

可充电传感网中移动式能量补给及数据收集策略研究

刘俊辰¹ 梁俊斌¹ 王 田² 蒋 婵¹ 李陶深¹

(广西大学计算机与电子信息学院 南宁 530004)¹ (华侨大学计算机科学与技术学院 厦门 362021)²

摘 要 可充电无线传感器网络是一种新型的无线传感网,它利用移动充电车在收集数据的同时给能量低的节点充电,可广泛应用于需要长期监测环境的应用中。但是,移动充电车如何在给定的延迟内完成数据收集,降低网络能耗并尽可能多地给低能量节点补充能量是一个具有挑战性的问题。因此提出一个新的算法 RSEP(Root Selection with Energy Prediction)。首先,限定充电车的路径长度以保证延迟。然后,将路径上的低能量节点作为根节点,构造多棵数据收集树。若根节点能量可以保证其短期内不会死亡,则从树中寻找一条等于树的直径的路径。在该路径上选取网络中邻居最多的节点作为新的根节点,以改变树的结构来降低树高。树上的节点将它们的数据及能量信息沿着树传送到根节点。最后,移动充电车沿着充电路径为各个根节点充电时,就可以收集各个树上节点的数据及能量信息。此外,充电车收集到的能量信息会随着时间推移而“过时”,而能量信息是根节点选择时的重要参考因素。因此,充电车利用马尔科夫模型预测节点在下一轮数据收集开始时的能量,从而优化根节点的选择。仿真实验结果表明,与目前已有的算法相比,RSEP 算法可以以较少的网络总能耗完成充电,并且每轮充电时间均较短。

关键词 可充电无线传感器网络,移动式能量补给,能耗,能量预测

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.10.020

Mobile Energy Replenishment and Data Collection Strategies in Rechargeable Sensor Networks

LIU Jun-chen¹ LIANG Jun-bin¹ WANG Tian² JIANG Chan¹ LI Tao-shen¹

(School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)¹

(College of Computer Science & Technology, Huaqiao University, Xiamen 362021, China)²

Abstract Rechargeable wireless sensor network is a new type of wireless sensor network, which uses mobile wireless charging vehicle (MWCV) to charge the nodes with low energy in the network, as well as collect data from the network. The network can be used for applications that need to perform long time monitoring. However, it is a challenge to control the MWCV to finish data collection within given deadline in an energy efficient fashion, and achieve the target of charging as many low energy nodes as possible. In this paper, a novel algorithm named RSEP (Root Selection with Energy Prediction) was proposed. Firstly, the length of MWCV's walking path is constrained to guarantee the latency. Then, all the low energy nodes in the walking path are selected to be roots, by which multiple data collection trees are constructed. If a root's energy is enough for the root to maintain for more than a round, a path equaling to the diameter of the tree should be found. In the path, a node with the largest number of neighbors in the network is selected to be a new root. A new tree is formed by adjusting the old tree's structure through the new root. All the nodes in the tree transmit their data and energy information to the root. Finally, when MWCV walks along its path to charge the low energy nodes, it can collect all data and energy information from the trees rooted at these nodes. On the other hand, the energy information will become out-of-date with the time elapses. MWCV uses the Markov model to predict the nodes' energy level at the time when next round of data collection starts, so as to optimize the roots' selection. Theoretical analysis and simulation results show that compared with existing works, RSEP algorithm can accomplish a round's charging with lower total energy consumption and shorter time duration.

Keywords Rechargeable wireless sensor networks, Mobile energy replenishment, Energy consumption, Energy prediction

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由

大量具有传感、数据处理和无线通信能力的传感器节点组织而成的多跳网络。WSN 能够对现实环境进行实时监测,并将采集到的数据发送给用户^[1]。通过对数据的分析处理,人们

到稿日期:2015-09-10 返修日期:2015-11-20 本文受国家自然科学基金(61562005, 61572206, 61363067, 61202468),广西自然科学基金(2015GXNSFAA139286),香江学者计划项目(XJ2013028),2015年广西高校科技研究项目(KY2015YB486),2013年广西高等学校中青年优秀骨干教师培养工程项目资助。

刘俊辰(1988-),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络;梁俊斌(1979-),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为无线传感器网络;王 田(1982-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为无线传感器网络;蒋 婵(1980-),女,博士生,讲师,主要研究方向为无线传感器网络;李陶深(1937-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络及优化理论。

可以获得温度、湿度、光、压力等^[2]所需信息。传感器节点通常被部署在恶劣的环境中,靠人力给传感器更换电池不仅难度大而且成本高。此外,节点所携带的电量有限,并且工作时需要不断消耗能量。这使得节点的能量成为了制约无线传感器网络生命周期的主要因素。当前解决能耗问题的主要思路是优化节点的布局^[3],使网络中节点负载均衡;或采用高效的网络层和数据链路层协议进行数据收集^[4]、控制节点的采样频率^[5],减少冗余数据的传输,从而延长整个网络的生命周期。然而,无论哪种方式都是以牺牲节点的工作效率为代价的,具有一定的局限性。

近年来,随着充电技术的发展,节点可以从外部获取新的能量,从而能长时间不间断地工作,具有较高的工作性能和成本效益。文献[6-8]等策略让节点从周围环境提取能量(如太阳能、风能等),从而延长网络生命周期。尽管环境能量补给策略能够在一定程度上缓解节点能量有限的状况,但是这种策略十分依赖于环境条件。如果不利于节点补充能量的天气持续的时间较长,势必影响传感器网络的正常工作。

为了解决以上问题,文献[9]提出了基于无线能量传输技术的能量补给策略。在网络中,充电车游走于各个节点,利用无线能量传输技术为节点补充能量并收集节点上的数据。当移动充电车和节点的充电距离为2~3m时,转移60W功率电能的效率可以达到75%^[10]。这种无线能量的传输十分稳定,为无线传感器网络的持久运作提供了条件。无线能量传输的主要优势为:1)它不会受限于天气原因,可以在2m左右为传感器节点传输电能;2)它不需要充电设备与接收设备接触;3)在为节点补充能量的过程中,它不会影响传感器节点感知、传送和接收数据。

现有工作在进行数据收集时通常选取能量低的节点作为充电车的停留点,并以这些节点作为根节点构造数据收集树,具有一定的可行性,但是并没有充分考虑网络的拓扑结构。虽然选择低能量节点作为充电目标会大大增加充电车每轮的能量补给总量,但是容易导致较大的数据传输延迟。这是因为节点是随机部署的,当低能量的节点出现在网络区域的边缘时,以它们为根构造的数据收集树会有较大的树高,导致数据包需要传递多次才能到达充电车,造成较大的数据传输延迟和网络能耗。

本文提出了一个新的算法RSEP(Root Selection with Energy Prediction),可以在给定的延迟内完成数据收集,降低网络能耗并尽可能多地给低能量节点补充能量。首先,将网络建模为一个图。如果网络是不连通的,则多个子网可形成多个子图,每个子图称为一个连通分量。算法在路径长度限定的条件下,从每个连通分量内都选择了节点作为充电车的访问目标,保证全网数据得以收集。然后以这些节点为根节点构造多棵孩子与父亲节点距离较短的树。对于根节点能量较高的树,采用替换根节点的方式降低树高。最后,充电车为最终确定下来的根节点充电,并收集各个树上的数据。此外,利用马尔科夫模型预测节点在未来一段时间的能耗,从而计算出节点在下一轮充电开始时的电量,优化根节点的选择。

本文的主要贡献为:1)针对某些数据收集树高度过大而导致的数据收集延迟大和能量消耗大的问题,采用了替换根节点的方法(若根节点能量大于阈值,则选取新的根节点,改变树结构),既保证了网络的持久运作,又降低了网络的能耗。

2)充分考虑节点能量变化的因素,利用马尔科夫模型预测节点的能耗,并以此为基础计算节点每轮开始时的能量,使充电目标的选择更为合理。

本文第2节介绍可充电传感器网络的研究现状和相关工作;第3节是网络模型和问题描述;第4节阐述算法RSEP;第5节进行算法性能分析;第6节通过仿真实验,验证算法RSEP的有效性;最后对全文进行总结。

2 相关工作

近年来,大量的工作对可充电无线传感器网络中低延迟的充电路径规划进行研究。根据移动充电车的路径规划方式,将当前的工作划分为以下3类。

(1) 询问式路径规划

询问式路径规划是可充电WSN中一种基本的路径规划方式。它的主要思想是:首先,网络中的每个传感器节点向移动充电车发送自己的位置信息。然后,根据收集到的位置信息,移动充电车计算出一条经过所有节点位置的最短路径。最后,移动充电车沿着最短回路收集数据并检查节点能量是否低于预先设定的阈值。如果节点的能量低于阈值,则移动充电车为该节点充电。比较典型的有EPWPT^[11],DPG-Scheme^[12],RLT^[13]。

然而,在充电过程中,如果绝大多数节点的剩余能量都高于预先设定的阈值,那么移动充电车行走一圈只能为少数的节点充电。这样不仅浪费了其行走所消耗的能量,而且浪费了大量的时间检查节点是否需要充电。简言之,这种路径规划方式往往是低效的。

(2) 请求式路径规划

在请求式路径规划中,当节点的能量低于阈值时,节点向移动充电车发送一个充电请求,移动充电车根据收到的请求为节点补充能量并收集数据。基于这种路径规划模式,文献[14]提出了一种最近优先算法NJNP。该算法的主要思想是:移动充电车根据收集到的充电请求信息,选择离自己最近的需要充电的节点进行能量补给。如果移动充电车对所有发送请求消息的节点进行能量补给,则移动充电车完成此轮充电并回到原点。然而,这种策略没有考虑延迟,如果移动充电车不断收到节点发送的充电请求消息,那么移动充电车需要经过较长的时间才能回到原点从而造成较大的延迟。

为了缩短延迟,文献[15]提出了一种基于分簇充电算法。首先,根据收集到的充电请求消息,充电车采用K-means算法^[16]将需要充电的低能量节点分成K个簇。然后,充电车在限定的路径长度内按簇进行充电。这种策略可以避免充电车为了寻找单个节点浪费大量移动,其可以在限定路径内访问更多的节点。在文献[17]中,当节点能量低于警戒线时,会向基站发送充电请求。基站根据发送充电请求的低能量节点的位置和能量,为充电车规划充电路径,在有效降低充电延迟的同时增加了充电总量。但是,在请求式路径规划中,节点频繁发送充电请求消息会消耗较多的能量,增加了整个网络总的能量开销。

(3) 统筹式路径规划

最近,研究者提出一种新的路径规划方式即统筹式路径规划。这种策略的主要思想是:移动无线充电车选取网络中低能量节点作为锚点,负责收集周围节点的数据。移动无线充电车遍历这些锚点,在充电的同时收集锚点上的数据。比

较经典的有 J-Roc^[18], ERDC^[19], J-MERDG^[20], WerMDG^[21]。但是, 统筹式充电只是选取能量低的节点作为锚点, 没有考虑网络的拓扑结构。在实际应用中, 网络中的节点往往是随机部署的, 一些区域的节点可能比较集中。当锚点处于这些密集区域的边缘时, 收集区域内节点的数据会造成较大的延迟和能耗。此外, 移动充电车在给节点充电的同时, 也要收集节点感知到的数据和节点能量信息。移动充电车根据收集到的能量信息决定下一轮的充电目标。然而, 节点是持续工作的, 节点的能量在不断发生变化, 如果移动充电车根据“过时”的能量信息选择充电目标, 势必影响下一轮充电目标选择的准确性。

本文借鉴 WerMDG 的思想, 提出了一种新的基于能量预测的根节点选择策略 RSEP。RSEP 在延迟限定的条件下, 替换了导致系统高能耗的根节点, 并降低了各个数据收集树的树高, 从而使得充电车能够在较短时间内收集到收集树上所有节点感知的数据并降低总能耗。此外, 本文利用马尔科夫模型来预测节点的能量, 使下一轮充电前的根节点选择更为合理。

3 系统模型和问题描述

在传统的工作中, 往往假设网络是连通的。但是, 在实际应用中, 由于网络区域广阔, 且节点是随机部署的, 难以保证网络的连通性。鉴于实际应用的需要, 本文研究一个基于移动充电车的充电及数据收集策略 RSEP。RSEP 能够较好地适用于连通或非连通的可充电无线传感器网络。

3.1 网络模型

在面积为 $M \times M$ 平方米的正方形区域内随机部署一个移动无线充电车 (Mobile Wireless Charging Vehicle, MWCV) 和 n 个静态可充电传感器节点, 并利用 MWCV 收集各节点感知的数据且为低能量的节点补充能量。整个传感器网络组成一个无向图 $G(V, E)$, 图中可能包含一个或多个连通子图。其中, V 是可充电节点集合, $V = v_1, \dots, v_{n-1}, v_n$, $|V| = n$; E 是边的集合。如果两个节点 v_i 和 v_j 可以相互通信, 则边 $(v_i, v_j) \in E$ 。 $|E| = m$ 为边的数量。网络中各节点感知的数据大小固定, 并且感知的数据不与接收到的数据聚合。网络具有如下性质: 1) 节点部署后不再移动; 2) 所有节点的初始能量异构; 3) 所有节点的通信半径都为 $r \ll M$; 4) 移动无线充电车的能量充足且能够在网络中任意行走; 5) 在同一时刻, 移动无线充电车只能为一个节点进行充电; 6) 节点处于休眠和感知两种状态, 节点只有接收到充电车发送的数据请求消息时, 才进行接收和转发数据。

3.2 相关定义

定义 1 (根节点) 在网络中被确定为充电目标, 并以它们为根构造树的节点。

定义 2 (轮) 移动无线充电车遍历所有根节点所在位置为其补给能量, 同时收集所有节点的数据的过程。

定义 3 (能量阈值) 对于网络中的一棵树, 替换根节点前需要判断根节点能量是否超过一个临界值, 该临界值称为能量阈值。

定义 4 (停留延迟) 移动无线充电车在各个根节点处停留时间之和。

定义 5 (巡回延迟) 移动无线充电车遍历所有根节点, 最终回到起点所用的时间, 包括移动无线充电车在网络中行

走的时间和充电车停留延迟。

定义 6 (巡回间隔) 第一轮充电结束到第二轮充电开始之间的时间。

3.3 问题描述

在传统的工作中, 通常将能量低的节点作为根节点构造数据收集树, 树上的节点将它们的数据及能量信息沿着树传送到根节点, 当充电车靠近这些根节点并为其补充能量时, 根节点将收集到的数据发送给充电车。然而, 在实际应用中, 由于节点是随机部署的, 节点的分布往往不均匀。因此, 在网络中的某些区域, 很可能存在较多的节点, 称这样的区域为密集区域。如果低能量节点位于密集区域的边缘, 则该密集区域内节点所构成的数据收集树很可能拥有较大的树高, 容易导致较大的数据收集延迟, 而且过高的树容易导致数据包需要传递多次才能到达充电车, 造成较大的网络能耗。此外, 节点的随机部署也难以保证网络的连通性。若某个连通分量中没有节点被选为根节点, 充电车则不会访问这个连通分量, 从而影响整个网络数据收集的完整性。

另一方面, 充电车到达低能量节点所在位置时, 既要为根节点充电又要收集存储在根节点中节点感知的数据和节点的能量信息。然而, 当充电车离开根节点所在位置时, 节点是继续工作的, 这会导致充电车收集到的能量信息过时。如果充电车利用过时的能量信息决定下一轮的充电目标, 势必会影响充电的准确性。

本文研究的主要问题为: 如何在路径长度限定的情况下规划路径, 使充电车可以访问尽可能多的低能量节点? 此外, 以路径上低能量节点为根节点构建树后, 如何在限定的树高下改变树结构以降低能耗? 同时, 如何利用能量预测, 使每轮根节点的选择更为合理?

4 算法 RSEP 的设计

4.1 算法的基本思想

在可充电 WSN 中, 算法 RSEP 分为 4 个阶段完成能量补给和数据收集。第一阶段, MWCV 执行根节点初步选择算法。以节点的能量作为判断标准, 在限定的路径长度下, 尽可能选择最多的低能量节点作为根节点。第二阶段, 当根节点能量大于阈值 th 时, 执行根节点替代算法, 降低树高, 使收集数据的能量消耗减少、收集延迟降低。第三阶段, MWCV 沿最短路径行走并为根节点充电, 同时收集存储在根节点的数据和能量信息。第四阶段, MWCV 利用这些能量信息和预测算法, 计算各节点在下一轮开始时的能量。

4.2 算法 RSEP 的描述

4.2.1 第一阶段根节点的初步选择

在实际应用中, 节点往往是随机部署的, 网络中可能存在多个由节点和无线通信链路组成的连通分量。为确保 MWCV 能够收集到所有节点感知的数据, 首先从每个连通分量中选取能量最低的节点; 然后继续选择低能量的节点, 使得它们与之前选出的节点构成一条不超过限定路径的 TSP 路径, 以便 MWCV 能够尽可能多地补给节点能量。具体做法如下:

首先, 利用 MWCV 收集每个节点的位置和能量信息, 记录节点序列 N 中节点的剩余能量信息 B_i 。然后, 将各个连通分量中能量最低的节点组成一个序列 Q 。除去序列 Q 中的节点, 将其他节点按剩余能量的由小到大进行排序, 形成序列

R。将 Q 和 R 合并成一个序列 P，其中 Q 排在 R 之前。然后，在限定的遍历路径长度 L_{isp} 下，MWCVC 从序列 P 中选取尽可能多的节点，这些节点构成根节点序列 P' 。

为了快速确定序列 P' ，首先，取节点数量 n 的中间值 m 。然后，利用最近邻居算法^[22]计算出 m 个节点时的最短路径 TSPNN(m)。若 TSPNN(m) 大于 L_{isp} ，则 m 的值减 1，再次计算路径长度 TSPNN(m)；若 TSPNN(m) 小于 L_{isp} ，则 m 的值加 1，再次计算路径长度 TSPNN(m)；若 TSPNN(m) 小于等于 L_{isp} ，且 TSPNN($m+1$) 大于 L_{isp} ，那么可以确定 m 为目标根节点数；根节点初步选择算法 RootFirstSelection($P, node, n, L_{isp}$) 的具体描述如算法 1 所示。

算法 1 RootFirstSelection($P, node, n, L_{isp}$)

输入：节点集合 P，节点信息 node，节点数量 n，限定路径长度 L_{isp}

输出：根节点数量 m

1. $m = \text{int}32(n/2)$;
2. 调用 TSP 最近邻居算法 (TSPNN) 计算遍历前 m 个节点需要的路径长度，用 TSPNN($P, node, m$) 表示；
3. $a = \text{TSPNN}(P, node, m) \leq L_{isp} \ \&\& \ \text{TSPNN}(P, node, m+1) > L_{isp}$;
4. while ($\sim a$)
5. if $\text{TSPNN}(P, node, m) > L_{isp}$
6. $m = m - 1$;
7. else
8. $m = m + 1$;
9. end
10. $a = \text{TSPNN}(P, node, m) \leq L_{isp} \ \&\& \ \text{TSPNN}(P, node, m+1) > L_{isp}$;
11. end

4.2.2 第二阶段构建树

在第一阶段选取根节点的基础上，构造数据收集树，使得网络中的其它节点都加入到数据收集树中，最终形成 m 棵树。由于节点转发数据所消耗的能量与数据传输的距离和数据包的长度密切相关且成正比的关系，即 $e_i \propto d_{ij}^\alpha l_p^{23}$ 。其中， e_i 代表节点传递数据包消耗的能量； d_{ij} 代表节点 i 和节点 j 之间的距离； α 为路径损耗指数且取值范围为 $[2, 4]$ ； l_p 代表数据包的长度。为此，本文在构造数据收集树时考虑了节点之间的距离这一重要参数。此外，在构造数据收集树的过程中，限定节点的孩子数量，使得各节点的能量消耗得到有效均衡。限定孩子数的取值由网络中的节点数量决定。构造 m 棵数据收集树的具体步骤如下：

- (1) 初始时，各个根节点被标记为各个树的第 0 层节点。
- (2) 根节点的邻居节点加入树。若在节点的通信范围内有多个根节点，那么该节点选择距离自己最近的根节点入树。这些节点被标记为第 1 层节点。
- (3) 第 i 层上的节点按能量从高到低的顺序，选取距离自己最近的 k 个邻居节点作为自己的孩子。若邻居节点数大于 k ，那么判断第 k 个之后的节点能否与 i 层上剩余节点进行通信。若不能通信，这些节点还是选择原节点加入树；若可以通信，则等待加入第 i 层上其他的节点。新加入树的节点构成树的第 $i+1$ 层节点。循环执行此过程，直到 i 层上所有节点的邻居都被加入树中。其中， i 是大于 1 的正整数。
- (4) 迭代执行步骤 (3)，直到网络中所有的节点都加入树中。此时，网络中形成 m 棵数据收集树。

4.2.3 第三阶段选择性改变树结构

为了进一步降低数据收集树的数据收集延迟和能耗，

RSEP 在根节点能量大于阈值的收集树上选取新的根节点代替原根节点。执行替换根节点需要同时满足以下两个条件：1) 原根节点的能量大于给定的阈值 th ；2) 替换后的根节点与其他根节点构成的最短路径小于 L_{isp} 。替换根节点的具体步骤如下：

(1) 判定所有根节点的剩余能量。当根节点的能量大于能量阈值 th 时，从树中寻找一条等于树的直径的路径。首先从根节点的不同分支中选出跳数最大的叶子节点。然后，从选出的叶子节点中选取两个跳数最大的叶子节点。此时，这两个叶子节点之间的路径即为树中的最长路径。将最长路径上的节点排序，其中跳数最多的叶子节点为序列中第一个元素，跳数次多的叶子节点为序列中最后一个元素。

(2) 若最长路径上节点总数为 s ，判断第 $\lceil s/2 \rceil, \lceil s/2 \rceil - 1, \lceil s/2 \rceil + 1$ 个节点的邻居节点数量。选择邻居节点数最大的一个节点作为新的根节点。

(3) 用新的根节点替代原根节点在序列 P 中的位置，再次计算 MWCVC 访问所有根节点的最短路径。若计算出的路径长度小于限定路径 L_{isp} ，则执行替换；否则不执行替换。

在上述替换根节点的步骤 (2) 中，选择位于最长路径中间部分且邻居节点数大的节点作为新的根节点。然后，新的根节点将邻居节点作为自己的孩子。这样能够使数据收集树上第一层的节点数增多，有利于减少数据收集数的总跳数，最终达到降低树高、减少数据包传递总跳数的目的。替换根节点算法 reRoot($P, m, n, node, r, th, L_{isp}$) 的具体描述如算法 2 所示。

算法 2 reRoot($P, m, n, node, r, th, L_{isp}$)

输入：节点集合 P，根节点数量 m ，节点数 n ，节点信息 node，通信半径 r ，能量阈值 th ，限定路径长度 L_{isp}

输出：节点集合 P，节点信息 node

1. for 所有根节点
2. if 根节点能量大于或等于 th
3. 在最长路径上选取新的根节点；
4. end
5. if 新的根节点集合构成的回路长度小于或等于 L_{isp}
6. 在原生成树中，新根节点 new 将邻居节点作为自己的孩子；
7. 将新根节点 new 到原根节点的路径与原根节点的邻居节点取交集，将交集的节点作为原根节点的父亲；
8. end
9. end

为更好地理解替换根节点算法，下面以图 1 为例详细描述替换根节点算法的执行过程。假设节点发送和接收一份数据包消耗的能量分别为 e_t 和 e_r ，限定的路径长度为 L_{isp} 。

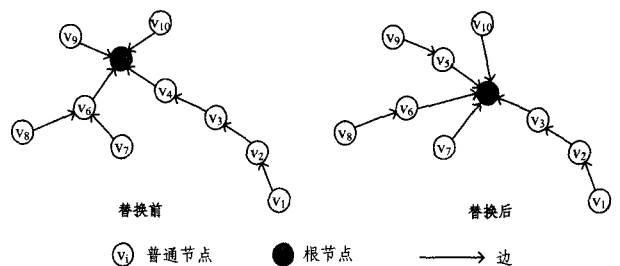


图 1 根节点替换前后对比图

如图 1 所示，在非汇聚数据收集的模式下，节点 v_5 作为根节点时，该树因数据收集产生的能耗为 $17(e_t + e_r)$ 。由于数据收集树的树高是 4，根节点 v_5 从发送数据请求消息到接收所有节点的数据收集延迟为 $2 \times 4 = 8$ 跳的时间。此外，根

节点 v_5 的能量大于能量阈值 th 。因此,在最长路径 $v_1-v_2-v_3-v_4-v_5-v_6-v_7$ 上选取 v_4, v_3, v_5 , 并依次计算其邻居节点的数量。从图中可知, v_4, v_3, v_5 的邻居节点数依次为 5, 2, 4, 故选取节点 v_4 作为备选根节点。然后,在节点序列 P 中,用 v_4 替换 v_5 所在的位置,并重新计算序列 P 中前 m 个节点构成的路径长度。经计算得到,新的路径长度小于给定的路径长度 L_{bsp} , 故 v_4 被确定为新的根节点。此时,该树因数据收集产生的能耗为 $14(e_t + e_r)$, 数据收集延迟为 6 跳的时间。与 v_5 作为根节点相比,节点 v_4 作为新的根节点能够有效降低数据收集产生的能耗和延迟。

4.2.4 第四阶段节点剩余能量的预测

第三阶段完成之后即可确定最终的根节点。针对所有根节点所构成的集合,利用最近邻居算法^[22]计算一条 TSP 路径。充电车沿着 TSP 路径行走即可对根节点进行充电,同时收集存储在根节点中的数据和节点的能量信息。当充电车回到起点时,充电车完成一轮的充电和数据收集。此时,如果充电车根据收集到的能量信息选取充电目标,那么所选取的充电目标往往是不准确的,主要是因为充电车离开后,节点仍然要感知数据。因此,节点的剩余能量会发生变化。为了使下一轮根节点选择更为合理,本文引入马尔科夫模型对节点的能量进行预测^[24]。该模型预测的能量非常接近真实值,误差仅为 3%。马尔科夫模型能量预测的具体实现过程如下。

节点在未来 T 个 time-step 的能量消耗 E^T 可表示为:

$$E^T = \sum_{s=1}^M \left(\sum_{t=1}^T P_{is}^{(t)} \right) \times E_s \quad (1)$$

其中, M 表示节点的 M 种状态,节点的状态包括休眠和感知; $P_{is}^{(t)}$ 表示节点在状态 i 经过 t 步转移为状态 s 的概率; E_s 表示节点停留在状态 S 时,一个 time-step 内的能量消耗。

利用式(1)可以计算出节点 i 在离开后的能量消耗。当 MWCV 离开后,节点设置两个定时器: T_s 和 T_f , 它们分别对应休眠状态和感知状态。当休眠状态的定时器 T_s 或感知状态的定时器 T_f 超时后,节点以概率 P_s 进入休眠状态,以概率 $1-P_s$ 进入感知状态。

假设 MWCV 在根节点 $P(j)$ 的停留时间为 z_j 。MWCV 离开后的时间为:

$$T = \frac{L'}{V_c} + \sum_j z_j + T_{interval} \quad (2)$$

其中, V_c 表示 MWCV 的速度; L' 表示剩余路径长度; $T_{interval}$ 表示每轮充电之间的时间间隔。然后,将式(2)中的 T 代入式(1)即可计算出 E^T 。再根据式(3)可以计算出节点 i 下一轮开始时的剩余能量 $E_{i_current}$ 。

$$E_{i_current} = B_i - C_i - E^T \quad (3)$$

其中,在充电车发送数据请求消息时,节点 i 的能量为 B_i ; 节点收发数据的能耗为 C_i ; 节点在 MWCV 离开后到下一轮充电开始前的能耗为 E^T 。通过式(3),MWCV 可以计算出每个节点在新一轮开始时的能量。然后,根据计算所得的能量信息,MWCV 能够准确地对节点能量进行排序,保证了充电目标选取的准确性。

5 算法性能分析

5.1 RSEP 问题的难度

定理 1 RSEP 问题是 NP-hard 问题。

证明: 通过一个多项式时间的归约可以将 TSP 问题等价转换为 RSEP 问题的一个特例,从而证明 RSEP 问题是 NP-

hard 问题。首先,给定一个 TSP 的实例无向图 $G(V, E)$ 。然后,构造一个拓扑结构与 G 一样的图 $G'(V', E')$, 并将无向图 $G'(V', E')$ 作为 RSEP 的一个实例。其中, V' 表示网络中所有传感器节点, E' 表示任意两个节点之间的边。我们可以不断减小节点的通信半径,当节点的通信半径足够小时,网络中的任意两个节点无法直接相互通信。减少节点通信半径使得各节点无法直接通信的操作非常直观而且能够在多项式的时间内完成。在网络中的所有节点无法直接相互通信的情况下,为了收集到全网节点所感知的数据,MWCV 必须遍历网络中的所有节点进行数据收集。这就意味着所有节点都是根节点。此时,图 G' 中数据收集路径长度与图 G 中 TSP 的总权值是相等的。当且仅当在图 G' 中 RSEP 的数据收集路径长度最小时,图 G 中的 TSP 有最小距离代价的路径。因此,本文研究的 RSEP 问题是 NP-hard 问题。

5.2 预测模型对算法性能的影响

定理 2 预测模型可以使根节点的选取更为合理。

证明: 假设能量阈值为 th , 节点 i 发送给充电车的能量信息为 B_i , B_i 的值较低,可以被选为根节点,且 B_i 大于 th 。节点 i 在充电车离开后,到下一轮充电开始前所用时间记为 T , 消耗的能量记为 E^T 。当 T 足够大时,可以满足 $0 < B_i - E^T < th$ 。此时,由于节点 i 的能量小于能量阈值,因此无法执行根节点的替换。若不采用预测模型预测节点的能耗,下一轮充电开始时节点 i 的电量不会发生变化。当节点 i 被选为根节点构建树后,由于 B_i 大于能量阈值 th ,为了降低树高,算法会选取新的节点代替 i 作为根节点。但此时节点 i 能量的真实值已经小于能量阈值,若本轮不对其充电,可能导致节点 i 的死亡。因此,引入预测模型可以避免因充电间隔过长导致的节点死亡,使根节点的选取更为合理。

5.3 算法的时间复杂度

定理 3 在最坏的情况下,RSEP 算法的时间复杂度为 $O(n^3)$ 。

证明: 将根据 RSEP 算法执行的 4 个阶段详细分析 RSEP 算法的时间复杂度。

RSEP 算法的第一阶段:第 1 步是计算整个网络的连通分量,所需的时间复杂度是 $O(n^2)$;第 2 步是将节点进行能量排序,所需的时间复杂度是 $O(n^2)$;第 3 步是选择根节点,最坏的情况是全部根节点都要被访问到,此时所需的时间复杂度是 $O(n^3)$ 。所以,第一阶段的最坏时间复杂度为 $O(n^3)$ 。

RSEP 算法的第二阶段:第 1 步是将所有根节点入树,在最坏的情况下,所有的节点都为根节点,所需的时间复杂度是 $O(n)$;第 2-3 步是节点选择距自己最近的根节点作为自己的父亲,所需的时间复杂度是 $O(n^2)$;第 4-21 步是其余节点逐步加入各个树,所需的时间复杂度是 $O(n^3)$ 。第二阶段的最坏时间复杂度为 $O(n^3)$ 。

RSEP 算法的第三阶段:在最坏情况下,所有的节点都被选为根节点且全部需要执行替换根节点算法。其中替换根节点的时间复杂度为 $O(n)$ 。所以,第三阶段的最坏时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

RSEP 算法的第四阶段:计算每个节点的能耗,所需的时间复杂度是 $O(n)$ 。

综上所述,在最坏的情况下,RSEP 算法的时间复杂度为 $O(n^3) + O(n^3) + O(n^2) + O(n)$, 即整个算法的时间复杂度为 $O(n^3)$ 。

6 仿真实验与结果分析

假设节点随机分布在面积为 100×100 平方米的监测区域内。为了节省能量,节点大部分时间处于休眠状态,避免空闲侦听所带来的额外能耗。节点会周期性地短暂醒来并感知周围的环境。在充电车访问自己时,节点也能够被唤醒并将数据发送给充电车,然后重新进入睡眠状态。为方便协议的分析,假设节点发送数据能耗大约是接收数据能耗的两倍,即 $e_s = 2e_r$ 。该假设在文献[25,26]中均被采用。其他实验参数如表 1 所列。

表 1 实验参数

符号	值	描述
r	15m	节点通信半径
d_r	1024 bit	每份数据包的大小
e_s	100nJ/bit	发送数据的能量消耗
e_r	50nJ/bit	接收数据的能量消耗
k	2	限定孩子数
e	[0.15J, 1J]	节点初始能量
L_{tsp}	350m	限定路径长度
V_C	15m/s	MWCV 的移动速度
T_s	60s	休眠状态定时器
T_f	60s	感知状态定时器
E_s	0.1nJ	休眠状态一个 time-step 能耗
E_f	1.5nJ	感知状态一个 time-step 能耗
$T_{interval}$	1h	巡回间隔
P_S	0.7	状态转移概率
time-step	0.1s	分步时间

目前主流的能量补给及数据收集策略主要采用统筹式路径规划,如 J-Roc^[18], ERDC^[19], J-MERDG^[20], WerMDG^[21] 等。但是, J-Roc^[18] 和 ERDC^[19] 没有考虑延迟问题, J-MERDG^[20] 没有考虑到接收数据产生的能耗,只有算法 WerMDG 同时考虑了延迟及接收数据能耗的问题,与本文算法 RSEP 的目标一致。因此,选择 WerMDG 与 RSEP 进行对比。主要的实验对比分为以下两组:第一组分析节点数量变化对各个算法每轮充电的数据收集能耗和巡回延迟的影响;第二组分析能量阈值变化对数据收集能耗和巡回延迟的影响。此外,本文的仿真实验是在 Matlab 平台上进行的,且实验结果均是算法执行 200 轮的平均结果。

6.1 网络的数据收集能耗和巡回延迟

本节采用的能量阈值为 $6 \times 0.01J$, 其它实验参数如表 1 所列。我们测试节点数量分别为 80, 100, 120, 140 和 160 时, 算法 RSEP 和算法 WerMDG 的数据收集能耗和巡回延迟。测试结果如图 2 所示。

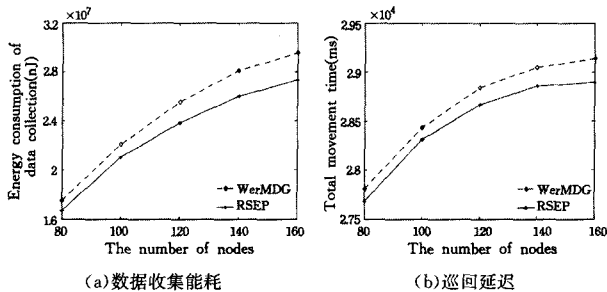


图 2 网络能耗及巡回延迟对比

从图 2(a)可以看出,无论是算法 RSEP 还是算法 WerMDG,其数据收集能耗与节点数量是成正比的。这是因为节点数量增加,网络需要转发的数据包会增多,需要的转发次数也

相应增多,导致了能耗的不断增加。此外,随着节点数量的增加,RSEP 的数据收集能耗比 WerMDG 更低。这是因为网络中节点数量越多,形成树的高度就越高,使得执行替换根节点后降低树高的效果更明显,从而在非汇聚模式下降低了节点在转发数据时所产生的能耗。

从图 2(b)可以看出,两种算法的巡回延迟与节点数量成正比。主要原因是:随着节点数量的增加,各个树的树高逐步增加,从而增加了数据收集延迟,延长了 MWCV 在根节点处的停留时间。此外,与 WerMDG 算法相比,RSEP 算法获得了较短的巡回延迟。主要有两个原因:(1)根节点初步选取的原则是构成的路径刚好小于 L_{tsp} 。当新根节点构成的最短回路小于 L_{tsp} 时,替换根节点才能被执行,从而保证了 MWCV 在巡回路径上的时间不会增加。(2)由于某些树的根节点被替换,树高降低,数据收集延迟也随之降低,从而降低了 MWCV 在这些根节点的停留时间。

6.2 能量阈值对算法的影响

本节在节点数量为 120 且其它实验参数如表 1 所列的条件下,测试能量阈值变化时,算法 RSEP 和算法 WerMDG 的数据收集能耗和巡回延迟。为了进行公平对比,在每组实验中,无论是网络拓扑还是节点的信息(如节点的能量等)都是一致的。实验结果如图 3 所示。

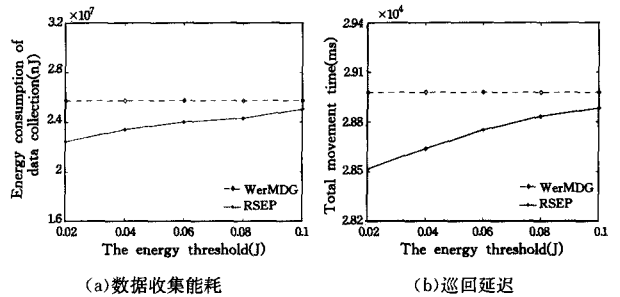


图 3 不同能量阈值下算法性能对比

由图 3 可知,算法 WerMDG 在数据收集能耗和巡回延迟方面保持不变。这是因为在每组实验中,算法 WerMDG 采用相同的初始数据。此外,算法 WerMDG 中没有考虑到根据能量阈值替换根节点,故能量阈值的增加并不影响每轮的树结构。在不调整树结构的前提下,每组实验所测得的实验数据是结果相同。与算法 WerMDG 相比,算法 RSEP 在能量阈值为 $2 \times 0.01J$ 时,数据收集能耗和巡回延迟都有明显的降低。但随着能量阈值的增加,这种差距越来越小。这是因为当节点数量与限定路径长度固定时,每轮所选出的根节点数量基本不变,所选根节点的能量也维持在一个固定的范围。而替换根节点前需要判断根节点的能量,当根节点能量高于或等于能量阈值时,才会继续执行替换。因此,随着能量阈值的增加,网络中满足替换条件的树越来越少,执行替换根节点的几率会越来越小。这样使得算法 WerMDG 和算法 RSEP 获得的数据收集能耗和巡回延迟越来越接近。当能量阈值足够大时,两个算法所获得的数据收集能耗和巡回延迟是一致的。

结束语 本文针对可充电传感器网络,研究了节点能量的补给策略以及非汇聚模式下的数据收集。通过对数据收集模型进行分析,提出一种基于能量预测的算法 RSEP。RSEP 通过执行替换根节点算法有效降低了数据收集树的树高和数据包传输的总跳数。此外,RSEP 通过马尔科夫模型预测出

各节点的当前剩余能量,使充电车能够准确地为网络中的低能量节点补充能量。仿真实验表明,算法 RSEP 有效减少了网络的数据收集能耗和巡回延迟,尤其适用于网络密度较高的应用。

另一方面,网络中的一些低能量节点可能位于监测区域的边缘位置。在限定路径长度下选择这些节点作为根节点,会减少根节点的总量,从而减少了每轮被补给能量的节点的数量。因此,下一步将优化算法 RSEP,使根节点的选择更加合理。

参 考 文 献

- [1] Estrin D, Govindan R, Heidemann J, et al. Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks[C]// Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE Int'l Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 1999: 263-270
- [2] Li Jian-zhong, Gao Hong. Survey on sensor network research [J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(1): 1-15
- [3] Zhang Hang, Tong Xiao-Jun, Wang Zhu, et al. Research on relay node placement considering load balancing based on greedy optimization algorithm in wireless sensor networks [J]. Computer Science, 2015, 42(6): 115-119 (in Chinese)
张航, 佟晓筠, 王翥, 等. WSN 中考虑负载均衡的贪婪寻优中继节点布局算法的研究[J]. 计算机科学, 2015, 42(6): 115-119
- [4] Liu Lin-feng, Guo Ping, Zhao Juan, et al. Data collection strategy based on improved LEACH protocol [J]. Computer Science, 2015, 42(6): 299-302 (in Chinese)
刘林峰, 郭平, 赵娟, 等. 无线传感器网络中一种基于改进的 LEACH 协议的数据收集方案[J]. 计算机科学, 2015, 42(6): 299-302
- [5] Zhang Mei-yan, Cai Wen-yu, Zhou Li-ping. Clustered Predictive Model Based Adaptive Sampling Techniques in Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(1): 200-205 (in Chinese)
张美燕, 蔡文郁, 周丽萍. 基于聚类模型预测的无线传感网自适应采样技术研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(1): 200-205
- [6] Lin K, Yu J, Hsu J, et al. Helimote: enabling long-lived sensor networks through solar energy harvesting[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2005: 309-309
- [7] Kansal A, Hsu J, Zahedi S, et al. Power management in energy harvesting sensor networks[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2007, 6(4): 2007
- [8] Vijayakumar S C, Karthikeyan M, Jeninprabu R. Solar Powered Bicycle for WSN Control and Remote Power Management Applications[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, 10(4): 11103-11111
- [9] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86
- [10] Intel. Wireless Resonant Energy Link (WREL) demo[OL]. <http://software.intel.com/en-us/videos/wireless-resonant-energy-link-wrel-demo>
- [11] Xie Li-guang, Shi Yi, Hou Y T, et al. Making Sensor Networks Immortal: An Energy-Renewal Approach with Wireless Power Transfer[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(6): 1748-1761
- [12] Chen T Y, Wei H W, Cheng Yu-chun, et al. An Efficient Routing Algorithm to Optimize the Lifetime of Sensor Network Using Wireless Charging Vehicle[C]// IEEE 11th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS). Philadelphia: IEEE, 2014: 501-502
- [13] Xie Li-guang, Shi Yi, Hou Y T, et al. Multi-Node Wireless Energy Charging in Sensor Networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2015, 23(2): 437-450
- [14] He Liang, Gu Yu, Pan Jian-ping, et al. On-Demand charging in wireless sensor networks: theories and applications[C]// Proceedings of MASS. Hangzhou: IEEE, 2013: 28-36
- [15] Ren Xiao-jiang, Liang Wei-fa, Xu Wen-zheng. Maximizing charging throughput in rechargeable sensor networks[C]// Proceedings of 23rd International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). Shanghai: IEEE, 2014: 1-8
- [16] Lloyd S P. Least squares quantization in pcm[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1982, 28(2): 129-137
- [17] Ouadou M, Zytoune O, Aboutajdine D. Wireless Charging using Mobile Robot for Lifetime Prolongation in Sensor Networks[C]// Second World Conference on Complex Systems (WCCS). Agadir: IEEE, 2014: 225-230
- [18] Li Zi, Peng Yang, Zhang Wen-sheng, et al. J-RoC: A joint routing and charging scheme to prolong sensor network lifetime[C]// Proceedings of ICNP. Vancouver: IEEE, 2011: 373-382
- [19] Pan Miao, Li Hong-yan, Pang Ya-wei, et al. Optimal Energy Replenishment and Data Collection in Wireless Rechargeable Sensor Networks[C]// Global Communications Conference (GLOBECOM). Austin: IEEE, 2014: 125-130
- [20] Zhao Miao, Li Ji, Yang Yuan-yuan. Joint mobile energy replenishment and data gathering in wireless rechargeable sensor networks[C]// IEEE ITC. 2011: 238-245
- [21] Guo Song-tao, Wang Cong, Yang Yuan-yuan. Mobile Data Gathering with Wireless Energy Replenishment in Rechargeable Sensor Networks[J]. Infocom, 2013, 12(11): 1932-1940
- [22] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Introduction to Algorithms[M]. London: MIT Press, 2001
- [23] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// IEEE HICSS. 2000
- [24] Lin Kai, Zhao Hai, Yin Zhen-yu, et al. A Clustering Hierarchy Arithmetic Based on Energy Prediction for Wireless Sensor Networks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 36(4): 824-828 (in Chinese)
林凯, 赵海, 尹震宇, 等. 一种基于能量预测的无线传感器网络分簇协议[J]. 电子学报, 2008, 36(4): 824-828
- [25] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks[C]// Proceedings of the 6th Annual Int'l Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM). New York: ACM Press, 2000: 56-67
- [26] Wu Yan, Fahmy S, Shroff N B. On the Construction of a Maximum-Lifetime Data Gathering Tree in Sensor Networks: NP-Completeness and Approximation Algorithm [C]// Proceedings of the The 27th Conference on Computer Communications. IEEE Infocom, 2008: 13-18