



移动无线传感网的生存时间优化算法研究^{*}

王章权, 陈友荣, 任条娟, 许 森

(浙江树人大学信息科技学院 杭州 310015)

摘 要: 当 sink 节点位置固定不变时, 分布在 sink 节点周围的传感节点很容易成为枢纽节点, 因转发较多的数据而过早失效。为解决上述问题, 提出移动无线传感网的生存时间优化算法 (LOAMWSN)。LOAMWSN 算法考虑 sink 节点的移动, 采用减聚类算法确定 sink 节点移动的锚点, 采用最近邻插值法寻找能遍历所有锚点的最短路径近似解, 采用分布式非同步 Bellman-Ford 算法构建 sink 节点 k 跳通信范围内的最短路径树。最终, 传感节点沿着最短路径树将数据发送给 sink 节点。仿真结果表明: 在节点均匀分布和非均匀分布的无线传感网中, LOAMWSN 算法都可以延长网络生存时间、平衡节点能耗, 将平均节点能耗保持在较低水平。在一定的条件下, 比 Ratio_w、TPGF 算法更优。

关键词: 移动无线传感网; 网络生存时间; 优化算法; 减聚类

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.10.014

Research on Lifetime Optimization Algorithm for Mobile Wireless Sensor Network

Wang Zhangquan, Chen Yourong, Ren Tiaojuan, Xu Sen

(College of Information Science and Technology, Zhejiang

Shuren University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: When the position of sink node is fixed, the sensor nodes which are distributed around the sink node easily become hub nodes, forward a lot of data and fail prematurely. In order to solve this problem, the lifetime optimization algorithm for mobile wireless sensor network (LOAMWSN) was proposed. LOAMWSN algorithm considers the mobility of sink node, uses subtractive cluster algorithm to determine mobile anchor points of sink node, uses the nearest neighbor interpolation method to find the approximate solution of shortest route which traverse all mobile anchor points, uses distributed asynchronous Bellman-Ford algorithm to construct the shortest path tree in the k -hop range of sink node. Finally, sensor nodes transmit data to sink node along the shortest path tree. Simulation results show that in wireless sensor network of node uniform distribution and non-uniform distribution, LOAMWSN algorithm can prolong the network lifetime, balance the node energy consumption, and remain the average node energy consumption at a low level. Under certain conditions, it outperforms Ratio_w and TPGF algorithms.

Key words: mobile wireless sensor network, network lifetime, optimization algorithm, subtractive cluster

^{*} 国家自然科学基金面上项目 (No.61273212), 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LQ12F03014, No.Y13F010063), 浙江省公益技术研究工业基金资助项目 (No.2012C21042)

1 引言

无线传感网(wireless sensor network, WSN)通常包含大量的传感节点(简称节点)。这些传感节点收集监测区域的信息,并通过单跳或多跳的方式将信息发送给 sink 节点。无线传感网通常应用在室内/室外的环境、卫生和健康管理、电力、库存位置、工厂和过程自动化、地震、建筑结构等方面的监测和动物、人类、车辆等目标的跟踪中,越来越受到产业界和学术界的关注,有加强和改变人们与世界互动的巨大潜力^[1]。

在无线传感网中,网络生存时间是衡量一个网络性能好坏的最重要指标之一。这是因为在大部分情况下无线传感网被部署在无人看守的、危险甚至恶劣的环境中,所有传感节点都采用电池供电且电池不能补充和更换。一旦传感节点能量耗尽,该节点就会失效,这将影响到网络的正常运行,甚至导致网络出现分裂而缩短网络生存时间^[2]。因此,无线传感网的算法研究都需要从节能出发,最大限度地延长网络生存时间,节省重新部署无线传感网的巨大开销^[3]。

目前很多学者专门研究传感节点和 sink 节点位置都固定不变的无线传感网生存时间优化算法,并取得一些成果。参考文献[4]考虑监测区域内节点随机分布,寻找该区域中若干个全覆盖的不相交节点集合,选用遗传算法求解最优网络生存时间的节点集合和相应覆盖率。参考文献[5]考虑节点间通信能耗、能耗因子、节点剩余能量、剩余能量因子等因素,给出一种新的权值计算公式,提出比例权值算法(ratio weight routing algorithm, Ratio_w)。所有节点沿着算法计算的最短路径将数据发送给 sink 节点。参考文献[6]在 GPSR (greedy perimeter stateless routing)算法的基础上提出一个基于地理位置信息的无线多媒体传感网贪婪路由算法——TPGF (two-phase geographical greedy forwarding)算法。TPGF 算法由两步组成:第一步是根据位置信息发现可绕过孔洞的路径;第二步是对路径进行优化,选择最小跳数路径。该算法侧重于解决可绕过孔洞的路径发现,但是没有考虑网络生存时间。

上述算法假设所有节点位置不变,则导致分布在 sink 节点周围的传感节点很容易成为枢纽节点,转发较多的数据而过早失效,从而缩短网络生存时间。不管怎么调整算法,总会出现枢纽节点和监测区域中传感节点能耗分布不均衡。可以通过 sink 节点的移动来解决该问题。sink 节点移动到网络节点分布比较密集或比较关键的位置,让所有

节点都有机会在 sink 节点的附近区域发送数据,从而降低节点通信能耗和平衡网络节点能耗,使得所有节点生存时间一致。参考文献[7]提出一种新的 sink 节点的移动方案,寻找导航代理节点和中间导航节点,解决 TSP(travelling salesman problem),通过网络节点间的合作确定 sink 节点的移动路径,提出传输时延优化和能量优化的数据收集方法。但是该算法没有考虑网络生存时间。参考文献[8]研究大规模无线传感网的权衡网络生存时间和吞吐率算法。在该网络中设置多个集合点(rendezvous point, RP)。RP 通信范围内的一跳节点先收集和缓存其他节点数据,当 sink 节点移动到该 RP 点位置时将数据发送给 sink 节点。参考文献[9]定义多个锚点(anchor point, AP)。sink 节点在每一个锚点上保留一定时间。在 sink 节点附近的传感节点以多跳的方式将数据发送给 sink 节点。但是参考文献[8,9]都没有考虑如何确定 PR 和 AP 的位置和数量。参考文献[10,11]考虑 sink 节点的移动,建立网络生存时间优化模型,通过最优化方法求解,但是求解过程比较复杂。综上所述,有些算法侧重于最优化方法求解,但是求解过程比较复杂,有些算法侧重于路径的发现,但需假设已经确定 sink 节点的移动位置。因此针对上述存在的问题,在总结相关文献的基础上,提出移动无线传感网的生存时间优化算法(lifetime optimization algorithm for mobile wireless sensor network, LOAMWSN)。在该算法中,采用减聚类算法确定 sink 节点移动的锚点,采用最近邻插入法解决 TSP 寻找最短移动路径,采用分布式非同步 Bellman-Ford 算法收集 sink 节点 k 跳通信范围内的数据,从而尽可能提高网络生存时间,平衡节点能耗,将平均节点能耗保持在较低水平。

2 系统假设和能耗模型

2.1 系统假设

(1)所有传感节点随机分布在监测区域中。传感节点位置是固定不变,但是 sink 节点可移动到其他传感节点的位置上收集数据。

(2)无线传感网中只存在一个 sink 节点,而且 sink 节点移动非常快。由于移动过程中的数据收集时间短,收集数据量小,因此不考虑 sink 节点移动过程中的数据采集。

(3)当传感节点不在 sink 节点的数据收集范围内时,所有传感节点的感知数据保存在缓存中,并基本处于睡眠状态。当传感节点在 sink 节点的数据收集范围内,传感节点处于工作状态,通过直接或多跳的方式将数据发送给 sink



节点。

(4)所有节点可安装 GPS 模块或采用其他定位方法获知自身的位置坐标。

(5)所有传感节点具有相同的性能(如感应速率、最大通信半径、初始能量、能耗参数等),采用统一的能耗模型。

(6)sink 节点能量不受限制,但是每个传感节点的电量有限且不能补充。

2.2 能耗模型

根据典型的无线传感网节点能耗模型^[12],节点数据发送能耗由收发数据时的电路电子能耗和放大信号时的信号放大器电子能耗组成。节点 i 发送数据给邻居节点 j 的能耗为:

$$E_{Tx}(g, d) = g_{ij}E_{elec} + g_{ij}\epsilon_{fs}d_{ij}^{\gamma} \quad (1)$$

其中, E_{elec} 表示收发单位比特数据时电路电子能耗, ϵ_{fs} 表示放大单位比特信号时信号放大器电子能耗, d_{ij} 表示节点 i 到节点 j 的距离, $\gamma \in [2, 4]$ 表示数据损耗系数, g_{ij} 表示节点 i 发送给邻居节点 j 的数据量。

节点的数据接收能耗只考虑接收信号时的电子能耗:

$$E_{Rx}(g) = g_{ji}E_{elec} \quad (2)$$

3 算法原理

如图 1 所示,如果 sink 节点处在图中黑色正方形位置,所有传感节点到 sink 节点的位置较远,能耗较大。如果 sink 节点分别移动到 $k_1 \sim k_4$ 区域内的黑色五角星(表示锚点)上(有向线段代表移动路径),负责收集各个区域的数据收集,则可以减少节点数据传输能耗和平衡网络节点能耗。因此,LOAMWSN 算法考虑了 sink 节点的移动,提出了一种生存时间优化算法,但是需要解决以下 3 个问题。第 1 个问题是如何根据节点位置的分布确定 sink 节点移动的锚点,避免锚点过于集中。第 2 个问题如何规划 sink 节点移动的路径,让 sink 节点的移动路程最短,从而减少网络时延。第 3 个问题是当 sink 移动到锚点后,如何收集数据。以下具体分析上述 3 个问题。

3.1 锚点的确定

在 LOAMWSN 算法中, sink 节点应移动到节点密度高的区域,让所有节点都有机会在 sink 节点的附近区域发送转发数据,从而降低节点数据通信能耗。因此考虑锚点位置的分布,引入一种减聚类算法,寻找邻居节点密集的锚点^[13]。

在无线传感网中,如果节点 j 在节点 i 的通信半径内,

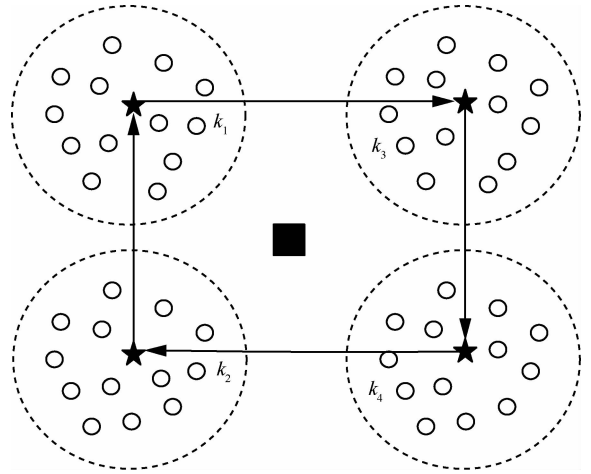


图 1 移动无线传感网的节点分布

则称节点 j 是节点 i 的邻居节点。令 $N(i)$ 表示节点 i 的所有邻居节点集,定义每一个节点的潜能值(potential value)为:

$$P(i) = \sum_{j \in N(i)} \exp(-\alpha d_{ij}) \quad (3)$$

其中, α 表示潜能因子,潜能值大,则说明该节点周围区域的邻居节点分布密度大、数量多。sink 节点移动到潜能值大的节点位置有利于减少该区域节点的数据传输能耗。

减聚类算法的基本思路是选择当前网络中潜能值最大的节点作为锚点,对网络中其他节点的潜能值进行减法计算,离当前锚点距离近的节点潜能值下降多,离当前锚点距离远的节点潜能值下降少,有些甚至几乎没有减少。最终可获得平衡锚点位置分布和网络能耗的若干个锚点。具体实现步骤如下。

步骤 1 初始化每一个节点的潜能值 $P(i)$ 和锚点数 $N=1$ 。

步骤 2 选择当前潜能值最大的节点 L 作为锚点,令 $P^*(N)$ 表示该节点的潜能值。

步骤 3 通过式(4)修改其他节点的潜能值:

$$P(i) = P(i) - P^*(N)(\exp(-\beta d_{iL})) \quad (4)$$

其中, β 表示修正参数。

步骤 4 如果不等式(5)成立,则停止算法,否则 $N=N+1$,跳到步骤 2。

$$\max_i P(i) \leq \varepsilon P^*(1) \quad (5)$$

其中, ε 表示判决因子。

循环执行上述步骤,可以获得 N 个锚点。

3.2 移动路径的确定

当确定锚点后, sink 节点移动到该锚点收集数据,停

留一段时间后再次选择下一个锚点移动。经过若干次的移动,最终 sink 节点返回到初始位置。sink 节点的移动策略是遍历所有锚点的同时,尽可能减少移动路程,即是一个典型的旅行商问题(TSP)^[14]。

在图论中,TSP 就是在一个赋权完全图中,寻找一个具有最小权值的 Hamilton 回路,即最优 Hamilton 回路问题。该问题属于 NPC 问题,目前还没有一个求解最优 Hamilton 回路的有效算法。考虑到如果锚点数量过多,则 sink 移动遍历所有锚点的时间过长,即数据传输时延过长,不利于存储资源有限传感节点的数据缓冲甚至会造成节点数据丢失。在移动无线传感网中锚点数量不宜过多,因此可以采用最近邻插入法寻找 sink 节点移动的最短路径近似解。最近邻插入法是在每次迭代过程中都构建一个闭的移动路径,它是根据多个阶段的移动路径逐步建立的,每一次移动路径比上一次多一个锚点,即下一次移动路径总比上一次移动路径多一个顶点。求解思路是在未建立路径的锚点集合中,寻找与移动路径中任一锚点距离最近的锚点,将其插入移动路径中,并要求增加的距离尽可能小。当全部锚点加入移动路径中,就找到所求最短移动路径的近似解。具体实现步骤如下。

步骤 1 初始化 sink 节点的位置和 $i=0$, 将该锚点 v_0 作为起点,组成初始闭路径 $v_0 v_0$ 。

步骤 2 在 $V-\{v_0, v_1, \dots, v_i\}$ 中寻找一条与 $\{v_0, v_1, \dots, v_i\}$ 集合中任一锚点距离最小的锚点 v_{i+1} 。

步骤 3 将锚点 v_{i+1} 插入到最短闭路径 $v_0 v_1 \dots v_i v_0$ 中, 分别得到路径 $v_0 v_{i+1} v_1 \dots v_i v_0, v_0 v_1 v_{i+1} \dots v_i v_0, \dots, v_0 v_1 \dots v_i v_{i+1} v_0$, 选择移动路程最短的路径作为新的最短闭路径。

步骤 4 如果 $i < (N+1)$, 则跳到步骤 2, 否则停止算法,获得近似解。

3.3 数据收集算法

如图 2 所示, sink 节点移动到某一个锚点, 并停留一段时间。在这段时间内, sink 节点代替该位置上节点的数据采集功能,同时采集 k 跳通信范围内的节点数据。在给定的网络中,随着锚点数量增加, sink 节点的采集范围(即 k 值)可变小,但是 sink 节点的移动路程变长,数据传输时延变高。

当 $k=1$ 时, 节点形成星型网络, 直接将数据发送给 sink 节点。当 $k>1$ 时, 节点通过单跳或多跳路由的方法将数据发送给 sink 节点, 可采用分布式非同步 Bellman-Ford 算法获得传输路径^[15]。具体实现步骤如下。

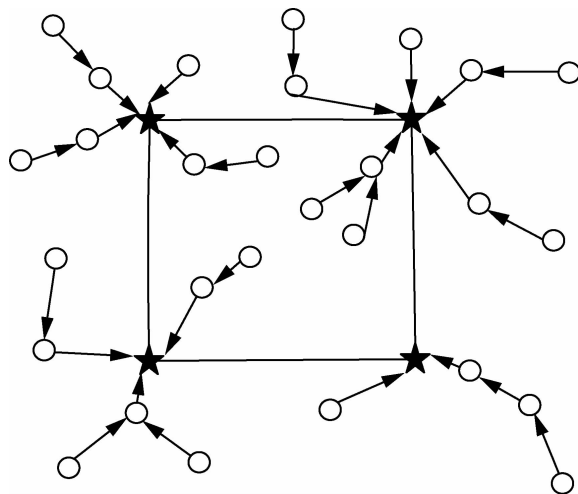


图 2 数据收集方法

步骤 1 sink 节点开始收集数据时, 不时发送数据请求分组。

步骤 2 如果节点 i 接收到 sink 节点的数据请求分组, 表示该节点处在 sink 节点的 1 跳通信范围内, 则计算该节点到 sink 节点的权值为:

$$w_{ij} = [C_{ij}(g, d_{ij})]^{y_1} \left[\frac{1}{\text{Re}(j)} \right]^{y_2} \quad (6)$$

$$C_{ij}(g, d_{ij}) = E_{Tx}(g, d_{ij}) + E_{Rx}(g) \quad (7)$$

其中, y_1 和 y_2 都是正常数, y_1 是能耗因子, y_2 是接收剩余能量因子。

步骤 3 此时该节点 i 不时向其所有邻居节点发送路由信息分组(包含最新预测值 $D_i(t)=w_{is}$ 和到 sink 节点的跳数等信息, 其中 s 表示 sink 节点)。邻居节点 j 接收到节点 i 的路由信息分组, 判断 sink 节点的跳数是否小于 k 值。如果不是, 丢弃该路由信息分组, 否则跳到步骤 4。

步骤 4 跳数加 1, 执行式(8), 更新邻居节点信息表, 将本节点的路由信息分组发送给其邻居节点。

$$D_i(t) = \min_{j \in N(i)} [w_{ij} + D_j(t)] \quad (8)$$

其中, $D_i(t)$ 表示当前邻居节点 j 最短路径权值的预测值。

步骤 5 根据邻居节点的信息, 节点选择最小权值路径上的邻居节点发送数据。跳到步骤 2。

在实现过程中, 节点不时地向其所有邻居节点发送最新路由信息分组。邻居节点获知路由信息分组中节点最短路径权值的最新预测值, 更新邻居节点信息表, 执行式(8), 选择最小权值路径上的邻居节点发送数据。在一段时间内, 如果节点 i 未收到 sink 节点的数据请求分组, 则表示



节点 i 不在 sink 节点的数据采集范围, 节点 i 将其到 sink 节点的权值定义为 ∞ , 缓冲传感器数据, 发送路由失效分组。如果节点没有接收到邻居节点的最新路由信息分组或发送数据后没有接收到反馈分组, 则认为该链路出现故障。节点接收到该路由失效分组或认为该链路出现故障, 在邻居节点信息表中删去该链路上的邻居节点信息。

4 算法实现

如图 3 所示, LOAMWSN 算法是一种集中式算法, 其具体的实现步骤如下。

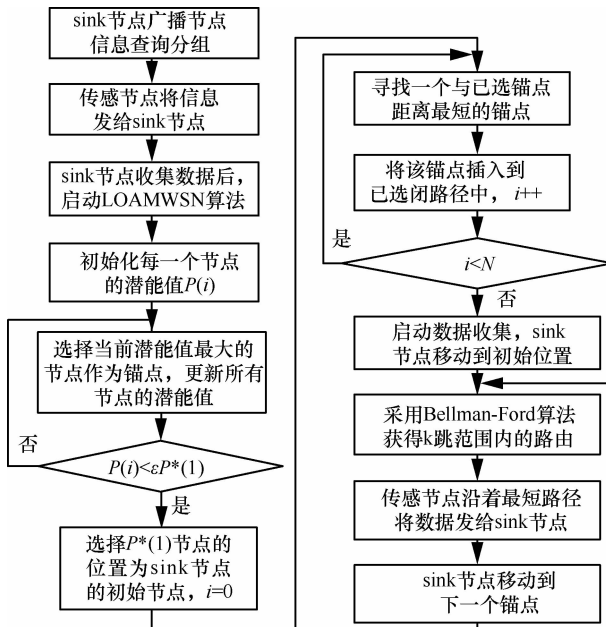


图 3 LOAMWSN 算法流程

步骤 1 sink 节点启动数据收集前, sink 节点采用洪泛(flooding)方式向所有节点发送信息查询分组。

步骤 2 如果节点第一次接收到 sink 节点的信息查询分组, 则将自身地址、位置坐标等信息沿原路发送给 sink 节点, 并向邻居节点转发该查询分组, 否则丢弃该信息分组。

步骤 3 sink 节点获得算法所需要的节点信息后, 启动 LOAMWSN 算法。

步骤 4 通过减聚类算法确定 N 个锚点。

步骤 5 通过最近邻插入法寻找最短移动路径的近似解。

步骤 6 sink 节点移动到初始锚点上, 并启动数据收集。

步骤 7 采用分布式非同步 Bellman-Ford 算法获得 k 跳通信范围内的最短路径树。该通信范围内的所有节点沿着最短路径树将数据发送给 sink 节点。

步骤 8 在该锚点停留一定时间后, sink 节点移动到

下一个锚点, 跳到步骤 7。

循环执行步骤 7 和步骤 8, 直到某个节点能量耗尽而失效。

下面分析 LOAMWSN 算法的时间复杂性。LOAMWSN 算法的时间复杂度主要由锚点确定的时间复杂度、移动路径确定的时间复杂度和数据收集算法的时间复杂度组成。每选择一个锚点都需要迭代计算所有节点的潜能值, 即锚点确定的时间复杂度是 $\Theta(|V| \cdot N)$ ($|V|$ 表示网络节点的数量)。采用最近邻插入法寻找 N 个锚点的最短路径, 每增加一个锚点, 需要计算所有可能情况, 即移动路径确定的时间复杂度是 $\Theta(N^2)$ 。数据收集算法的时间复杂度具有不确定性, 与邻居节点的数据和路径权值的变化率有关。假设邻居节点路径权值的变化率是 H_i , 则它的时间复杂度是 $\Theta(H_i |N(i)|)$ ($|N(i)|$ 表示节点 i 的邻居节点数量)。总之, LOAMWSN 算法在 sink 节点的时间复杂度是 $\Theta(|V| \cdot N + N^2 + N_i |N(i)|)$, LOAMWSN 算法在传感节点 i 的时间复杂度是 $\Theta(H_i |N(i)|)$ 。

5 仿真实现和分析

5.1 仿真参数设置

在仿真时, 只考虑数据无线通信能耗, 不考虑数据融合、信息查询分组收发、超时重发、除错(debug)等的能耗。如表 1 所示, 选择表 1 中参数实现 LOAMWSN 算法的仿真。为了比较 Ratio_w、TPGF 和 LOAMWSN 算法, 假设 sink 节点在每一个锚点上的停留时间相同, 则节点生存时间定义为网络开始运行到首个节点能量耗尽时该节点实际工作时间(不考虑节点的睡眠时间)。网络生存时间定义为所有节点生存时间的最小值。

表 1 仿真参数

参数	取值
单位比特数据的电路电子能耗 E_{elec}	50 nJ/bit
信号放大器的单位数据能耗参数 ϵ_{fs}	100 pJ/(bit·m ²)
节点最大通信半径 d_{max}	200 m
仿真区域边长	500 或 1 000 m
节点初始能量 E	1 000 J
数据损耗系数 γ	2
能耗因子 γ_1	0.7
接收剩余能量因子 γ_2	1
潜能因子 α	$4/d_{max}$
修正参数 β	$4/d_{max}$
判决因子 ϵ	0.4
sink 节点在锚点的停留时间	1 h
传感节点的感应速率	1 Mbit/h
sink 节点数据收集范围(通信跳数) k	3

网络平均能耗=当第一个节点能量耗尽时所有节点的总能耗/(节点数×网络生存时间)。

剩余能量方差=当第一个节点能量耗尽时所有节点的剩余能量方差。

5.2 算法仿真结果及分析

5.2.1 节点均匀分布的无线传感网

在算法仿真中选择 1 000 m×1 000 m 网络仿真区域、节点数量为 100、使用表 1 中相关参数,获得如图 4 所示的 100 个节点均匀分布的 sink 节点移动轨迹(其中五角星代表锚点、圆点代表传感节点)。LOAMWSN 算法寻找到 12 个锚点, sink 节点沿着最短移动路径(即图 4 中闭合线段)采集数据。这些锚点分布在监测区域的四周,避免由于锚点集中而产生的孤立节点,也避免一些枢纽节点的产生,有利于均衡网络节点能耗和提高网络生存时间。

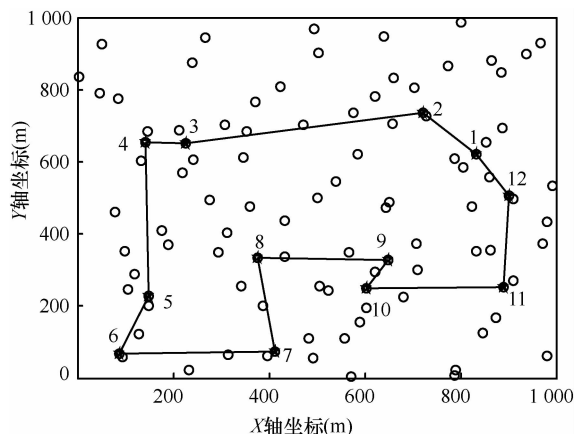


图 4 当节点均匀分布时, sink 节点的移动轨迹

为了验证算法的有效性,针对每个固定节点数量的无线传感网,在 1 000 m×1 000 m 仿真区域内随机均匀分布各个节点,产生 10 个不同的网络拓扑结构,根据表 1 的仿真参数,分别计算这 10 个不同网络拓扑结构的 Ratio_w、TPGF 和 LOAMWSN 算法的网络生存时间、平均节点能耗和剩余能量方差,最后取其平均值作为该节点数量的各算法仿真结果值。

图 5 比较了各算法的网络生存时间。如图 5 可知, LOAMWSN 算法的网络生存时间最长, Ratio_w 算法次之, TPGF 算法的网络生存时间最短。这是因为 LOAMWSN 算法综合考虑了节点的分布,让 sink 节点移动到密集区域收集 k 跳通信范围内的节点数据,降低了节点通信距离和能耗,从而提高了网络生存时间。其他两个算法都存在枢纽

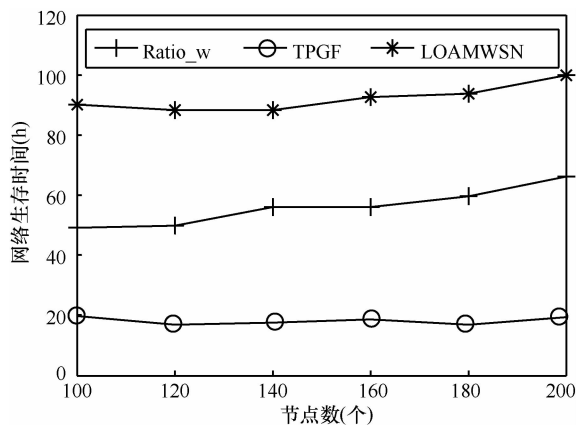


图 5 当节点均匀分布时,各算法的网络生存时间比较

节点的问题,网络生存时间比 LOAMWSN 算法低。因此 LOAMWSN 算法提高了均匀分布无线传感网的生存时间。

图 6 比较了各算法的平均节点能耗。如图 6 可知, LOAMWSN 和 Ratio_w 算法的平均节点能耗较低,这是因为 LOAMWSN 算法只收集 k 跳通信范围内的节点数据,避免距离较远节点的数据通信。Ratio_w 算法考虑节点的剩余能量,从而降低了节点能耗。TPGF 算法根据节点位置选择路由,没有考虑节点的能耗,其平均节点能耗最高。但是 Ratio_w 算法随着节点个数的增加,枢纽节点的问题越明显,网络部分节点过早死亡而其他节点剩余能量较多,因此当节点数大于 140 个时, Ratio_w 算法的平均节点能耗比 LOAMWSN 算法小。因此 LOAMWSN 算法将均匀分布无线传感网的平均节点能耗保持在较低水平。

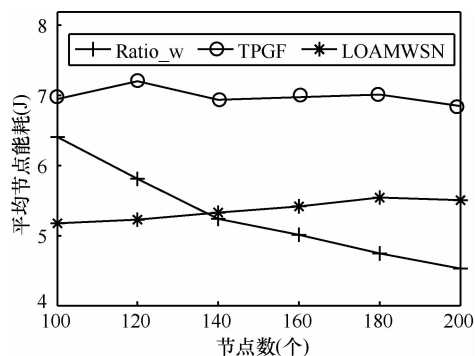


图 6 当节点均匀分布时,各算法的平均节点能耗比较

图 7 比较了网络某一个节点能量耗尽时各算法的节点剩余能量方差。如图 7 可知, LOAMWSN 算法的节点剩余能量方差最低(接近于 0), TPGF 算法次之, Ratio_w 算法的节点剩余能量方差大。这是因为 LOAMWSN 算法让 sink 节点移动到密集区域收集数据,充分利用节点能耗,避免枢纽节点的产生。因此 LOAMWSN 算法均衡了均匀分布无

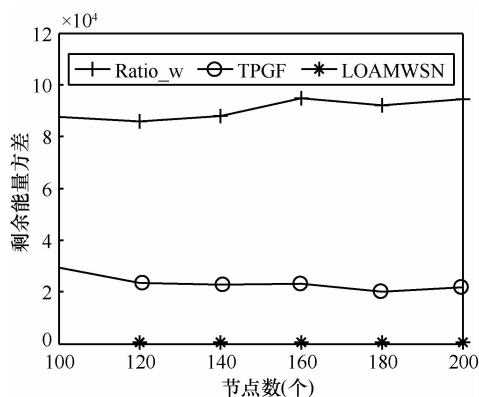


图7 当节点均匀分布时,各算法的剩余能量方差比较

线传感网的节点能耗。

5.2.2 节点非均匀分布的无线传感网

在算法仿真中选择 500 m×500 m 仿真区域、节点数量为 100、使用表 1 中相关参数,获得当 100 个节点非均匀分布时 sink 节点的移动轨迹,如图 8 所示。LOAMWSN 算法能找到 4 个密集区域,确定该密集区域中心(即锚点)。sink 节点在每一个密集区域中心收集数据可以提高网络生存时间。

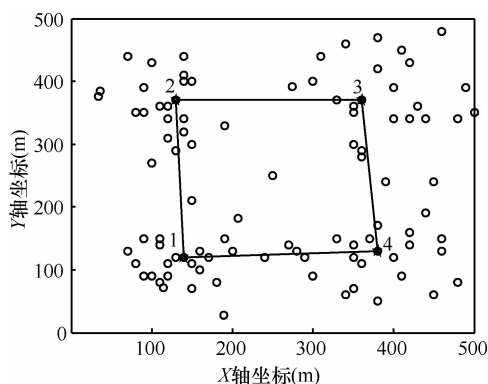


图8 当节点非均匀分布时,sink 节点的移动轨迹

在 500 m×500 m 仿真区域内随机泊松分布 100、120、140、160、180、200 个节点,根据表 1 的仿真参数,计算 10 个不同网络拓扑结构的仿真结果值,获得当节点非均匀分布时各个算法的网络生存时间比较,如图 9 所示。可知,LOAMWSN 算法的网络生存时间最长,明显高于 Ratio_w 和 TPGF 算法。这是因为在节点非均匀分布的仿真区域中,节点分布相对集中,即部分子区域节点分布密集,部分子区域节点分布稀疏甚至没有节点分布。LOAMWSN 算法能找到密集区域中心,sink 节点移动到该中心收集数据,从而明显提高了网络生存时间。因此 LOAMWSN 算法提高了非均匀分布的无线传感网生存时间。

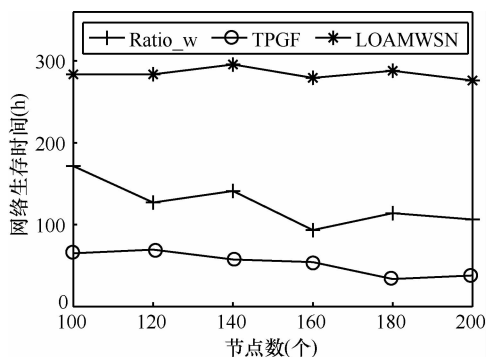


图9 当节点非均匀分布时,网络生存时间比较

当节点非均匀分布时各算法的平均节点能耗和剩余能量方差的仿真结果与节点均匀分布时类似,本文不做具体阐述。总之,LOAMWSN 算法适用于节点均匀分布和非均匀分布的无线传感网,延长了网络生存时间,平衡了节点能耗,将平均节点能耗保持在较低水平。在一定的条件下,比 Ratio_w、TPGF 算法更优。

6 结束语

本文研究移动无线传感网的生存时间优化算法。首先研究系统假设和能耗模型,其次从锚点的确定、移动路径的确定和数据收集算法 3 个方面研究 LOAMWSN 算法,采用减聚类算法确定 sink 节点移动的锚点,采用最近邻插入法解决 TSP,寻找最短移动路径,采用分布式非同步 Bellman-Ford 算法收集 sink 节点 k 跳通信范围内的数据。最后考虑均匀分布和非均匀分布的两种无线传感网,仿真比较 Ratio_w、TPGF 和 LOAMWSN 算法的网络生存时间、平均节点能耗和剩余能量方差。

LOAMWSN 算法是集中式算法,能被应用到传感节点静止的无线传感网中,但是不能很好适应传感节点运动的无线传感网。而且该算法不考虑 sink 节点移动过程中的数据收集和移动时间。因此,下一步的研究目标是 sink 节点的移动数据采集和静止数据采集两种收集方式,研究无线传感网的分布式生存时间优化算法。

参考文献

- Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 2008, 52(12):2292~2330
- Wu X Y, Cassandras C G. A maximum time optimal control approach to routing in sensor networks. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, Seville, Spain, 2005: 1137~1142

- 3 任条娟,杨海波,陈友荣. sink 节点移动的无线传感网生存时间优化算法. 传感技术学报, 2012, 25(5):683~690
- 4 Hu X M, Zhang J, Yu Y, *et al.* Hybrid genetic algorithm using a forward encoding scheme for lifetime maximization of wireless sensor networks. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2010, 14(5): 766~781
- 5 朱艺华,沈丹丹,吴万登等. 无线传感器网络优化生存时间的动态路由算法. 电子学报, 2009, 37(5):1041~1045
- 6 Shu L, Zhang Y, Zhou Z, *et al.* Transmitting and gathering streaming data in wireless multimedia sensor networks within expected network lifetime. Mobile Networks and Applications, 2008, 13(3):306~322
- 7 Rao J, Biswas S. Data harvesting in sensor networks using mobile sinks. IEEE Wireless Communications, 2008,15(6): 63~70
- 8 Liu W, Lu K, Wang J, *et al.* Performance analysis of wireless sensor networks with mobile sinks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(6):2777~2789
- 9 Zhao M, Yang Y. Optimization-based distributed algorithms for mobile data gathering in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(10):1464~1477
- 10 Gatzianas M, Georgiadis L. A distributed algorithm for maximum lifetime routing in sensor networks with mobile sink. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(3):984~994
- 11 Luo J, Hubaux J P. Joint sink mobility and routing to maximize the lifetime of wireless sensor networks: the case of constrained mobility. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(3):871~884
- 12 陈友荣,王章权,程菊花等. 基于最短路径树的优化生存时间路由算法. 传感技术学报, 2012, 25(3):406~412
- 13 Sarimveis H, Alexandridis A, Bafas G. A fast training algorithm for RBF networks based on subtractive clustering. Neurocomputing, 2003, 51(5): 501~505
- 14 李明哲,金俊,石端银. 图论及其算法. 北京:机械出版社,2010

- 15 Dimitri B, Robert G. 数据网络(第二版). 卢刚,王康译. 北京:人民邮电出版社,2004

[作者简介]



王章权,男,浙江树人大学信息科技学院副教授,主要研究方向为电力电子技术、控制技术、无线控制。



陈友荣,男,博士,浙江树人大学信息科技学院讲师,主要研究方向为无线传感网、物联网。

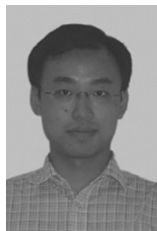


任条娟,女,浙江树人大学信息科技学院副教授,主要研究方向为无线传感网、车联网。

许森,男,浙江树人大学信息科技学院助教,主要研究方向为智能控制、车联网。

(收稿日期:2013-05-20)

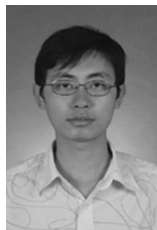
(上接第 64 页)



陈巍,男,清华大学电子工程系教授、博士生导师,主要研究方向为无线通信、信息论、应用优化等。



牛志升,男,清华大学电子工程系教授、博士生导师,主要研究方向为排队论、无线资源管理、绿色通信等。



白铂,男,清华大学电子工程系讲师、硕士生导师,主要研究方向为无线通信、信息论、随机图、组合设计等。



曹志刚,男,清华大学电子工程系教授、博士生导师,主要研究方向为移动通信、卫星通信、语音信号处理、认知无线电等。

(收稿日期:2013-09-19)