

# 基于区域划分的可移动中继节点数据收集策略

杜国杰 牛玉刚

(华东理工大学化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室 上海 200237)

**摘要** 针对 WSN 中利用可移动中继节点进行数据收集的问题,提出了一种基于区域划分的数据收集策略。该策略首先利用 CPSA 算法选择网络中的中心节点,以减少可移动中继节点经过的止点数。然后利用 CPPA 分区算法对监测区域进行分区,引入代价函数,通过迭代计算得到最优分区结果,使网络在满足时延要求的前提下,最小化可移动中继节点移动距离,并使各分区内可移动中继节点负载均衡。实验结果表明,该策略可最小化可移动中继节点移动距离,且可保证可移动中继节点负载均衡。

**关键词** 可移动中继,数据收集,区域划分,负载均衡

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.10.018

## Partition Based Data Collection Strategy via Mobile Relays

DU Guo-jie NIU Yu-gang

(Key Laboratory of Advanced Control and Optimization for Chemical Process of Ministry of Education,  
East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract** This paper proposed a partition based data collection strategy to deal with the problem of data collection via mobile relays. Firstly, CPSA algorithm was used to select center points such that the number of stop points may be reduced. Then, CPPA algorithm is applied to partition the monitoring area. By introducing the cost function, the CPPA will iteratively calculate and obtain the optimal result, which can minimize the mobile distance and balance the load of mobile relays. Experimental results show that the proposed strategy can minimize the mobile distance and balance the load of mobile relays.

**Keywords** Mobile relays, Data collection, Partition, Load balancing

## 1 引言

近年来,无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)由于部署方便、可监测地域广阔以及可在恶劣环境中工作等众多优点,越来越受到环境监测、工业自动化、军事监控等应用领域的重视<sup>[1]</sup>。无线传感器网络是一种特殊的 Ad-hoc 网络,一般是由部署在监测区域内的大量传感器节点组成的网络,通过自组织多跳的方式将各源节点采集到的数据传送给 Sink 节点<sup>[2]</sup>。除此以外无线传感器网络中还可能存在中继节点,仅负责数据转发,并不进行数据采集。

由于 WSN 传感器节点的很大一部分能量需要用来转发数据,而传感器节点本身具有能量受限特性,因此容易导致靠近 Sink 的内层传感器节点能量消耗完时,网络中大部分节点仍有能量剩余的现象,造成能量浪费,缩短网络生命周期。解决这一问题的方法之一是通过在网络中加入可移动的中继节点来进行数据收集,这种方式使得各个传感器节点的能耗均衡,从而延长网络生命周期。

## 2 具有移动中继节点的 WSN 中的数据收集问题

### 2.1 可移动中继节点数据收集问题

具有移动元素(Mobile Elements, MEs)的无线传感器网

络主要由普通传感器节点、Sink 节点以及特殊支持节点构成,其中特殊支持节点是具有特殊功能的节点,既不是数据源节点也不是数据终点,而只是利用移动性支持网络操作或者数据收集<sup>[3-7]</sup>。

可移动中继节点是支持节点的一种,具有数据收集、存储以及转发功能,但不具备数据感知和处理功能。传统的无线传感器网络中,任意两个传感器节点都可以通过多跳路径进行通信,因此要求传感器节点既负责数据感知,又负责数据传输,导致越靠近 Sink 的节点转发数据所需的能量越多。将可移动中继节点添加到无线传感器网络中,负责从传感器节点收集数据,则普通传感器节点只需负责数据的感知处理,可以显著地减少传感器节点的通信能耗,将更多的能量用于数据感知,极大地延长网络的生命周期<sup>[8]</sup>。

可移动中继节点在监测区域内移动,在移动路径所经过的节点处进行数据收集,如图 1 所示,可移动中继节点的路径可以是随机的或者预先规划的<sup>[9]</sup>。当可移动中继节点移动到某一传感器节点通信范围内时,可移动中继节点与该传感器节点处于联系状态,可以实现相互通信。两个节点之间处于联系状态的时间定义为联系时间,两个节点可以处于联系状态的范围定义为联系区域。

到稿日期:2015-09-15 返修日期:2016-01-22 本文受国家自然科学基金项目(61273073,61304044)资助。

杜国杰 硕士生,主要研究方向为无线传感器网络拥塞控制;牛玉刚 博士,教授,博士生导师,主要研究方向为随机系统、网络拥塞控制。

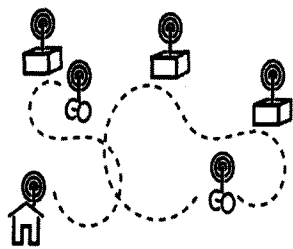


图1 移动中继节点数据收集示意图

可移动中继节点的数据收集过程可分为3个阶段:发现阶段、数据传送阶段和路由阶段。发现阶段是可移动中继节点收集数据的第一步,这是由于当可移动中继节点出现在联系区域内时,传感器节点通常情况下是未知的。发现阶段的目的是当移动中继节点出现在节点联系区域内时能尽快被传感器节点检测到,最大化检测到的可联系移动中继;同时检测剩余联系时间。数据传送阶段紧随发现阶段之后,是传感器节点向可移动中继节点发送数据的阶段,目标是在最小化能耗的基础上,尽可能利用剩余联系时间,最大化吞吐量,即最大化成功发送的数据量。路由阶段是数据在传感器节点之间传输的阶段,仅当网络中节点密集且允许传感器节点通过多跳的方式向可移动中继节点发送数据时<sup>[3]</sup>,路由阶段才是存在的。

另外,可移动中继节点移动过程的不同特点对数据收集过程有着显著的影响,其中最主要的就是可控性,这取决于移动中继节点的运动过程是否是自治的。非受控的移动过程有两种主要模型:确定性移动和随机移动。确定性移动的特点是周期性地进入传感器节点的通信半径进行数据收集,例如部署在公共交通工具上的可移动传感器节点<sup>[10]</sup>。随机移动的特点是可移动中继节点运动并不唯一,但是满足特定的概率分布。例如,文献<sup>[11]</sup>中研究的就是考虑可移动中继节点的移动时随机方向情况下的泊松到达率。而可控的移动过程利用的是可移动中继节点能够控制自身轨迹、速度的特点。在这种情况下,可移动中继节点可以通过控制运动速度来控制与传感器节点的通信时间,保证数据可以完全收集。本文主要研究可移动中继节点可控移动的情况。

## 2.2 研究现状与分析

针对在网络中加入可移动中继节点的数据收集问题,近年来国内外学者进行了深入研究。唐帆等<sup>[12]</sup>提出了一种利用可移动的中继节点来收集静态传感器网络的数据的方法,该方法通过限定移动中继节点的运动时间,来保证传感器节点的数据可以成功发送,进而计算出移动中继节点的运动轨迹。曹海等<sup>[13]</sup>给出了基于可移动中继的拓扑控制策略,通过构造拓扑模型,将可移动中继的最优轨迹规划为一个NP-hard问题进行建模,但文中并没有给出该问题模型的最优解。El-Moukaddem<sup>[14]</sup>针对数据密集型无线传感器网络提出了移动中继配置方法,该方法将无线数据传输的能耗与中继节点移动能耗整体考虑,通过计算移动中继节点的位置,使得总能量最小化,其优点是不需要进行复杂的移动中继节点路径规划。需要指出的是,上述的工作只针对减少能耗的方面进行研究,并没有考虑数据传输的时效性问题。

利用可移动中继节点进行数据收集和转发时,可能发生数据到达Sink节点延迟的问题。针对这一问题,Sugihara等人<sup>[15]</sup>提出了数据骡子调度(Data Mule Scheduling, DMS)策

略,该策略包括路径选择、速度控制以及任务调度3部分,通过设定成本指标约束条件求解最优路径,降低网络中的数据传输时延。进一步地,Sugihara等人<sup>[16]</sup>结合路径规划和移动中继的速度,在DMS策略中加入了转发机制的算法,使得网络中的传感器节点能量消耗与数据传输时延达到最优平衡点。He<sup>[17]</sup>针对多个可移动中继的路径进行了优化,定义了止点选择问题,保证每个止点有且仅有一个可移动中继经过,通过给每个可移动中继分配子集并且规划每个子集中的可移动中继节点路径,来达到优化的目的。上述研究都只在整体的监测区域进行中继节点的路径规划。Alhasanat<sup>[18]</sup>研究了分区的可移动中继节点数据收集问题,通过限定移动中继节点的总路径长度来满足时延要求,当移动中继的路径长度超过限定值时,则通过中心点分区,加入新的移动中继来满足要求。但是,文献<sup>[17]</sup>与文献<sup>[18]</sup>都假设Sink节点处于区域边缘,而且分区方法并没有考虑能耗成本等问题,此外,移动中继节点需遍历所有传感器节点,造成较大时延以及能量消耗,不利于提升网络的性能。

基于上述分析,本文从减少数据传输时延和能耗成本两方面出发,提出了一种新的基于区域划分的可移动中继节点数据收集策略(Partition based Data Collection Strategy using Mobile Relays, P-MR)。该策略首先利用CPSA(Center Point Select Algorithm)算法确定监测区域中的各个虚拟中心点,使得移动中继节点不需遍历监测区域中每个传感器节点进行数据收集,而只需经过各个中心点,减少停留时间从而降低时延;然后建立代价指标函数,通过迭代算法进行区域划分,规划分区后各个分区内移动中继节点的最优路径。通过反复的迭代,可以得到最优的区域划分情况以及各个移动中继节点的最优路径,使各条路径同时满足能耗和时延最小化的要求。

## 3 基于区域划分的移动中继节点数据收集策略

本文提出的基于区域划分的可移动中继节点数据收集策略P-MR主要分为两部分,按工作的先后次序,第一部分为中心点选择,第二部分为区域划分。通过该策略可使移动中继节点数据收集过程经过的止点数量减少,从而最小化移动距离,降低移动能耗;同时还可在满足时延要求的前提下,使网络中的多个可移动中继节点负载均衡,提升网络性能。

### 3.1 网络模型与假设

本文考虑了圆形监测区域,并且Sink节点处于监测区域中心,而研究结论可以推广到监测区域边缘不规则的情况。本文采用文献<sup>[17]</sup>中的止点定义,即止点为可移动中继节点停止移动进行数据收集的点。

假设 $N$ 个传感器节点随机分布在半径为 $R$ 的监测区域内,每个节点具有固定ID、通信半径 $r$ 和相同的初始能量。每个节点感知的数据存储在缓存中,等待移动中继节点收集。为了研究方便,假设移动中继节点沿直线移动,且速度是可控的,最大速度为 $v$ ,在到达止点时,速度为零(这是由于在止点移动方向发生变化时,若速度不为零,则理论上移动中继节点需要一个无穷大的加速度),即可移动中继节点的移动过程在止点附近是一个匀变速直线运动,其余为速度为 $v$ 的匀速直线运动。为了保证可移动传感器节点的可控性,本文假设所有节点包括可移动传感器节点的位置信息都可由Sink节点统计并计算。另外本文假设,WSN在工作过程中保证节点缓

存无溢出,且在不影响性能的前提下,数据时延时间上限为  $T_{max}$ 。

### 3.2 中心点选择算法

可移动中继节点若遍历监测区域中的每一个传感器节点进行数据收集,则路径规划会变得非常复杂,且可移动中继节点用于移动的能耗会大大增加,不利于降低成本。因此,本文提出了一种基于节点度的 CPSA (Center Point Select Algorithm) 中心点选择算法。其中,节点度定义为网络中该节点通信半径范围内的传感器节点数量,通过比较各节点的节点度,选出节点度高的节点成为中心点,即止点,算法流程如图 2 所示。当移动中继节点通过某中心点时,该中心点半径  $r$  范围内的传感器节点都可将自身存储的数据发送给移动中继节点。

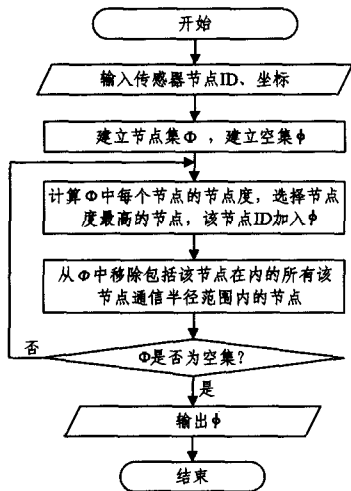


图 2 CPSA 算法流程图

CPSA 算法的详细步骤如下。

Step 1 统计所有传感器节点 ID, 建立包含所有节点的节点集  $\Phi$ ; 同时建立空集  $\phi_c$ , 用于存放中心点 ID。

Step 2 计算  $\Phi$  中每个节点的节点度, 并按从大到小顺序排列。

Step 3 选择节点度最高的节点, 将该节点 ID 加入  $\phi_c$ ; 同时, 从  $\Phi$  中移除包括该节点在内的所有该节点通信半径范围内的节点 ID。

Step 4 判断  $\Phi$  是否为空集。若是, 则向下执行; 否则, 跳转到 Step 2。

Step 5 输出  $\phi_c$ , 结束。

利用该算法, 监测区域中节点集中的范围内都会有中心点被选择出来, 可移动中继节点将通过这些中心点来收集数据, 使得可移动中继节点经过的止点数量大大减少, 因而可以减少可移动中继节点的移动路程, 降低能耗, 同时可以加快数据收集周期, 降低时延, 提高数据收集的效率。另外, 若监测区域内有不与其他节点连通的孤立节点, CPSA 算法可以保证该节点也成为中心点, 从而保证可移动中继节点将会经过该节点收集数据。

由于根据 CPSA 算法得到的中心点的位置都是已知的, 因此可移动中继节点经过这些中心点的移动路径规划问题可归结为 TSP (Traveling Salesman Problem) 问题, 本文在仿真中采用蚁群算法来求解可移动中继节点的最优路径问题。

### 3.3 区域划分算法

无线传感器网络通常来说都有着实时性的要求, 即数据

传输不能超过一定的时延。若可移动中继节点在进行数据收集时, 周期超过了网络时延的上限值, 则不仅不能满足网络中信息的时效性, 还会影响信息的完整性。这是由于无线传感器网络工作在这种机制下时, 传感器节点采集到的数据都暂时存储在缓存中, 等待可移动中继节点进行数据收集。超过一定时间之后, 若这些数据没有向可移动中继节点进行发送, 则传感器节点会出现缓存溢出的现象, 从而造成数据丢失, 影响网络中的信息完整性, 甚至影响整个网络的性能。因此, 我们通过在网络中加入多个可移动中继节点来解决这一问题。

当网络中存在多个可移动中继节点时, 需要对监测区域进行划分。本文同时考虑了移动能耗成本和网络时延, 提出了基于中心点的分区算法 (Center Point based Partitioning Algorithm, CPPA), 通过迭代计算得到区域分界线, 使每一个可移动中继节点在对应区域内进行数据收集时满足移动能耗和网络时延最小化的要求, 算法流程如图 3 所示。

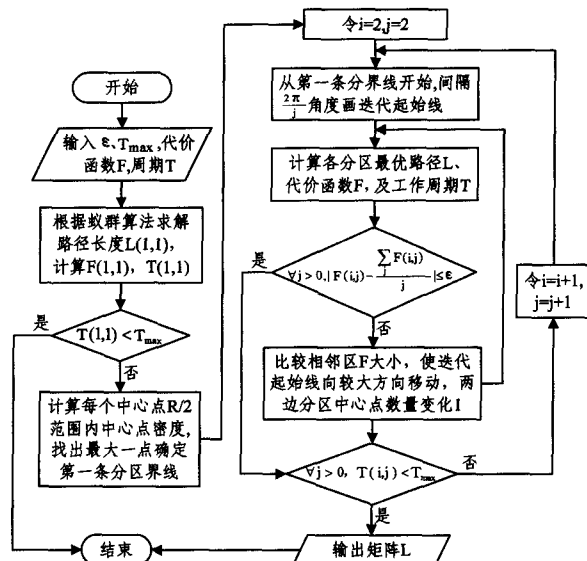


图 3 CPPA 算法流程图

CPPA 算法首先计算每个中心点周围半径  $R/2$  范围内的中心点密度, 然后找出中心点密度最大的中心点, 从 Sink 节点出发经过该中心点画射线作为第一条分区界线。然后反向延长, 以反向延长线作为迭代计算的起始线, 最终得到另一半未确定分区界线; 若分为 3 个区域, 则从第一条边界线左右各  $120^\circ$  画两条射线作为迭代的起点, 以此类推。

假设可移动中继节点移动单位距离消耗的能量为  $e_0$ , 不计可移动中继节点在止点附近的变速运动对能量消耗的影响。利用蚁群算法可以得到每个可移动中继节点的最优移动路径, 则可移动中继节点在数据收集过程中的移动能耗可表示为:

$$e(i) = e_0 \cdot L(i), i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中,  $N$  为分区个数,  $L(i)$  为第  $i$  个分区内可移动中继节点的路径总长。

另外, 可移动中继节点在每个止点需要停止一定的时间来完成数据传输, 设为  $\tau$ , 则每个分区内可移动中继节点在止点停留的总时间为:

$$t(i) = \tau \cdot C(i), i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中,  $N$  为分区个数,  $C(i)$  为第  $i$  个分区内中心点的数量。

由于可移动中继节点周期性地收集每个传感器节点产生

的数据,而每个传感器节点单位时间内产生的数据量相同,因此本文在研究中不考虑数据传输的能耗,只考虑可移动中继节点的移动能耗。另外,网络中的时延与可移动中继节点移动路径长度、经过的中心点个数有关,因此,为了使每个分区内的可移动中继节点负载、工作周期均衡,给出如下代价函数:

$$F(i) = \omega_1 * e(i) + \omega_2 * t(i) \quad (3)$$

其中,  $\omega_1, \omega_2$  代表权重,为设定值。通过式(3)可以看出,每个分区内可移动中继节点的能耗  $E(i)$  以及工作周期  $T(i)$  均与代价函数成正比,分别为:

$$E(i) = k_1 * F(i), T(i) = k_2 * F(i), i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中,  $N$  代表分区个数,  $k_1, k_2$  为比例系数。因此,负载与工作周期均衡可转化为每个分区的代价函数相等。CPPA 算法的目标是,在工作周期满足网络时延约束的基础上,使用最少的可移动中继节点完成数据收集工作,同时使能耗最小,降低成本。

CPPA 分区算法的详细步骤如下。

首先设置代价函数精度  $\epsilon$ 。

Step 1 对整个监测区域内所有中心点,根据蚁群算法求解 TSP 问题,计算只有一个可移动中继节点时,最优路径总长  $L(1,1)$ ,并计算代价函数  $F(1,1)$  以及工作周期  $T(1,1)$ 。

Step 2 若  $T(1,1) < T_{max}$ ,则算法结束,此时整个监测区域不分区且只有一个可移动中继节点,输出  $L(1,1), T(1,1)$ ; 否则向下执行。

Step 3 计算每个中心点周围半径  $R/2$  范围内的中心点密度,然后找出中心点密度最大的一个中心点,从 Sink 节点出发经过该中心点画一条射线作为第一条分区界线。

Step 4 令  $i=2, j=2$ , 则

Step 4.1 从第一条分区界线开始,每间隔  $2\pi/j$  角度画一条分区界线迭代的起始线,将监测区域划分为  $j$  个分区。

Step 4.2 统计每个分区内的中心点数量以及节点 ID,计算每个分区内的可移动中继节点最优路径  $L(i,:)$ 、代价函数  $F(i,:)$  以及工作周期  $T(i,:)$ 。其中,  $L(i,:), F(i,:), T(i,:)$  分别表示各个分区的最优路径、代价函数以及工作周期存储于矩阵  $L, F, T$  的第  $i$  行,下同。

Step 4.3  $\forall j > 0$ , 若  $|F(i,j) - \frac{\sum F(i,j)}{j}| \leq \epsilon$ , 则跳到

Step 4.5; 否则,向下执行。

Step 4.4 分别比较各个相邻分区的代价函数大小,使每一条分区界线迭代起始线向代价函数较大的分区方向移动,使两边区域中心点的数量各变化 1,跳到 Step 4.2。

Step 4.5  $\forall j > 0$ , 若  $T(i,j) < T_{max}$ , 则向下执行; 否则,令  $i=i+1, j=j+1$ , 跳到 Step 4.1。

Step 5 输出矩阵  $L$ 。  $L$  的最后一行长度即代表可移动中继节点数量,最后一行每个元素则对应可移动中继节点的最优路径长度。

CPPA 算法根据式(3)得到每个区域的代价函数后,通过迭代搜索得到最优的分区结果,使用最少的可移动中继节点满足时延要求,同时得到各个中继节点的最优路径使能耗最小化。

### 3.4 算法性能分析

按照本文设计的分区算法,各分区内的  $L(i)$  与最大延时  $T_{max}$  的关系满足:

$$L(i) \leq v * T_{max} \quad (5)$$

其中,  $v$  为 3.1 节中所假设的可移动中继节点移动速度。由式(5)可以看出,经本算法优化后,每个周期内,每一个可移动中继节点的总移动距离都具有相同的上限,减少了移动能耗。

由式(3)及式(4)可得,按照本文设计的算法进行分区后,每个分区内可移动中继节点负载  $Load(i)$  可表示为:

$$Load(i) = k * F(i) = k * [\omega_1 * e(i) + \omega_2 * t(i)] \quad (6)$$

根据代价函数的迭代精度  $\epsilon$  可知,任意  $Load(i)$  满足:

$$|Load(i) - Load(i+1)| \leq \epsilon \quad (7)$$

由式(7)可以看出,本文算法可实现各分区内移动中继节点负载均衡。

## 4 实验仿真与分析

本节对所提出的可移动中继节点分区数据收集策略进行仿真实验,验证该策略的性能,并分别从可移动中继节点移动距离以及负载之比方面与文献[18]的算法效果进行了对比分析。仿真实验所用工具为 MATLAB, 运行环境为 Windows7, 实验参数配置如表 1 所列。

表 1 仿真参数设置

环境参数	设置值	环境参数	设置值
区域半径	50m	$\tau$	0.5s
传感器节点数目	100	$w_1$	0.8
通信半径 $r$	10m	$w_2$	0.2
移动中继节点初始能量	1000J	$k_1$	1.1
移动单位距离能耗	0.05J	$k_2$	0.7
$v$	0.5m/s	$\epsilon$	0.8

初始时,在半径为 50m 的监测区域内随机部署 100 个传感器节点, Sink 节点位于区域中心位置。首先应用 CPSA 算法选择中心点,如图 4 所示。图中虚线代表监测区域边界,正方形代表 Sink 节点,点为传感器节点,而三角形则代表选出的中心点。从图中可以看出, CPSA 算法选出的中心点数量大大少于传感器节点数量,因而可移动中继节点进行数据收集时所需经过的点就大大减少。

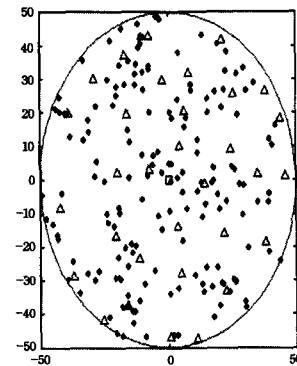


图 4 利用 CPSA 算法选择中心点

图 5 展示了迭代之后得到的分区结果以及可移动中继节点的移动路径。本次实验采用蚁群算法计算可移动中继节点最优路径,蚁群算法各参数分别为:  $m=50, Q=100, \rho=0.1, \alpha=1.5, \beta=2$ 。同时,为避免蚁群算法的优化出现局部最优而非全局最优的情况,本实验采取了扩大初始路径选择范围以及多次实验取最优解的方法。图中实线半径表示 CPPA 算法确定的第一条分区界线,而虚线半径表示 CPPA 算法迭代搜索之后得到的最优分区界线。图中将整个监测区域分成了

两个分区,每个分区内的实线代表可移动中继节点在各自分区内的最优路径。

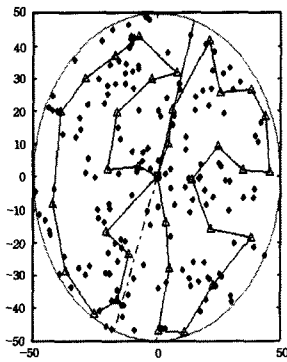


图5 可移动中继节点分区数据收集

从图5可以看出,两个可移动中继节点从 Sink 节点出发,经过各自分区内的中心点进行数据收集后再次返回 Sink 节点,不必遍历所有传感器节点,大大提高了工作效率。

将本文提出的基于区域划分的可移动中继节点数据收集策略 P-MR 与文献[15]中的 NPA 算法进行比较,同时将监测区域中只有一个可移动中继节点工作的情况作为参照,可移动中继节点移动距离随 WSN 规模的变化如图6所示。图中  $x$  轴表示监测区域中传感器节点的数目,  $y$  轴表示可移动中继节点的移动路径长度。从图6可以看出,基于 P-MR 策略的可移动中继节点移动路径长度小于 NPA 算法的路径长度,并且远远小于监测区域中只有一个传感器节点的情况,因而可以降低可移动中继节点的能耗,充分说明了该策略的有效性。

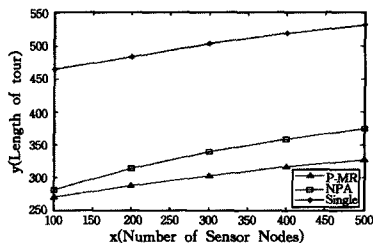


图6 可移动中继节点平均路径长度随网络规模增大的变化

图7对比展示了 P-MR 策略与 NPA 算法中,各个分区内的可移动中继节点的负载差值,图中  $x$  轴表示监测区域中传感器节点的数目,  $y$  轴表示各个分区的负载之比。根据本文引入的代价函数(式(3)),可以得到不同分区的负载比。

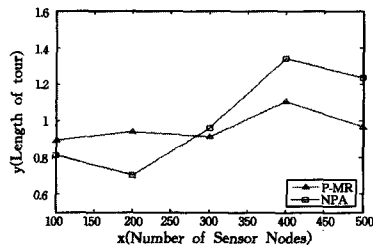


图7 不同分区可移动中继节点的负载之比

从图7可以看出,使用 NPA 算法时,各个分区的可移动中继节点的负载是不同的,这也意味着各个分区内可移动节点的工作周期会有不同,将造成不同分区的数据收集效率不同,而且各个分区内可移动中继节点能耗不同,不利于延长整个网络生存周期。而本文提出的 P-MR 策略,随着网络规模

的增大,虽然各个分区的可移动中继节点负载比有所波动,但由于有迭代精度约束,各个分区内的可移动中继节点基本处于负载均衡状态,从而有助于提高网络性能。

**结束语** 本文针对具有可移动中继节点的无线传感器网络数据手机问题进行了研究,提出了一种基于区域划分的可移动中继节点数据收集策略,选出网络中的中心点作为可移动中继节点的止点,减少可移动中继节点经过的节点数量,然后通过迭代计算进行分区。引入代价函数,均衡各分区可移动节点的负载,使网络时延满足要求的同时,最小化移动路径长度,降低移动能耗。

## 参考文献

- [1] Li J Z, Gao H. Survey on Sensor Network Research[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 45(1): 1-15 (in Chinese)  
李建中,高宏.无线传感器网络的研究进展[J].计算机研究与发展,2015,45(1):1-15
- [2] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292-2330
- [3] Mukherjee B, Roy S, Das A. Survey on Data Collection protocols in Wireless Sensor Networks using mobile data collectors[C]// 2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom). IEEE, 2015: 632-636
- [4] Kim D, Uma R N, Abay B H, et al. Minimum latency multiple data mule trajectory planning in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(4): 838-851
- [5] Guo J, Sun L J, Xu W J, et al. Mobile sink-based data collection scheme for wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2012, 33(9): 176-184 (in Chinese)  
郭剑,孙力娟,许文君,等.基于移动 sink 的无线传感器网络数据采集方案[J].通信学报,2012,33(9):176-184
- [6] Zhang X B, Liu Z H. Security in Wireless Sensor Networks with Mobile sink[J]. Computer Science, 2013, 40(11A): 4-7 (in Chinese)  
张旭彬,刘志宏.无线传感器网络及移动 sink 安全[J].计算机科学,2013,40(11A):4-7
- [7] Cheng L, Cheng C F, Ma J. Selection scheme of mobile sinks in wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2008, 29(11): 12-18 (in Chinese)  
程龙,陈灿峰,马建.无线传感器网络中多移动 sink 的选择策略[J].通信学报,2008,29(11):12-18
- [8] Di Francesco M, Das S K, Anastasi G. Data collection in wireless sensor networks with mobile elements: A survey [J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2011, 8(1): 7
- [9] Liang T, Chen X, Kong Q S. Localization Algorithm Based on Mobile Node Path Planning and Geometric Constraint for Wireless Sensor Network[J]. Information and Control, 2011, 40(5): 577-582 (in Chinese)  
梁涛,陈雄,孔庆生.移动节点路径规划和几何限制的无线传感器网络定位算法[J].信息与控制,2011,40(5):577-582
- [10] Chakrabarti A, Sabharwal A, Aazhang B. Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks[C]// Information Processing in Sensor Networks. Springer Berlin Heidelberg, 2003: 129-145

(下转第 140 页)

表2 Top k%用户紧密中心度占比

紧密中心度占比	Top1%			Top5%			Top10%		
	网络1	网络2	网络3	网络1	网络2	网络3	网络1	网络2	网络3
入度法	0.014	0.018	0.015	0.057	0.087	0.061	0.125	0.159	0.135
PageRank 算法	0.014	0.010	0.015	0.064	0.082	0.072	0.133	0.146	0.137
MLPIA 算法	0.014	0.020	0.022	0.070	0.097	0.093	0.144	0.185	0.169

**结束语** 本文应用多标签传播算法来解决社交网络中的用户影响力评估问题,该方法更多地还原信息在网络中传递的过程,产生的高影响力用户具有较大的影响力覆盖范围,更能代表信息传播中的关键节点。在网络舆情监控中可以应用该方法来识别高影响力用户,通过控制他们的言论,引导舆情向有利的方向发展。

由于在 MLPIA 算法中未对节点所能携带的标签数量设限,在迭代过程中节点将会携带越来越多的标签,需要较高的迭代次数才能收敛。在今后的工作中,将进一步研究如何在保证影响力评估质量的前提下提高算法的效率。

### 参考文献

- [1] Porzycki J, Was J. Novel algorithms of sensors detection in social network[OL]. 2015-10-23. <http://www.researchgate.net/publication/262560387>
- [2] Yang Kai, Zhang Ning, Su Shu-qing. Node Centrality on Individual Microblog User Network[J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2015, 37(1): 43-48(in Chinese)  
杨凯,张宁,苏树清. 个人微博用户网络的节点中心性研究[J]. 上海理工大学学报, 2015, 37(1): 43-48
- [3] Wang Xiao-fang, Li Xiang, Chen Guang-rong. Network Science: An Introduction[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 158-159(in Chinese)  
汪小帆,李翔,陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京:高等教育出版社, 2012: 158-159
- [4] Kitsak M, Gallos L K, Havlin S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. Nature Physics, 2010, 6: 888-893
- [5] Brin S, Page L. The anatomy of a large-scale hypertextual web search engine[J]. Computer Networks, 1998, 30: 107-117
- [6] Weng J, Lim E P, Jiang J, et al. TwitterRank: finding topic-sensitive influential twitterers[C]// International Conference on Web Search and Data Mining. 2010: 261-270
- [7] Xu Yang. Researches on the center nodes estimate and community discovery on microblog network[D]. Nanning: Guangxi University, 2013(in Chinese)  
徐杨. 微博网络的中心节点评估与社区发现方法研究[D]. 南宁:广西大学, 2013
- [8] Wu Xian-hui, Zhang Hui, Yang Chun-ming, et al. An Algorithm of Topic-related Microblogging Opinion Leaders Mining[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(10): 2296-2301(in Chinese)  
吴峴辉,张晖,杨春明,等. 一种话题相关的微博意见领袖挖掘算法[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(10): 2296-2301
- [9] Xiao Yin-tao. Research on Rumor Propagation and Public Opinion Mining in Microblogging Community[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011(in Chinese)  
萧银涛. 微博社区谣言传播和舆情挖掘研究[D]. 镇江:江苏大学, 2011
- [10] Gregory S. Finding Overlapping Communities in Networks By Label Propagation[J]. New Journal of Physics, 2010, 12(10): 2011-2024
- [11] Kempe D, Kleinberg J, Tardos é. Influential nodes in a diffusion model for social networks[M]// Automata, Languages and Programming. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 1127-1138
- [12] Chen Hao, Wang Yi-tong. Threshold-Based Heuristic Algorithm for Influence Maximization[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 49(10): 2181-2188(in Chinese)  
陈浩,王轶彤. 基于阈值的社交网络影响力最大化算法[J]. 计算机研究与发展, 2015, 49(10): 2181-2188
- [13] Newman M E J. Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality[J]. Physical Review E, 2001, 64(1): 132-158
- [14] Ma Jun, Zhou Gang, Xu Bin, et al. User Influence Analysis in Microblog Based on Topic Diffusion[J]. Journal of Information Engineering University, 2013, 14(6): 735-742(in Chinese)  
马俊,周刚,许斌,等. 一种基于话题传播的微博用户影响力分析方法[J]. 信息工程大学学报, 2013, 14(6): 735-742

(上接第 102 页)

- [11] Somasundara A, Kasal A, Jead, et al. Controllably mobile infrastructure for low energy embedded networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(8): 958-973
- [12] Tang Z, Luo H Q. Application of mobile sink to power saving in sensor network[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2005, 20(2): 147-150(in Chinese)  
唐軼,罗惠琼. 可移动中继节点在传感器网络中的节能应用[J]. 成都信息工程学院学报, 2005, 20(2): 147-150
- [13] Cao H, Zhu X P, Wen H. A survey on the topology of wireless sensor networks based on data MULEs[J]. Information Technology, 2014, 38(3): 13-16(in Chinese)  
曹海,朱西平,文红. 基于数据骡子的无线传感器网络拓扑控制综述[J]. 信息技术, 2014, 38(3): 13-16
- [14] El-Moukaddem F, Torng E, Xing G, et al. Mobile relay configuration in data-intensive wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(2): 261-273
- [15] Sugihara R, Gupta R K. Improving the data delivery latency in sensor networks with controlled mobility[M]// Distributed Computing in Sensor Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 386-399
- [16] Sugihara R, Gupta R K. Optimizing energy-latency trade-off in sensor networks with controlled mobility[M]. IEEE, 2009: 125-130
- [17] He L, Xu J, Yu Y. Optimize Multiple Mobile Elements Touring in Wireless Sensor Networks[C]// 2009 IEEE International Symposium Parallel and Distributed Processing with Applications. IEEE, 2009: 317-323
- [18] Alhasanat A, Al-Khassawneh M, Twaisi A. A new partitioning-based data gathering algorithm for path-constrained mobile elements in Wireless Sensor Networks[C]// 2013 IEEE Jordan Conference Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT). IEEE, 2013: 1-5