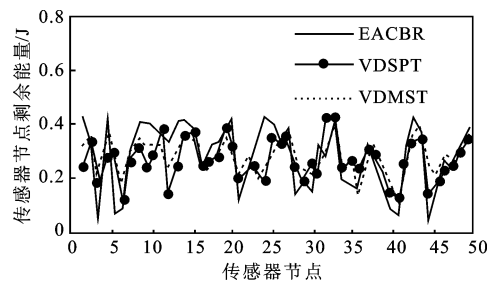


图5 传感器节点剩余能量表

耗能量从而延长网络寿命依然非常重要。图6展示了EACBR、VDSPT和VDMST协议中执行器节点在相同时间周期内的消耗能量,由图中可以看出,三种协议执行器节点消耗总量大致相当,但是在VDMST协议中,剩余能量较多的节点消耗的能量高于剩余能量较少的节点,网络公平性最好。

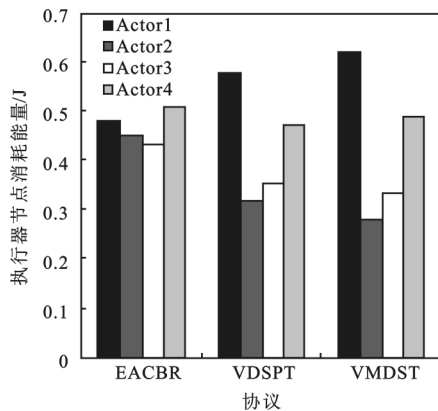


图6 执行器节点能量消耗表

4 结束语

本文介绍了一种能量敏感的WSAN协议,基于加权维诺图的方法将网络分成多个簇,每个簇有一个执行器节点作为簇头,统筹管理簇内传感器节点

来完成网络任务。协议将网络运行分成多个循环执行的回合,每个回合根据网络情况重新使用度约束最小生成树算法来计算路由路径,较好的适应了网络动态变化。仿真结果表明,协议能够在节省能量的同时提高网络节点能量消耗的公平性。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Kasimoglu I H. Wireless sensor and actor networks: research challenges [J]. Ad hoc networks, 2004,2(4):351-367.
- [2] Akyildiz I F, Vuran M C. Wireless sensor networks[J]. Communications Magazine IEEE,2002,40(8):102-114.
- [3] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2002,1(4):660-670.
- [4] Gao Y, Wang J, Song X. Data collection scheme of mobile sink in wireless sensor and actor networks [C]// Intelligent Control and Automation (WCICA), 2014 11th World Congress on. China, Shenyang, IEEE, 2014:2505-2508.
- [5] Zhang X, Bao H, Ye J, et al. A data gathering scheme for WSN/WSAN based on partitioning algorithm and mobile sinks[C]// High Performance Computing and Communications & 2013 IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (HPCC_EUC), 2013 IEEE 10th International Conference on. China,Zhangjiajie,IEEE, 2013:1968-1973.
- [6] Kakarla J, Majhi B, Battula R B. A voronoi diagram based efficient coordination mechanism for WSAN[C]// Networks & Soft Computing (ICNSC), 2014 First International Conference on. India,Guntur,IEEE, 2014:226-230.
- [7] Abbas W, Jaleel H, Egerstedt M. Energy-efficient data collection in heterogeneous wireless sensor and actor networks[C]// Decision and Control (CDC), 2013 IEEE 52nd Annual Conference on. Italy, Firenze, IEEE, 2013:4164-4169.
- [8] Dai Z, Li Z, Wang B, et al. An energy-aware cluster-based routing protocol for wireless sensor and actor network[J]. Information Technology Journal, 2009,8(7):1044-1048.
- [9] Dai Z, Wang B, Li Z, et al. Vdspt: A sensor-actor coordination protocol for wireless sensor and actor network based on voronoi diagram and shortest path tree [C]// Computer Network and Multimedia Technology, 2009 CNMT 2009 International Symposium on. China,Wuhan,IEEE, 2009:1-4.

(下转第16页)

参考文献:

- [1] Choi J. Rate allocation for multipath routing in wireless multihop networks with security constraints based on erasure channel modeling[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(9):2689-2699.
- [2] Alwadiyeh E S, Aburumman A F A. Interference-aware multipath routing protocols for mobile ad hoc networks[C]// Proceedings of 2013 IEEE 38th Conference on Local Computer Networks Workshops (LCN Workshops). New York: IEEE Press, 2013: 980-986.
- [3] Agrakhd J, Biradar G S, Mytri, V D. Energy efficient interference aware multipath routing protocol in WMSN[C]// Proceedings of 2011 Annual IEEE India Conference (INDICON). New Delhi: IEEE Press, 2011: 1-4.
- [4] Mahadevan G, Nirmala S, Shruthi R. Enhancing energy efficiency using multipath routing in wireless sensor networks[C]// Proceedings of National Conference on Challenges in Research & Technology in the Coming Decades (CRT 2013). New York: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [5] Wang Y, Yang W S, Wu J. Analysis of a hypercube-based social feature multipath routing in delay tolerant networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(9):1706-1716.
- [6] Jemili I, Chaabouni N, Belghith A, et al. A multipath layered cluster based routing for ad hoc networks [C]// Proceedings of 2012 5th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS). New York: IEEE Press, 2012: 1-5.
- [7] S M G, DSouza R J, Varaprasad G. Digital signature-based secure node disjoint multipath routing protocol for wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2012; 12(10): 2942-2949.
- [8] Clausen Jacquet P. Optimized link state routing protocol(OLSR)[EB/OL]. [2015-01-19]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>, IETF mobile Ad Hoc Networks Working Group.
- [9] Pei G, Gerla M, Chen T W. Fisheye state routing in mobile ad hoc networks [C]// Proceedings of ICC 2000. New York: IEEE Press, 2000: 1-8.
- [10] Yi J, Adanne A, David S, et al. Multipath optimized link state routing for mobile ad hoc networks [J]. Journal of Ad Hoc Networks, 2011; 9(1): 28-47.
- [11] Oh S Y, Shen B H, Gerla M. Network coding over a MANET proactive link state routing protocol and TDMA scheduling[C]// Proceedings of Military Communications Conference, MILCOM 2012. Los Angeles, IEEE Press, 2012: 1-6.
- [12] Chen J, Lee Y Z, Maniezzo D, et al. Performance comparison of aodv and oflsr in wireless mesh networks[C]// Proceedings of the 5th IEEE IFIP Med-Hoc-Net'06. New York: IEEE Press, 2006: 1-6.
- [13] Prabhavat S, Nishiyama H, Ansari N, et al. On load distribution over multipath networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(3): 662-680.
- [14] De Couto D S J, Agugyo D, Bicket J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing [C]// Proceedings of 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. San Diego, ACM, 2003: 419-431.

作者简介:

刘永广 男, (1972-), 博士, 研究员. 研究方向为信息网络理论与技术、路由算法及优化等.

E-mail: liu. yongguang@gmail. com.

(上接第 11 页)

作者简介:

孔 鹏 男, (1981-), 博士研究生. 研究方向为无线传感器执行器网络. E-mail: xskp@163. com.

徐镇危 男, (1942-), 教授, 博士生导师. 研究方向为下一代计算机网络体系结构和协议、高速计算机网络、复杂性理论在计算机网络领域的应用、计算机网络应用和计算机应用技术等.