

文章编号: 1001-2486(2011)02-0049-05

一种基于移动基站的无线传感器网络数据收集方法*

陈涛, 郭得科, 罗雪山, 陈洪辉

(国防科技大学 信息系统工程重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要:针对传统的无线传感器网络数据收集协议大多受制于发生在基站周围的热点问题,提出了一种使用移动基站的数据收集方法。将数据收集问题转化为支配集构造和旅行商问题,并提出了一种分布式的支配集构建算法,结合旅行商问题的近似算法生成基站的移动路线。仿真结果表明,所提出的方法减少了通信消耗,且能使负载均衡地分布。

关键词:无线传感器网络;数据收集;移动基站;支配集

中图分类号:TP393.03 **文献标识码:**A

A Data Collection Approach Based on Mobile Sink in Wireless Sensor Networks

CHEN Tao, GUO De-ke, LUO Xue-shan, CHEN Hong-hui

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the hot issue about the sink node in most traditional data collection protocols in wireless sensor networks, the study presented a data collection method using mobile sink. Data collection problem was decoupled to a dominating set construction and travelling salesman problem. A distributed algorithm was presented for constructing dominating set. According to the result set, approximate algorithm was used to generate a path for sink. Simulation results show that the approach proposed can reduce communication overhead and balance the load.

Key words: wireless sensor networks; data collection; mobile sink; dominating set

无线传感器网络由大量的微型传感器节点组成,已在多种监测应用中起到重要作用^[1-3]。在这些应用中,传感器节点通过多跳通信将感知数据传输到基站。基站往往是一个静止节点,使用最短路径路由或其他路由方式收取数据。因此靠近基站的节点需要比远离基站的点转发更多的数据,从而导致更快地耗尽能量并导致网络不再连通。这些节点通常被叫做“热点”。“热点”问题是传统的数据收集协议所无法解决的问题。

最近几年,有学者提出使用移动性来解决上述问题。提出的策略可分为两类。第一类方法使用一个或数个移动基站在网络中随机行走并收集数据^[4]。这类方法进行一次数据收集所耗费的时间是无法预期的。另一类方法试图将移动性和路由结合^[5]。基站被指定移动轨迹和速度,从而使其位置可以被预测,同时依然通过多跳路由方式收集数据。这类机制减少了数据延迟,但由于其较复杂,因而难以在实际应用。此外,这些方法大

多基于UDG(Unit Disk Graph)模型,即节点仅能与在某个圆形区域内的邻居节点通信。该模型与现实差别较大,影响了这些方法的实用效果。本文提出一种使用移动基站但不使用多跳路由机制的数据收集方法。其目标是克服现有方法在复杂度和实用性上的不足,减少通信代价,并平衡各节点的能量消耗。

1 网络模型与问题描述

本文假定传感器网络被部署在一片连续的二维平面内,可用图 $G=(V,E)$ 表示。 V 表示点的集合,其中的每个点 $v \in V$ 表示一个静止的传感器节点。 E 表示边的集合,其中的每条边 $(v_i, v_j) \in E$ 表示传感器 v_i 和 v_j 之间存在通信连接。假定所有的无线通信链路都是双向的。两个有边相连的节点相互称为邻居节点。 $N(v)$ 表示节点 v 所有邻居节点的集合,节点的度定义为 $\deg(v) = |N(v)|$,表示节点的邻居节点数量。

* 收稿日期:2010-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60903206,60943225);国家部委基金资助项目(9140A06050610KG0117)

作者简介:陈涛(1982-),男,博士生。

定义 $N[v] = N(v) \cup \{v\}$, 称点 v 支配 $N[v]$ 中所有的点或 $N[v]$ 中所有的点被点 v 支配。如果图 G 的每个点都被点集 S 中的某个点所支配, 则称 S 为图 G 的支配集。 $|S|$ 被称为支配集 S 的势, 表示其中节点的数量。每个节点 v 的地理位置信息为 $L(v) = (x_v, y_v)$, 可以通过 GPS 设备或其他各种定位方式获取^[6]。本文假设图 G 是强连通的。在图 G 的定义外, 存在一个移动基站, 用来收集 V 中所有节点的监测数据。收集过程中不考虑数据聚合, 并假定移动基站与静止节点具有相同的通信能力。基站在移动过程中在支配集中各点的位置短暂停留, 当且仅当其停留时与周围静止的节点通信并收集数据。本文定义网络寿命为从传感器网络部署成功到第一个传感器节点因能量耗尽而停止工作的时间。传感器消耗能量的活动包括感知、计算、睡眠、等待、接收和发送数据, 其中通信消耗的能量是最多的。本文的主要目的是最大化网络寿命, 近似等价于尽可能地减少通信代价并平衡负载分布。

2 基于移动基站的数据收集

我们提出一种分布式的支配集构造方法。支配集中节点的位置作为基站的检查点。基站在每个检查点处可以通过单跳通信获取数据。使用旅行商问题的近似算法可以得出一条经过所有检查点的移动路径。基站沿此路径移动并收集网络中的所有节点上的数据。

2.1 如何构造支配集

对于给定的图 G , 其支配集不是唯一的。各个支配集的势也不一定相等。支配集的势 $|S|$ 越小, 基站所必须停留的位置越少, 在转化为旅行商问题求解时的约束条件就越少。直观上认为, 约束条件较少时可能获得更优的解。因此, 我们需要构造一个具有较小势的支配集。已有的研究主要聚焦于连通支配集的构造^[7], 而本文仅需非连通的支配集。最小支配集求解问题已被证明是“NP-完全”问题, 在传感器网络中实现解决该问题的算法可能带来非常大的能量消耗, 甚至可能远远超出其较少的势带来的收益。因此, 我们提出一种分布式启发式算法, 在构造具有较小势的支配集的同时降低了单个节点的通信消耗, 并且使各个节点的通信消耗趋于均衡。该算法主要遵循以下两条规则:

规则 1 在任意一条路径上, 尽量每隔两个节点选一个节点作为支配点。

在强连通的图中, 从任意一点出发, 必然有到达任意其他点的最短路径。令 n 表示路径中所包含点的个数, 对于一条足够长的路径 ($n \geq 3$), 一定包括由三个连续节点组成的单元。只要将处于中间的节点添加进支配集, 就能保证每个节点都被中间的节点支配。路径长度 n 按照 $n \bmod 3$ 的结果可以分为三类, 即

$$n = \begin{cases} 3m \\ 3m - 1, & m \in Z^+ \\ 3m - 2 \end{cases}$$

当 $n = 3m$ 时, 按照图中的方式选择节点构造支配集; 当 $n = 3m - 1$ 或 $n = 3m - 2$ 时, 在路径的前 $3(m - 1)$ 个节点部分采用图 1 所示方式选择节点, 然后再加上路径中的最后一个节点构成支配集。该结论的证明可参考图论中关于环中最小支配集的势的定理相关证明^[9], 因篇幅限制, 此处略过相关证明。

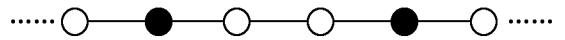


图 1 一条路径上的最小支配集

Fig.1 Minimum dominating set of a path

规则 2 尽可能选择度数高的节点作为支配集中节点。

由于图中含有多条相交的路径, 因此仅使用上述规则并不能保证结果最优。当分布式实现上述规则时, 尤其是网络中节点密度比较大的前提下, 经常出现两个或多个相邻节点同时在不同的路径中被选择作为支配集中节点的情况, 从而导致最终生成的支配集中存在多个相邻节点。直观地认为, 在多个相邻节点竞争时, 应当采用贪婪的方式, 选择具有较高度数的节点加入到支配集中。

2.2 支配集的分布式构造算法

分布式算法不需要中心化的管理, 并且当问题规模变得很大时集中式算法的代价也难以接受。为了分布式地实现前文所描述的启发式算法规则, 我们使用不同的角色来标志节点当前在支配集构造过程中的状态。定义节点角色可能的取值如下:

- NULL: 表示初始化状态, 节点还没被赋予任何角色;
- DOMINATOR: 表示是支配集中的节点;
- DOMINATEE: 表示是被支配集中某个节点支配的节点;
- 2-NEIGHBOR: 表示是支配集中某个节点的第二跳邻居, 即某个被支配节点的邻居;
- CANDIDATE: 表示是支配集中节点的候选

节点。

算法开始时,任意选择网络中的一个节点,将其角色设置为 *DOMINATOR*,并将该角色状态以广播的方式告知其邻居节点。这些邻居节点收到该广播消息后,将自己的角色设置为 *DOMINATEE*,并将新的角色进行广播。每个节点收到不同类型的角色消息后按不同方式处理,并用广播发送自己的角色信息。依此扩展开去,最终引起全网范围内所有节点至少广播一次。当所有节点的角色都是 *DOMINATOR* 或 *DOMINATEE* 时,节点不会再改变角色,也不会再广播新的消息,算法终止。此时,所有角色为 *DOMINATOR* 的节点就构成一个支配集。

各个角色之间的转换关系如图 2 所示。其中,收到角色状态消息后的状态变化遵循第一条规则。为了实现第二条规则,当节点角色变为 *CANDIDATE* 后,将会建立一个定时器,在一段时间延迟后触发。若在定时器触发之前,该节点收到 *DOMINATOR* 状态消息,则将自己的角色设置为 *DOMINATEE* 并取消定时器。若定时器被触发,则将节点角色设置为 *DOMINATOR*。令节点 v 上定时器时间延迟的长度为 $t(v) = C/|N(v)|$,其中 C 为正的常数。这样,在两个相邻的 *CANDIDATE* 节点同时建立定时器后,拥有更高度数的节点将先触发定时器并成为 *DOMINATOR*,另一节点在收到广播消息后则会成为 *DOMINATEE*。但仅按上文描述的方式进行角色转换,并不能保证在所有节点广播一次后全网节点的状态都是 *DOMINATOR* 或 *DOMINATEE*,还可能存在着角色为 *2-NEIGHBOR*。这些节点都正好处于规则 1 中所述某条从最初选择的 *DOMINATOR* 节点出发的最短路径的末端,但这些节点的相邻关系无法判定。因此,每个节点需要记录每个邻居是否广播过消息,如果是,则建立一个时长随机的定时器。定时器触发后则将该节点角色设置为 *DOMINATOR* 并

广播消息。若节点在定时器触发前收到 *DOMINATOR* 角色消息,则将自己的角色设置为 *DOMINATEE*。这样就可以保证算法终止后没有节点处于 *2-NEIGHBOR* 角色。

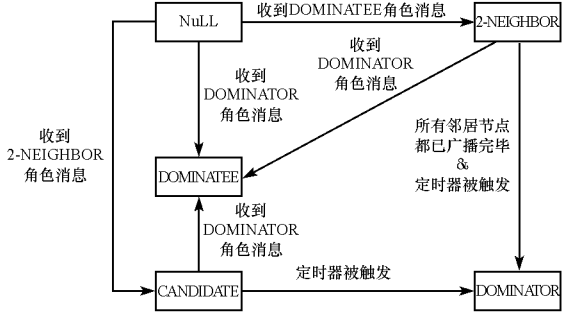


图 2 各个角色之间的转换关系
Fig.2 The transition of roles

下面以图 3 为例来说明算法构造支配集的过程。图 3(a)中是一个简单的网络,我们选择节点 1 作为起始节点,将其角色设置为 *DOMINATOR*,然后广播消息;节点 2 和 3 收到后,其角色变为 *DOMINATEE*,然后分别广播消息;按照前文所述规则,节点 4~9 的角色都将转换为 *2-NEIGHBOR*,并各自广播消息。图 3(b)中,节点 10 和 11 分别收到节点 6 和 7 的广播消息后,角色变为 *CANDIDATE*,并根据节点的度建立定时器;同时,节点 4,5 和 9 发现所有邻居节点都已发送过消息,也各自建立定时器;节点 5 的定时器先触发(或节点 4 的定时器先触发),则将其角色转换为 *DOMINATOR*,并广播消息,节点 4 收到后将角色转换为 *DOMINATEE*;而节点 9 在定时器触发后也将角色转换为 *DOMINATOR*。图 3(c)中,节点 11 的定时器先触发,随后节点 10 成为 *DOMINATEE*,并广播消息。在图 3(d)中,节点 6 收到节点 10 的消息后,发现所有邻居都已广播过消息,建立定时器,并最终也成为 *DOMINATOR*。此时,节点 6 发送广播消息已经不会再触发新的广播消息,支配集生成完毕。

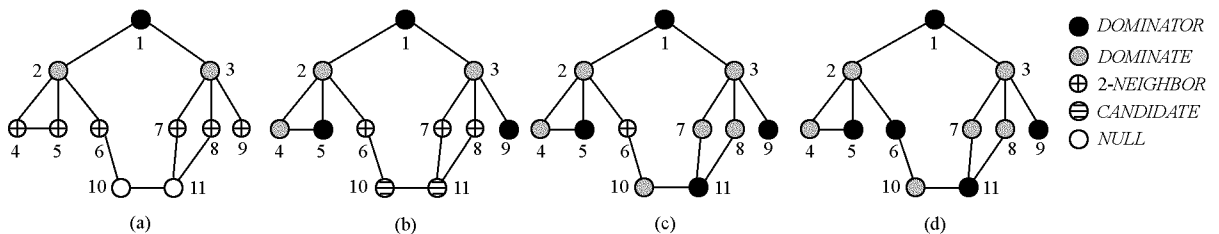


图 3 构建支配集的分布式算法简单示例
Fig.3 A simple example of distributed algorithm for constructing dominating set

2.3 路径优化

确定支配集后,基站还需要获取各个节点的

位置信息,选择经过这些节点的一条较短的路径。在支配集构建时,可以将基站置于网络中任一节

点处,并从该节点开始分布式算法,发送角色消息的同时在消息内包括从开始节点计算的跳数,从而可以不付出额外的通信代价建立起任意节点到开始节点的最短路径路由。各个 *DOMINATOR* 节点可以在确定自己的角色后通过多跳路由将位置信息传递回基站。此时,就可以将路径优化问题转换成旅行商问题,寻找一条最短的圈且经过每个点仅一次。然而,旅行商问题也被证明为 NP-hard 问题。本文中使用了 Kahng 等提出的一种近似算法^[8]。该算法使用两次连续的匹配来选择完全图中的一部分边来将所有必须访问的位置连接起来。第一次匹配选择具有最小权重(本文中使用了欧氏距离作为权重)的边,是每个位置仅与一条边相关联。在将这些边从图中清除后再进行第二次匹配。两次匹配所选择的边构成多个圈。然后,再将这些圈连接成一个大圈,即为算法的结果。在下一节中,我们将给出基于上述算法的仿真结果。

3 仿真评估

本节中,我们提供了支配集构建和路径优化的仿真结果,并将本文的方法和基于树形结构的收集方法的负载分布也通过仿真进行了比较。在仿真设置中,选择了 500×500 单位长度的正方形区域作为传感器网络的部署区域。假定传感器的传输范围是圆形区域,通信半径为 $r = 50$ 。

使用支配集的势和所需使用的消息总数作为指标,首先将 2.2 节中的算法与 Wan 等提出的算法^[7]进行了比较。在基本场景中,我们使用 1000 个随机分布的节点。通过改变节点数量使其从 500 变化到 2000,模拟节点密度的变化。在每个场景下,我们进行 10 次仿真并取平均值作为实验结果。实验结果如图 4 所示。在图 4(a)中,我们提出的算法所生成支配集的势比较稳定,而 Wan 等所提出算法的结果则随着节点数目的增加而略有增加。我们的结果具有更小的势,仅为 Wan 等结果的 50% ~ 60%。在图 4(b)中,两种算法的通信消耗都随着节点数的增加而线性增长。我们的算法仅需要约占 Wan 等提出算法的 50% 的代价。我们的算法在支配集的势和通信消耗两个方面都优于 Wan 等提出的算法。随后,分别基于上文中两种算法的结果,使用 Kahng 等提出的算法生成移动路径。同样改变节点数量从 500 到 2000。在每个场景下,进行 10 次仿真,并使用平均值进行比较。仿真结果如图 5 所示。两条曲线都随着节点数的变化而波动,其原因是拓扑结构是随机生

成的,各个拓扑可能有不同的性质。但使用我们算法的结果要优于使用 Wan 等所提出算法的结果,即减少支配集的势确实有助于缩短移动路径的长度。

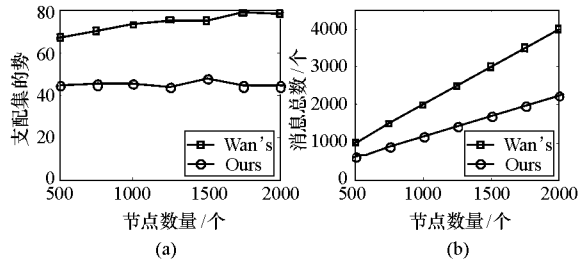


图 4 支配集的势和通信代价比较
Fig.4 Comparison of cardinality of dominating set and communication overhead

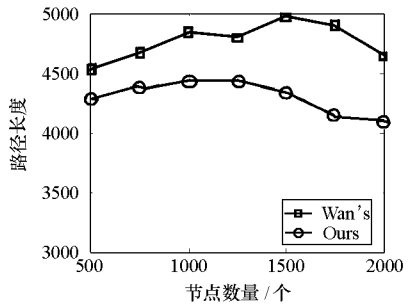


图 5 移动路径的长度
Fig.5 Length of moving path

我们分别对本文的方法与使用树形结构且静态基站位于网络中心的方法进行了仿真。仿真使用了具有 2500 个节点的网格拓扑。两种方案都需要构建最短路径树作为路由。此处我们忽略了构建最短路径树的通信消耗,而只考虑数据收集过程中的消耗。图 6 显示了我们提出的方案和基于树形结构收集方案在一次性收集所有节点上数据时的负载分布。其中 X, Y 分别表示二维平面的坐标轴,使用基于树形结构的收集方法时,基站位于网络的中心位置。很容易看出我们的方案仅有极低的通信消耗且具有更均衡的负载分布。在图 6(a)中,所有节点所需发送的消息数都不超过 5,而在图 6(b)中相当一部分节点需要发送超过 100 个消息。在图 6(b)靠近中心位置处,有的节点需要发送的消息个数远远超出其他节点。正是这些节点的寿命限制了网络寿命。仿真结果显示我们的方案具有很好的可行性。与基于树形结构的收集方法相比,它具有低通信消耗和更均衡的负载分布。我们的方案不需要转发别的节点生成的数据,因此明显比其他联合使用移动基站和多跳路由方法更高效。

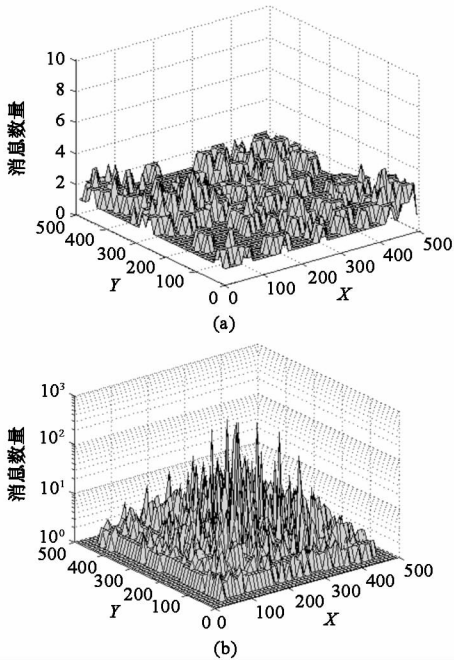


图6 本文提出的方法和基于树形结构收集的负载分布
Fig.6 Load distribution of our method and tree-based collection

4 小结

我们提出了一种基于移动基站而不使用多跳路由的数据收集方法。该方法结合了支配集构造算法和旅行商问题的近似算法。仿真结果显示,所提出的支配集构造算法具有更低的通信消耗和更低势的支配集结果,并能生成更短的移动路径。所提出的数据收集方法还具有负载均衡分布的特性。此外,该方法不使用UDG等理想状态模型,从而具有很好的实用性。

参考文献:

- [1] Mainwaring A, Culler D, Polastre J, et al. Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring [C]//Proc. of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02), Atlanta, GA, September 2002.
- [2] Li M, Liu Y. Underground Structure Monitoring with Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), Cambridge, MA, USA, April 2007.
- [3] Yang Z, Li M, Liu Y. Sea Depth Measurement with Restricted Floating Sensors[C]//Proc. of the 28th IEEE International Real-time Systems Symposium (RTSS), Tucson, Arizona, USA, December 2007.
- [4] Shah R C, Roy S, Jain S, et al. Data MULEs: Modeling a Thre-tier Architecture for Sparse Sensor Networks[C]//Proc. of the 1st IEEE SNPA, 2003.
- [5] Luo J, Hubaux J. Joint Mobility and Routing for Lifetime Elongation in Wireless Sensor Networks[C]//Proc. of IEEE INFOCOM, 2005.
- [6] Li M, Liu Y. Rendered Path: Range-free Localization in Anisotropic Sensor Networks with Holes[C]//Proc. of 13th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), 2007.
- [7] Wan P J, Alzoubi K, Frieder O. Distributed Construction of Connected Dominating Set in Wireless Ad Hoc Networks[C]//Proc. of IEEE INFOCOM, 2003.
- [8] Kahng A B, Reda S. Match Twice and Stitch: A New TSP Tour Construction Heuristic[J]. Operations Research Letters, 2004, 32: 499 - 509.
- [9] Chartrand G, Zhang P. Introduction to Graph Theory[M]. McGraw-hill Companies, 2005: 364.