

无线传感器网络中高效移动汇点规划算法^①

李长英¹, 刘倩琦², 冯鲁红¹, 刘文军³

¹(山东省鲁南工程技术研究院管理中心, 济宁 272023)

²(济宁市科技情报研究所, 济宁 272023)

³(苏州工业职业技术学院, 苏州 215104)

摘 要: 在带有移动汇点(MS)的无线传感器网络(WSN)数据收集应用中, 采用基于代理的数据收集模式可以有效缩短 MS 慢速引起的数据收集延迟问题. 以提高 WSN 数据收集的能量效率和缩短数据收集延时为目标, 给出了一种 MS 轨道规划算法 MS-TPA. MS-TPA 主要包括 RN 竞选和 MS 移动规划两个阶段. 剩余能量优先的 RN 竞选机制能够平衡网络节点的能量消耗, MS 移动规划算法能够缩短数据收集的延迟问题. 仿真实验验证了所提出算法的有效性.

关键词: 无线传感器网络; 数据收集; 移动汇点; 代理模式; MS 轨道规划算法

Efficient Mobile Sink Trajectory Planning Algorithm in Wireless Sensor Networks

LI Chang-Ying¹, LIU Qian-Qi², FENG Lu-Hong¹, LIU Wen-Jun³

¹(Southern Shandong Academy, Engineering Technology Administration Center, Jining 272023, China)

²(Institute of Scientific and Technical Information of Jining, Jining 272023, China)

³(Suzhou Institute of Industrial Technology, Suzhou 215104, China)

Abstract: For the data collection in wireless sensor network with mobile sinks, rendezvous based scheme can reduce latency significantly. Aimed at improving energy efficiency and reducing latency, this paper presents an MS trajectory planning algorithm MS-TPA. MS-TPA mainly includes RN competition and the trajectory planning of MS. The residual energy first RN competition mechanism leads to balanced energy consumption and the trajectory planning algorithm of MS reduces the latency of data collection. The simulation validates its effectiveness.

Key words: wireless sensor network; data collection; mobile sinks; rendezvous schemes; MS trajectory planning algorithm

1 引言

无线传感器网络(WSN)的出现是信息采集和获取的一场革命. 由于 WSN 节点功能受限、能量有限等固有特征, 能量效率成为诸多应用中优先考虑的因素, 收到研究者广泛关注. 最近的研究表明, 在无线传感器网络中引入移动汇点(MS)可以显著提升网络的能量效率^[1,2]. 为了达到最佳的网络能量节省, MS 需要遍历网络中的每个传感节点, 使得传感节点采集到的数据不经过中继节点而直接传输给 MS^[3]. 然而, 该方法存在一个明显的缺点: MS 的低速移动使得整个遍历过程花费时间过长, 从而引起了较为明显的数据收集

延迟. 为了解决该问题, 研究人员提出了基于代理的数据收集模式^[4,5]. 该模式中传感节点首先将数据通过多跳传输汇聚到代理节点(RN), MS 仅需要遍历这些选定的代理节点, 收集其上缓存的数据, 大大缩短了移动距离, 从而数据收集延迟得到有效缩减.

基于代理模式的网络本质上是一种分层拓扑, 所有的 RN 构成上层拓扑. 这些节点组成 MS 移动的信标, 同时也是所在子网数据的汇聚和缓存节点. 普通传感节点附属到特定的 RN, 每个 RN 连同所附属的节点构成一个子网. 本文通过 RN 的选择及合理规划 MS 的移动轨道, 给出了一种构建能量高效和扩展性良

① 基金项目:国家自然科学基金(61201212)

收稿时间:2015-06-03;收到修改稿时间:2015-08-17

好的数据收集的新算法。

2 WSN网络模型

2.1 相关假定

本文考虑一个用于连续环境信息监测的 WSN 应用场景, 该网络包含 N 个静态同构的传感节点, 用于采集特定区域的信息。令传感节点集合为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, 假定网络中的任一节点均具有唯一的标识符, 传感节点的计算、存储和能量有限, 并且能够工作在工作模式和低功耗睡眠模式。假定一个或多个 MS 初始时位于网络的中心位置, 以可控制移动模式在网络中移动收集网络范围内的信息。MS 可以通过单跳模式发布控制消息, 其能量和计算能力均不受限制。网络中节点的通信关系可以通过无向图 $G = (V(G), E(G))$ 模拟, 其中 $V(G)$ 表示所有的传感节点的集合, $E(G)$ 表示节点间所有有效的通信链路。

2.2 性能需求

相比传统的数据收集, 引入 MS 的 WSN 数据收集应用显著提高了网络的能量效率^[6]。在现有工作基础上, 本文采用基于代理的数据收集模式, 对 MS 的移动性进一步优化。算法的设计在能量效率和延迟之间取得平衡。由于 RN 比普通节点消耗更多能量, 通过选择剩余能量充足的节点充当 RN, 可以平衡网络中能量的消耗, 提升网络的能量效率。

假定 MS 在网络中移动的平均速度为 v m/s, MS 一次遍历网络的移动轨道长度为 L_m , 则缩短数据收集延迟问题可以通过映射为缩短 MS 移动轨道长度来完成。

3 MS-TPA算法设计

以提高基于代理模式 WSN 数据收集应用能量效率和缩短数据收集延时为目标, 给出了一种 MS 轨道规划算法 MS-TPA(MS Trajectory Planning Algorithm)。MS-TPA 主要可以分为基于能量效率的 RN 选择和 MS 移动轨道规划。

3.1 基于能量效率的 RN 选择

在基于代理模式的移动数据收集, RN 需要比普通传感器节点承担更多的职责, 包括汇聚并缓存所属子网中节点的数据, 当 MS 靠近时将缓存的数据上载等^[7]。该过程中 RN 需要对其所附属成员节点履行一定的维护和管理, 并且和 MS 进行交互。基于提高网

络能量效率考虑, 选择剩余能量相对充足的节点作为 RN 有助于平衡网络的能量消耗。对网络中的任一传感节点 $s \in G$, 其剩余能量记为 $s.E_{RE}$ 。算法 1 给出了基于剩余能量优先策略选取最终 RN 的过程。

算法 1. 基于能量效率的 RN 竞选算法

步骤 1: 给定网络 G , 在 G 中随机选择一定比例的候选 RN 构成上层网络 H ;

步骤 2: 网络中的任意节点 s_i 广播 RN 竞选消息 COMPETE_RN_MSG;

步骤 3: 如果 s_i 收到来自于 s_j 的竞选消息, 则构建其候选 RN 邻居集 $s_i.N_{RN}$;

步骤 4: 如果 $s_i.N_{RN} \neq \text{NULL}$, 重复如下步骤:

- (1) 对任意的 $s_j \in s_i.N_{RN}$, 如果 $s_i.E_{RE} > s_j.E_{RE}$, 则 s_i 广播赢得竞选消息 WIN_RN_MSG;
- (2) 一旦收到一条来自 s_j 的赢得竞选消息, 如果 $s_j \in s_i.N_{RN}$, 则 s_i 广播退出竞选消息 QUIT_MSG;
- (3) 一旦收到来自 s_j 的退出竞选消息, 如果 $s_j \in s_i.N_{RN}$ 则从 $s_i.N_{RN}$ 集合中删除 s_j 。

以下对算法 1 的执行作进一步解释。网络配置阶段, MS 在初始位置向网络中的所有节点广播一个“BEACON”消息, 通过该消息的发送在网络中选择一定比例的节点作为候选 RN。每个传感节点收到该消息后, 检验自身是否是候选 RN。没有被选定的节点将进入睡眠状态, 直至竞选完成后被唤醒。所有的候选 RN 在相同的传输功率 R_t 下构成网络 $H(V(H), E(H))$ 。网络中任意两个节点 s_i 和 s_j 之间的欧氏距离记为 $|s_i s_j|$, 则候选 RN 的候选 RN 邻居集可以表示为: $s_i.N_{RN} = \{s_j | s_j \text{ 是候选 RN 并且 } |s_i s_j| < R_t\}$ 。

RN 的规模通过竞争半径 R_c 来控制, 该参数可以根据特定应用进行调整。MS 启动竞选过程如下: 首先, 任意候选 RN s_i 以竞争半径 R_c 广播一条包含了其自身标识符和能量水平的竞选消息 COMPETE_RN_MSG。基于该消息节点可以计算其候选 RN 邻居集并获知其剩余能量。 s_i 赢得竞选的依据是它发现自身剩余能量大于 $s_i.N_{RN}$ 集合中每个节点的剩余能量。如果 s_j 属于 $s_i.N_{RN}$ 并且 s_i 收到一条来自 s_j 的赢得竞选 RN 消息 WIN_RN_MSG, 则 s_i 将立刻放弃竞选。对于退出竞选的候选 RN 邻居, 当前节点将其从邻居集中删除。若该候选 RN 的邻居集为空, 表明竞选过程结束。算法通过竞争选举使得半径 R_c 范围内仅存在唯一的 RN。

3.2 MS 轨道规划

算法 2. MS 轨道规划算法

步骤 1: 给定最终 RN 集合 R, 构建最小生成树 MST T0;

步骤 2: MS 从初始位置出发, 按照 DFS 策略遍历 T0 中的所有节点, 形成移动轨道 U1.

步骤 3: 使用解决 TSP 问题的算法优化 U1 获得 MS 移动路径 U2.

以上一步构建的代理节点集 R 为基础, 算法 2 给出了 MS 轨道的规划过程. 算法首先构建一棵以 MS 为根包含所有 RN 的生成树 T0, 通过对 T0 的遍历来规划 MS 的移动轨道. T0 的构建采用广度优先搜索策略. MS 首先向其 RN 邻居发起生成树构建消息 ST_MSG 触发树的构建. 任意的 RN s_j 首次收到该消息, 记消息的发送者 s_i 为其父节点. 然后 s_j 向其邻居发送自身的 ST_MSG. s_i 收到该消息, 记录 s_j 为其孩子节点. 消息传播过程中任意已经确定父节点的 RN 丢弃该消息. 如果父节点尚未确定的 RN 收到该消息, 重复上述过程, 直至 T0 构建完成.

令 U 表示 MS 的移动轨道, 基于生成树 T0 采用如下步骤可以产生并优化 MS 的移动轨道: (1)MS 从初始位置出发, 按照深度优先搜索策略遍历 T0 中的所有节点, 形成移动轨道 U1. (2)MS 对首次遍历后获得的 RN 位置使用解决旅行售货商问题(TSP)的算法计算获得更佳移动轨道 U2.

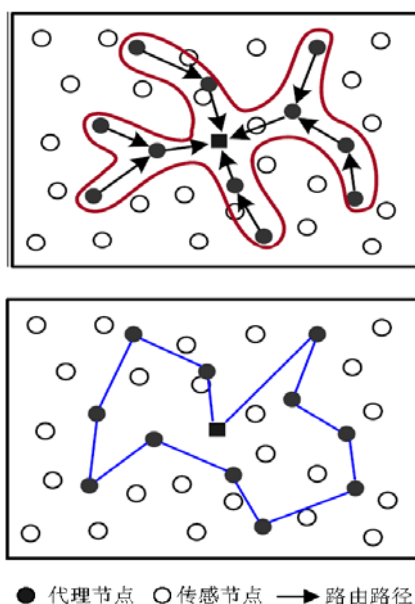
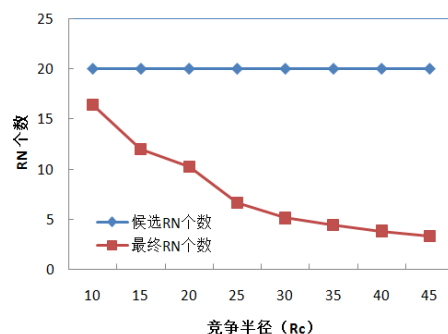


图 1 MS 移动轨道规划示例 (a) 以 MS 为根的生成树 T0 (b) 优化后的 MS 轨道

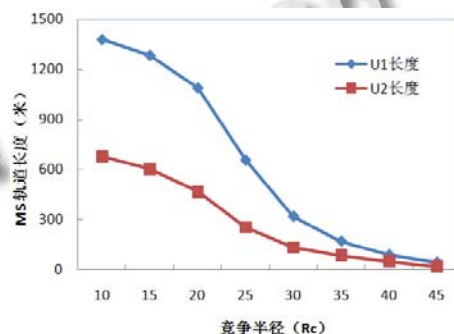
图 1 给出了基于代理节点构建 MS 移动轨道的示例. 图 1(a)中黑色实心圆点为基于剩余能量选出的代理节点, 黑色方向线显示了一棵以 MS 为根包含所有 RN 的生成树 T0. 图 1(a)和图 1(b)分别给出了基于移动轨道规划算法获得的轨道 U1 和优化后的移动轨道 U2.

4 算法性能

本节我们通过仿真实验简要评估算法的性能, 实验中我们设定 100 个传感节点随机分布在一个 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 范围的正方形区域. 候选 RN 的数目设定为总节点数目的 20%. MS 初始位于方形区域的中心位置, 即坐标为 (50, 50). 考虑网络拓扑随机性可能引起的误差, 图中的每个性能点为选取 50 次试验的平均值.



(a) R_c 与 RN 个数的关系



(b) R_c 与 MS 轨道长度的关系

图 2 算法的性能

影响算法效率的一个重要参数是竞选半径 R_c , 该参数直接决定了层次结构中代理节点的规模. 图 2 给出了网络总节点个数为 100 时不同的竞选半径下的 RN 个数和 MS 轨道长度. 从图 2(a)中的数据曲线可以看出: 竞选半径 R_c 越大, 则获得的最终 RN 个数越少. 进一步地, 一个大的 R_c 会导致算法的时间效

率降低. 因为 R_c 越大, 当前候选代理节点参与竞选的候选 RN 邻居越多; 最终 RN 的规模越小, 以 RN 为根的子网的规模增大, 单个 RN 的负载就越大. 图 2(b)给出了不同的竞争半径下获取的 MS 移动轨道长度, 从图中可以看出, 随着 R_c 的增大, 生成的 MS 移动轨道的长度逐渐缩短. 为了在能量效率和数据收集延迟两方面取得平衡, 在实际应用中可以对 R_c 的数值进行适时调整, 可见算法具有较好的灵活性.

5 结语

针对引入移动汇点的 WSN 数据收集延迟问题, 给出了一种基于代理模式的 MS 轨道规划算法. 该算法考虑代理节点间能量消耗的平衡, 有效减少了 MS 的移动轨道长度. 仿真实验验证了所提出算法的有效性.

参考文献

- 1 Francesco MD, Das S, Anastasi G. Data collection in wireless sensor networks with mobile elements: A survey. ACM Trans. on Sensor Networks, 2011, 8(1): 1–31.
- 2 丁杰, 刘丹谱. 移动 Sink 环境下的无线传感器网络数据收集节能算法. 北京邮电大学学报, 2013, 36(5): 51–55.
- 3 张希伟, 戴海鹏, 徐力杰, 陈贵海. 无线传感器网络中移动协助的数据收集策略. 软件学报, 2013, 24(2): 198–214.
- 4 Xing G, Wang T, Jia W, Li M. Rendezvous design algorithms for wireless sensor networks with a mobile base station. Proc. of MobiHoc. 2008. 231–240.
- 5 Zhao M, Yang Y. Bounded relay hop mobile data gathering in wireless sensor networks. IEEE Trans. on Computing, 2012, 61(2): 265–277.
- 6 Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660–67.
- 7 Ye F, Zhong G, Lu S, Zhang L. GRAdient broadcast: A robust data delivery protocol for large scale sensor networks. ACM Wireless Networks, 2005, 11(3): 285–298.