

传感网中时延受限的移动式数据收集方法综述

王文华¹ 王 田¹ 吴 群¹ 王国军² 贾维嘉³

¹(华侨大学计算机科学与技术学院 福建厦门 361021)

²(广州大学计算机科学与教育软件学院 广州 510006)

³(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

(jsjwangwenhua@126.com)

Survey of Delay-Constrained Data Collection with Mobile Elements in WSNs

Wang Wenhua¹, Wang Tian¹, Wu Qun¹, Wang Guojun², and Jia Weijia³

¹(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021)

²(School of Computer Science and Educational Software, Guangzhou University, Guangzhou 510006)

³(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract Data collection is one of the hot topics in wireless sensor networks. In traditional wireless sensor networks, those sensor nodes near the sink will deplete their energy prematurely for forwarding data sensed by both themselves and other nodes, which becomes the energy bottleneck and shortens the lifetime of whole networks. To save the energy of sensors in the wireless sensor networks, mobility elements are introduced to collect data in a lot of research work since their energy can be replenished because of mobility. However, the velocity of the mobile elements is slow, which may lead to long data collection delay. To address this problem, the problem of how to maximize the network lifetime while guaranteeing the data collection delay being less than a certain value has become a hot topic. In this paper, we investigate this kind of delay-constrained data collection methods with mobile elements in detail. We first sum up the characteristics of the delay-constrained mobile data collection methods via a novel classification. These methods are compared with each other according to a serial of key parameters. Moreover, we analyze the advantages, disadvantages and the application scope of these methods, summarize the main problems to be addressed, and further point out the future outlook on the research and application directions.

Key words wireless sensor networks; mobile data collection; delay-constrained; energy optimization; lifetime of networks

摘 要 数据收集是无线传感器网络中研究的热点问题之一,然而在传统的无线传感器网络中,基站附近的节点由于承担了大量数据转发任务而导致自身能量过早耗尽,缩短了网络的生命期.不少研究通过引入能量较为充足的移动性节点来收集数据,以节省普通传感器节点的能量,但是却导致了数据收集时

收稿日期:2015-11-03;修回日期:2016-06-13

基金项目:国家“九七三”重点基础研究发展计划基金项目(2015CB352401);国家自然科学基金项目(61532013,61572206,61202468);福建省自然科学基金项目(2014J01240);华侨大学研究生科研创新培育项目(1400214019)

This work was supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2014CB340501), the National Natural Science Foundation of China (61532013, 61572206, 61202468), the Natural Science Foundation of Fujian Province of China (2014J01240), and the Foster Project for Graduate Student in Research and Innovation of Huaqiao University (1400214019).

通信作者:王田(cs_tianwang@163.com)

延过大,如何在保证数据收集时延的前提下最大化网络生命期已成为近几年研究的热点问题.对目前主要的时延受限的移动式数据收集方法进行了充分调研,通过对这些方法的详细分类和比较,归纳了时延受限的移动式数据收集的各类方法的特点,分析了这些方法的优缺点和适用范围,总结了存在的主要问题,并指出了未来的研究方向.

关键词 无线传感网;移动式数据收集;时延限制;能量优化;网络生命期

中图法分类号 TP393

随着微型传感技术、嵌入式计算技术和无线通信技术的发展,融合了这3种技术的无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)引起了人们的广泛关注^[1]. WSNs由具有感知、存储和数据处理能力并能进行短距离无线通信的传感器节点组成,在国防军事、国家安全、智能交通、环境监测、反恐抗灾等中显示出广阔的应用前景^[2-3]. 传感网集数据收集、处理和传输等功能于一体,扩展了人们信息获取的能力,被美国《商业周刊》认为是21世纪最具影响力的21项技术之一^[4]. 传感器节点一般采用电池供电,由于其体积微小,所携带的能量十分有限^[5-6]. 传统 WSNs 中节点是静止不动的,节点采集到的数据需要通过多跳转发给基站,基站周围的节点由于要承担更多的通信负载而过早耗尽能量,导致基站周围出现能量空洞^[7]. 能量空洞的出现使节点采集到的数据无法再传输给基站,由此造成网络分割甚至失效,大大缩短了网络生命期^[8],成为制约传感网应用的瓶颈^[9],同时网络中遗留大量能量资源,造成能量的浪费.

尽管一些研究采用多级传输半径和节点非均匀分布的方法来尽可能地均衡节点能耗,但是能量空洞问题仍然存在^[10]. 为最大限度地解决传感网中的“热点”和能量空洞问题,研究人员引入了移动性节点^[11-12]. 相对于一般节点,这些移动性节点的通信能力和计算能力都较为强大,且其能量相对比较充足,可以协助收集数据,从而降低节点能耗,延长网络生命期.但是由于网络的规模一般较大,移动节点的移动速度远小于数据转发速度,使得数据收集的时延增大^[13]. 在很多实际应用中,需要在一定的时延范围内将采集到的数据转发到基站,否则这些数据信息将毫无意义^[14]. 因此,如何在规定的时延之内将采集到的数据转发给基站,同时最小化节点能耗成为研究的关键问题. 本文对时延受限的移动式数据收集方法进行了分析和总结,提出了该领域当前存在的问题和挑战,并指出了将来需要重点关注的研究方向.

1 时延受限的移动式数据收集问题概述

1.1 问题描述

WSNs由带有无线射频发射模块和数据感知模块的传感器节点组成,节点能实现环境信息的感知、存储、融合以及短距离无线通信等操作^[15]. 其数据收集的过程包括:1)从环境中感知、采集数据;2)将数据进行简单处理或存储;3)发送数据至基站^[16]. 为了解决“热点”和能量空洞问题,研究者引入了移动性节点^[17],这种借助移动性节点进行数据收集的模式被称为移动式数据收集. 但由于节点移动速度缓慢,导致数据收集时延增大,限制了其在实时性要求较高的网络中的应用^[18]. 因此如何在保证较低时延(如不超过一个阈值)的基础上延长网络生命期成为近年来研究的热点,即时延受限的移动式数据收集^[19-20]. 本文作者在移动式数据收集领域中做了大量的研究,在文献[21]中设计了 RD-VT(rendezvous design for variable tracks)算法,在网络中寻找最优的汇聚节点集合来缩短基站移动路径;在文献[19]中给出了时延受限的移动式数据收集的典型例子,如图1所示. 节点将采集到的数据转发给汇聚节点进行融合并缓存,数据收集器遍历汇聚节点收集数据. 为了达到时延要求,收集器在20 min内(预先设定的时延限制条件)访问汇聚节点一遍,收集缓存在汇聚节点中的数据,最后返回并将数据交付给基站.

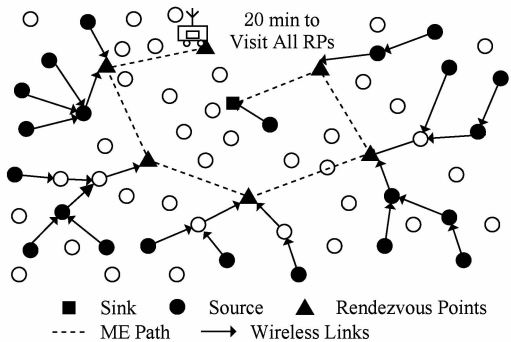


Fig. 1 Delay-constrained mobile data collection

图1 时延受限的移动式数据收集

1.2 主要度量指标

本文通过对时延受限的移动式数据收集进行分析,总结出现阶段其6个主要度量指标如下:

1) 最小化数据收集时延

以 $n_1, n_2, \dots, n_k$ 表示移动元素在一轮数据收集过程中所经过的节点,则数据收集时延 T_D 可以表示为

$$T_D = \sum_{i=1}^k (t_{n_i} + s_{n_i}), \quad (1)$$

其中, t_{n_i} 表示移动元素从节点 n_i 移动到节点 n_{i+1} 的时间, s_{n_i} 为移动元素在节点 n_i 处的停留时间,当其不停留时 $s_{n_i} = 0$. 则式(1)的优化函数为

$$\min T_D. \quad (2)$$

在实际应用场景中往往设定时延阈值 T , 则有:

$$\min T_D \leq T. \quad (3)$$

2) 最小化节点能耗

在无线传感器网络中,节点的能耗主要包括2个方面:1)发送数据的能量消耗 Et_i ; 2)接收数据的能量消耗 Er_i . 节点之间通信的能量消耗取决于节点之间的距离 d 和数据的大小 k (单位为 b). 则网络中的节点能耗可以表示为

$$Et_i = k(E_{\text{elec}} + \rho d_{ij}^f), \quad (4)$$

$$Er_i = kE_{\text{elec}}, \quad (5)$$

$$E = \sum_{i \in S \setminus \{s_1\}} (Et_i + Er_i), \quad (6)$$

其中, Et_i 表示节点 i 向节点 j 转发 k 的数据所消耗的能量, d_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的距离; Er_i 表示节点 i 接收 k 的数据所消耗的能量; E_{elec} 表示用无线电波接收和传送数据的能耗常数; ρ 表示信号衰减因子; S 表示网络中的传感节点的集合, 其中 s_1 表示基站; E 表示传感器网络总的能量消耗.

则设计的目的是同时最小化 Et_i, Er_i, E 或者达到它们的折中. 为了最小化节点自身的能耗, 应使节点尽量处于休眠状态, 只有在需要采集或者转发数据时将其唤醒; 为了最小化节点转发数据的能耗, 应使转发树的深度尽量小, 即使其转发尽量少的数据.

3) 最大化网络生命期

在给定的网络中, 总能找到一些节点(如树根节点、簇头节点、网格头节点), 一旦这些节点的能量消耗完就势必引起网络分割, 从而使得网络通信中断. 因此, 在数据收集过程中应尽量降低这些节点的能耗, 均衡网络流量负载, 从而达到延长网络生命期的目的. 假设每个节点的总能量为 e , 每个节点的平均

能耗速率为 e_i , 则最大化网络生命期的优化目标函数为

$$\max(\min_{i=1,2,\dots,n} (e/e_i)). \quad (7)$$

4) 可扩展性

在对算法的仿真实验中, 一般都是使用较小的网络进行算法性能的仿真, 而在实际应用中网络规模都比较大, 因此网络的可扩展性是一个重要指标, 主要是考虑网络规模扩展之后时延、能耗、网络生命周期等指标是否会发生巨变而导致网络性能变差.

5) 数据准确率和完整性

在 WSNs 的数据收集, 由于数据转发、数据融合、节点缓存容量等因素很可能会导致数据丢失、出错等现象的发生, 因此数据准确率和完整性是 WSNs 数据收集的重要指标. 设计的方法要有一定的容错和安全机制来确保数据的准确率和完整性.

6) 负载均衡

网络负载对网络生命周期会产生很大影响, 若负载过于集中则会导致节点过早死亡, 缩短了网络生命期, 因此设计的算法应尽量均衡网络负载. 避免一些关键节点的能耗过大而引起的网络失效或者死亡.

2 存在的问题和挑战

目前时延受限的移动式数据收集主要存在4个问题与挑战:

1) 如何达到延长网络生命期和降低数据收集时延的折中

为了解决能量空洞问题, 相关研究引入了移动性节点, 却带来了数据收集时延增大的问题. 因此如何在保证网络生命期的基础上尽量降低数据收集时延是无线传感器网络中的重要挑战.

2) 如何确定最佳的移动节点数量以及他们的合理调度

在实际应用中, 网络的规模一般较大, 因此利用多个移动节点显然能很好地降低数据收集时延, 但是同时也会增加网络的成本. 因此如何根据网络的规模和实际情况确定合理的移动元素数量成为需要研究的重点问题. 另外对移动元素的合理调度以及他们之间的协作也能有效地降低数据收集时延, 在这方面的研究工作还比较少, 也是一个全新的挑战.

3) 如何确定合适的网络结构类型

将网络划分为特殊的网络结构, 如树状结构^[22]、簇状结构^[23]、网格结构等, 可以很好地平衡延长网络生命期和降低数据收集时延之间的矛盾, 因此在

实际应用中如何根据网络的各项指标来确定合适的网络结构类型是需要重点解决的问题。

4) 实际环境中干扰的规避

由于传感网的应用环境十分复杂,节点的移动会受到各种环境因素的干扰而难以控制,因此实际的数据收集时延和理论值存在很大的偏差。如何规避实际环境的干扰来得到理想的结果是一个重要的挑战。

3 时延受限的移动式数据收集分类解析

3.1 时延受限的移动式数据收集分类

根据不同的分类标准,例如移动元素类型、网络结构类型等,时延受限的移动式数据收集存在 5 种分类方法,下面将分别对各种分类方式进行介绍。

1) 基于移动元素类型的分类

依据移动元素类型的不同,可分为基站移动、数据收集器移动和节点移动 3 种数据收集方式。①基于基站移动的数据收集是指基站在网络中移动并收集数据,基站收集到节点采集的数据后可以直接通过无线的方式发送给终端用户;②基于数据收集器移动的数据收集是指数据收集器在网络中移动进行数据收集并以一定的方式将数据交付给基站;③基于节点移动的数据收集是指在节点一直处于运动状态,以此来改变连通性等网络特性来提高数据收集效率。

2) 基于网络中是否存在移动轨道的分类

根据网络中是否存在移动轨道,可分为基于轨道移动和无移动轨道 2 种数据收集方式。①基于轨道移动的数据收集是指在网络中铺设轨道,移动元素只能在这些轨道上移动,在这种方式中由于移动元素在既定的轨道上移动,因此能够很好地避免环境中障碍物等的影响,提高了其对环境的适应性;②无移动轨道的数据收集是指移动元素可以在网络中的任何位置移动,增加了移动元素移动路径的灵活性,并且能够避免前者由于轨道被破坏引起的网络瘫痪等情况。

3) 基于网络结构类型的分类

根据网络结构类型的不同,可分为分层网络和一般网络 2 种数据收集方式。①分层网络是指根据网络中节点的位置、数据采集速率等信息将节点分成不同的层次结构,主要包括簇状结构、树状结构和网格结构,在分层的网络中节点将采集到的数据通过多跳的方式转发给指定的汇聚节点(簇头、树根和网格头节点)进行数据融合、存储,移动节点移动到

这些汇聚节点附近进行数据收集;②一般网络中的数据收集是指没有特殊网络结构的数据收集模式。

4) 基于是否需要节点位置信息的分类

根据在数据收集过程中是否需要节点的位置信息,可分为基于位置信息和非基于位置信息 2 种数据收集方式。①在基于位置信息的数据收集中节点需要知道相互之间的位置,这种方式可以根据节点的位置、采集到的数据量及时延限制等信息来动态控制节点的移动,便于宏观调控,但是却增加了对节点的硬件要求,并且节点相互之间交换位置信息也增加了负载和能耗;②非基于位置信息数据收集不需要知道节点的位置,硬件成本较低,但是这种方式不能得到网络的全局信息。

5) 基于移动元素是否发送请求信号的分类

根据数据收集过程中移动元素是否发送数据请求信号,可分为基于数据查询和基于数据推送 2 种数据收集方式。①基于数据查询的数据收集是指移动元素进入网络中后不停的发送探测信息,以查看节点是否收集到基站感兴趣的数据,这种数据收集方式可以丢弃一些无用的数据,减轻网络的负载;②基于数据推送的数据收集中不需要发送探测信息,而且节点在收集到数据后还可能会向基站节点发送请求信息以查看自己采集到的数据是否为基站感兴趣的数据。

本文通过对时延受限的移动式数据收集进行调研,发现基于移动元素的移动方式进行分类能更好地对其特征进行归纳、总结。根据移动元素在移动过程中的移动状态能否对环境的变化适时地进行调整,可以将时延受限的移动式数据收集分为静态移动数据收集和动态移动数据收集两大类。1) 静态移动数据收集是指移动元素在网络中移动的过程中其移动方式不会依据网络环境的变化而发生改变。具体又可以分为随机移动和固定路径移动 2 类数据收集方式。其中①随机移动数据收集方式是指移动元素在网络区域内可以随机移动,移动路径和方向不受控制,其可以移动到节点通信范围内进行数据收集,能大大避免因数据大量转而引起的节点“死亡”现象。②固定路径移动数据收集方式是指移动元素沿着规划好的路径移动,其移动路径一经确定不可再改变。这种方式有利于节点在决定数据转发方向时做出预测,即将数据尽量向移动路径方向转发,其不但可以很好地降低数据收集时延,还可以避免因数据随机转发而引起的能耗较大等问题。2) 动态移动数据收集是指移动元素的移动状态(速度、方向

等)可以不断根据网络的情况而调整.例如可以随着数据采集速率的不同和网络节点能量的变化而不停地改变移动元素的移动轨迹,灵活性较强.具体的

分类方法如图 2 所示.本文根据这种分类方式对已有的时延受限的移动式数据收集进行详细的分析和总结.

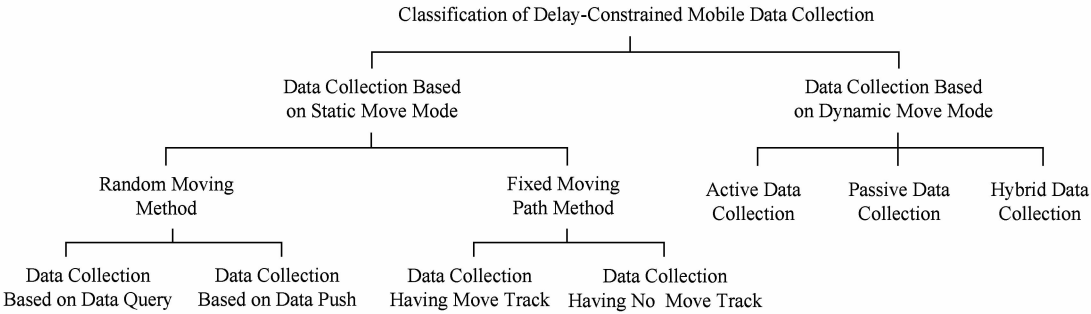


Fig. 2 Classification of delay-constrained mobile data collection

图 2 时延受限的移动式数据收集分类

3.2 静态移动数据收集方式

3.2.1 随机移动数据收集

在随机移动数据收集方式中,根据移动元素是否向节点发送数据请求信息,可以分为基于数据查询的数据收集和基于数据推送的数据收集.前者是指移动元素在移动过程中向节点发送数据请求信息,以提醒节点将缓存的有用数据转发给移动元素;后者则不发送这种请求信息,由节点直接推送数据至移动元素.本节将对这 2 类数据收集方式分别进行介绍.

1) 基于数据查询的数据收集

基于数据查询的数据收集是指移动元素在移动的过程中不停发送探测信息,以查看节点是否采集到有用信息.在此方式中节点在大部分时间内处于休眠状态,只有在接收到移动元素发送的探测信号时才被唤醒,因此可以降低能耗.

基于网络结构的网络,文献[24]提出了基于网络的实时数据收集方法(grid-based real-time data gathering protocol, GRDG),根据位置信息将网络划分为网格结构,如图 3 所示.网格中剩余能量最多的节点被选为网格头节点(grid head, GH).基站移动到网络中时,发送探测信息唤醒头节点,当收到反馈信息时以返回反馈信息的节点为根节点组成树状结构,其他头节点朝着树根的方向转发数据.其优点是综合考虑了网络中的数据传输协议和路由规划,可扩展性较好.缺点是节点要能获得自己的位置信息,对节点的硬件要求较高,网络造价较高.而文献[25]将数据收集建模为快速 Markov 决策过程(fast Markov decision process, FMDP).将节点的路径选择问题抽象为取得的效果与能耗之差,并提出了

基于投影梯度的解决方案,能够取得能耗和时延的折中.其缺点是算法的定向性强,只能适用于特定的网络环境中.

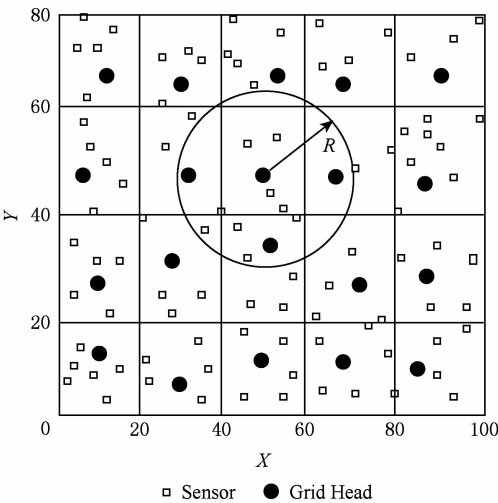


Fig. 3 The application scene of RGDG

图 3 RGDG 应用场景

这类方法的缺点是当基站没有查询到节点时,即使该节点采集到很紧急的数据,节点也不会向基站发送数据,因此实时性效果仍然不好.另外,网络中的一些区域可能长时间不被访问,这样就会使网络中的部分数据丢失,导致数据的不完整.

2) 基于数据推送的数据收集

基于数据推送的数据收集是指节点采集到数据后直接或间接地将采集到的数据转发给移动元素,且其还可能向基站发送请求信号以查看其采集的数据是否为基站感兴趣的数据.

基于网络中节点密度的不同,文献[26]提出了 WFS(wait-focus-spray)方法.其根据数据源节点和

数据收集器的距离关系来动态地决定数据转发时刻,且转发的数据均带有1个时限,若在这个时限内数据未交付给数据收集器,则丢弃.该文提出的数据在规定时限未能交付则直接丢弃的方法会造成数据包的丢失,破坏数据的完整性.与此类似的是 Cha 等人^[27]提出的基于连通性的数据收集方法(connectivity based data gathering, CBDG).其根据网络的连通性来决定是直接转发数据还是等待一段时间再转发数据.节点的连通性根据其数据转发率及邻居节点的连通性来确定.此方法优点是考虑了网络的连通性对数据收集时延的影响.

基于预测移动元素位置的思想,文献[28]中提出了基于预期区域的实时路由方法(expected area based real-time routing, EAR2).其首先根据基站的移动速度和时延估算出基站在时延限制内可能移动到的区域,根据数据源与预期区域的最远距离计算出需要的数据传输速率.假设开始时间为 t_0 ,数据源采集到数据的时间为 t_1 ,sink 接收到数据的时间为 t_2 ,则 sink 节点的预期区域为半径为 $r=(t_2-t_0) \times V_{\text{sink}}$ 的圆形区域,如图4所示.数据收集时延为 $T_D=t_2-t_1$.数据转发过程包括2个阶段,即在数据源 src 和预期区域中的第1个中继节点 pl 之间的转发阶段及在预期区域中的洪泛阶段,假设其所需的时间分别用 $T_{\text{forwarding}}$ 和 T_{flooding} 来表示,则为了满足时延要求,有:

$$T_D \geq T_{\text{forwarding}} + T_{\text{flooding}}, \quad (8)$$

数据转发时的速度为

$$S_{\text{speed}} = d(src, pl) / (T_D - T_{\text{flooding}}), \quad (9)$$

数据转发到 pl 后以洪泛的方式转发数据直到基站接收到数据.其缺点是采用洪泛法在预期区域中传输数据导致能量空洞问题仍然存在,并且当基站的移动速度变化时,可能会引起不能接收到数据

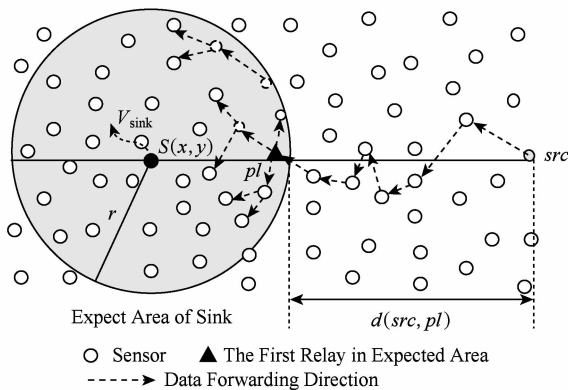


Fig. 4 The example of the expect area in EAR2

图4 EAR2中预期区域图示

而导致数据丢失.为了解决数据在EA中洪泛而导致能耗较大的问题, Lee 等人^[29]提出将网络区域划分为网格结构,并将预期区域中的网格记为 EGs (expect grids).当数据到达预期区域中时,只需要将数据转发给网格头结点即可.但是其仍然不能解决基站移动速度变化而引起的数据丢失问题.

此外,基于节点与基站距离的不同, Feng 等人^[30]提出了基于距离感知的自适应数据收集方法(distance-aware replica adaptive data gathering, DRADG).其根据节点与基站之间的距离来动态地选择转发数据的邻居节点数量,并根据节点通过基站通信范围的频率来决定其转发数据的概率.其缺点是概率的多次计算及其在节点间的多次传递将增加算法的复杂度.

基于数据推送的数据收集方式虽然避免了基于数据查询的数据收集方式中存在的问题,但是其中大多数方法需要节点知道自身的位置信息,如文献[28-30],因此对节点的硬件要求较高,造成网络代价较高,很难将其应用于实际.

3.2.2 固定路径移动数据收集

与随机移动数据收集方式相比,固定路径移动数据收集方式使得数据收集具有规划性和前瞻性.根据网络中是否预先铺设轨道可分为2类:基于轨道移动的数据收集和无移动轨道的数据收集.前者的移动路径在预设的轨道上,对环境的适应性较强;后者的路径可以在网络中任何位置,没有轨道的限制.

1) 基于轨道移动的数据收集

基于轨道移动的数据收集方式是指在网络区域中铺设有一定的轨道,移动元素的移动路径只能在这些轨道上,这样不但可以很好地预测网络的性能,而且可以在一定程度上避免网络环境中障碍物的影响,对环境的适应性较高.

文献[31-32]分别指出移动元素在轨道上移动时在其通信范围内的节点为中继节点和 sub-sink 节点,其他节点采集到的数据只需要转发给这些节点即可.文献[31]将数据分为时延敏感型数据和时延容忍型数据2类,并分别设计了时延敏感路由(delay-sensitive routing, DSR)和时延容忍路由(delay-tolerant routing, DTR)两种路径选择算法.时延敏感型数据直接转发给数据收集器附近的中继节点;时延容忍型数据则被转发给距离较近的中继节点.其缺点是没有指出如何判定数据的类别,该文中只是假设2类数据各有一半.为了使基站移动路径最优,文献[32]提出了基于虚拟节点的方法

(virtual nodes priority, VNP). 基站基于虚拟节点优先级进行访问, 其访问的不是节点的物理位置, 而是虚拟节点. 其缺点是假定节点具有相同的数据采集速率, 并且没有考虑 sub-sink 在基站通信范围内时是否能将其缓存的数据全部交付.

鉴于延长网络生命期和降低数据收集延迟的考虑, 文献[33-34]分别提出了 n 轨道模型 (n -orbit model, NOM) 模型和基于汇聚点的方法 (rendezvous-based approach, RBA). NOM 将网络区域划分为极坐标结构, 扇形网格中的节点将采集到的数据通过多跳方式转发给头节点, 不同的基站沿着其所在的圆环移动并收集数据. 该方法的优点是采用多个基站, 能有效地缩短数据收集延迟和降低数据丢失率. 缺点是假设节点数据采集速率相同. 在 RBA 中, 节点根据其位置信息组成簇状结构, 其指出将距离基站移动路径较近的节点组成较小的簇. 其优点在于簇的大小随着其与基站移动路径距离的增大而增大. 缺点是文中虽然提出了在能耗和时延之间的折中问题, 但并没有对时延数据进行分析.

Kinalis 等人^[35]考虑到节点数据采集速率不同和分布不均的情况, 提出了基于动态停留时间的方法 (biased sink mobility with adaptive stop times, BSMAS), 即移动元素在数据采集速率大或节点密集处适当停留. 他们主要解决 2 个问题: 1) 网格访问顺序的确定; 2) 基站停留时间的确定. 网络区域被划分为图 5 所示的网格, 基站只能在相邻网格的中心连线上移动. 对于任意网格 v , 当基站移动至其邻居网格中时, 将其可能被访问值加 1, 若移动节点位于网格 u , 对于所有的网格 v , 若 $(u, v) \in E$, 定义:

$$c_{\text{neigh}}(u) = \sum_v c_v, \quad (10)$$

其中, c_v 为基站访问网格 v 的次数, 则其去访问网格 v 的概率为

$$p_v = (1 - c_v/c_{\text{neigh}}(u)) / (deg_u - 1), \quad (11)$$

其中, deg_u 为网格的邻居网格数. 基站在网格中的停留时间通过节点的能量来确定. 网络中节点的能量为

$$E_{\text{total}} = \rho \times S \times \epsilon_i = n \times \varphi \times T_{\text{total_stop}} \times E_{\text{msg}} + E_{\text{idle}}, \quad (12)$$

其中, ρ 为网络中节点密度, S 为网络区域的面积, ϵ_i 为节点的平均能量, n 为节点的个数, φ 为数据产生速率, E_{msg} 为收集单位数据的能耗, $T_{\text{total_stop}}$ 为总的停留时间, E_{idle} 为节点空闲时自身的能耗, 其可通过

$$E_{\text{idle}} = n \times T_{\text{idle}} \times e_{\text{idle}} = n \times e_{\text{idle}} \times (T_{\text{sum}} - T_{\text{total_stop}}) \quad (13)$$

求出. 其中 e_{idle} 为节点空闲时自身的能耗速率. 则基站在网络中总的停留时间为

$$T_{\text{total_stop}} = \frac{\rho \times S \times \epsilon_i - e_{\text{idle}} \times n \times T_{\text{sum}}}{n \times \varphi \times E_{\text{msg}} - e_{\text{idle}} \times n}. \quad (14)$$

假设实验进行了 r 轮, 则一轮的停留时间为

$$T_{\text{stop_round}} = T_{\text{total_stop}} / r, \quad (15)$$

则基站在每个网格中的自适应停留时间为

$$T_{\text{cell}_i} = \frac{n_i}{n} T_{\text{stop_round}}, \quad (16)$$

其中, n_i 为网格 i 中节点个数. 其优点是综合考虑了网络中节点的数据采集速率和分布情况, 对环境的适应度较高, 且不受网络连通性的影响. 缺点是决定基站总的停留时间时只考虑了网络中节点的总能量, 而没有考虑个别节点因能耗过快而过早死亡的情况.

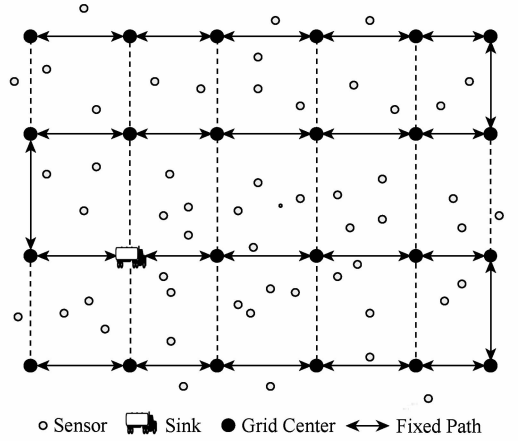


Fig. 5 The example of moving along the fixed path

图 5 固定轨道移动示意图

在基于轨道移动的数据收集方式中, 文献[31-32]提出的在移动元素通信范围内的节点为中继或 sub-sink 节点的思想很好地规定了数据转发方向, 使其不会向其他方向转发. 文献[32-33]提出的节点数据采集速率相同的方法很显然不符合实际应用, 而文献[35]则考虑了节点数据采集速率不同的情况. 这类方法虽然可以很好地预测网络的性能, 更好地适应网络环境, 但是, 在网络环境中铺设轨道需要一定的代价. 如果网络所处的环境过于复杂, 则轨道铺设工作也不易完成, 并且轨道容易受环境因素变化的影响, 如果某段轨道发生损坏, 则整个网络将会瘫痪.

2) 无移动轨道的数据收集

在无移动轨道的数据收集方式中, 移动元素的路径可以在网络中的任何位置, 其路径没有特定轨道的限制, 一般移动元素的最优路径确定后即沿着

这条路径移动,其路径不再随着时间的改变而发生变化。

为了将数据收集问题转化成分簇和移动路径优化问题,文献[36]提出周期性汇聚的数据收集(periodic rendezvous data collection, PRDC)问题.根据簇头节点所在的区域以及组成的移动路径进行优化,移动元素沿着最终的路径移动进行数据收集.其缺点是在分簇和选择簇头节点时没有考虑节点能量,如果簇头节点的能量较少则其可能会很快死亡.文献[37]同样使用簇状网络,提出了基于范围约束的分簇算法(range constrained clustering, RCC),并提出新的无线通信数据收集方案,即在 WSN 的中间位置设置网关,数据收集器直接将数据交付给网关,再由网关通过有线的方式将数据传送给基站.缺点是数据收集器要在停靠点暂停才能进行数据收集,没有考虑移动时数据收集的情况。

Almi'ani 等人^[38]将路径规划问题抽象为线性规划问题(integer linear programming, ILP),提出了 Tcut 和 Tpac 两种算法.前者是先找到最长的路径,在保证数据完整性的前提下不断的缩短路径;后者是先找到最短的路径,然后在满足时延限制的前提下,逐渐加入更多的节点直到能收集到所有节点采集的数据.但是文中假设网络应用的环境是完全平坦的并且没有任何障碍物,这在现实中很难满足。

基于对数据收集器的移动路径和速度进行优化,文献[39]提出了基于凸包的数据收集方法(convex hull based data collection, CHBDC),该方法根据网络整体结构决定最初的节点访问顺序,然后综合考虑其移动速度和移动路径进行优化,最后再次根据全网结构调整其移动路径。

另一些方法将部分节点设置为数据收集点(data collection point, DCP)^[40-43],这种思想可以将节点采集的数据转发至 DCP 进行缓存,等待移动节点收集数据.文献[40]提出的带多跳限制的移动数据收集方案(data collection point based mobile data gathering scheme with relay hop constraint, DCP-MDGS-RHC)在能耗和时延之间寻找折中.考虑到时延问题,DCP 选择在基站附近的节点并且不能过多;考虑到网络生命期的问题,DCP 和簇中的节点应在较少的跳数内完成数据传输.与文献[40]相似,文献[41]提出了基于位置预测的数据收集方法(location prediction based data gathering using a mobile sink, LPDGMS).该方法将网络划分为 4 个区域,基站在网络中做圆周运动,圆周上均匀分布 N 个(一般设置为 4 的倍

数)DCP.节点通过时钟同步来计算基站的位置坐标,通过多跳路由将数据转发到基站将要到达的 DCP 处进行数据交付.该方法只能适用于较小的网络中,当网络区域增大时数据收集时延会不断增大且网络负载和节点能耗也会增加.与文献[41]不同的是,文献[42]提出的 CTP(common turning point)方法中移动基站的 DCP 不是实际的节点,而是在相邻的簇头节点连线上以最大限度缩短基站移动路径.文献[43]设计的基于移动基站的有效数据收集方法(efficient data collection using mobile sink, EDC-MS)为了保证 DCP 缓存的数据能全部交付给基站,汇聚节点会随基站移动直到数据全部交付.另外,此方法也考虑了数据的优先级,即时延要求较高的数据会优先转发给基站.其缺点在于汇聚节点的移动影响了网络的稳定性,节点要寻找新的汇聚节点来转发数据。

文献[44]结合分层路由和移动式数据收集提出了混合式数据收集方法(node density based clustering and mobile collection, NDCMC).其选择邻居节点较多的节点作为簇头节点,然后采用 TSP 方法规划移动路径来遍历簇头节点.基站在规划好的路径上移动的过程中能与其进行直接通信的节点被选为 VHs(virtual heads).节点将采集到的数据转发到附近的 CHs 或 VHS,当基站移动到你附近时收集其缓存的数据.该方法的缺点是在进行簇头选择时只是基于其密度信息,这样在节点分布较密集的区域会选择过多的簇头节点,增加了基站的移动路径。

在无移动轨道的数据收集方式中,节点感知的数据大多需要转发给 DCP 或簇头节点,因此簇头节点仍然需要转发大量的能量而成为网络的瓶颈,没有从根本上解决网络“热点”问题。

3.3 动态移动数据收集方式

根据数据收集方式的不同,动态移动数据收集方式可分为 3 种类型:主动数据收集、被动数据收集和混合数据收集.1)主动数据收集是指移动元素主动移动到节点处收集数据,优点在于节点以单跳方式向移动元素转发数据,很大程度上降低了数据转发能耗从而延长了网络生命期;2)被动数据收集是指节点通过多跳方式向移动元素即将到达的位置转发数据,直到将数据交付给移动元素,由于数据转发速率远大于移动元素的移动速度,被动数据收集保证了较小的时延但会增加能耗;3)混合数据收集是指节点将采集到数据以多跳方式转发给网络中汇聚节点进行缓存,移动元素只需要移动到这些汇聚节

点处收集数据,这种方式兼具主动收集和被动收集的优点.

3.3.1 主动数据收集

动态移动数据收集方式下的主动数据收集方式是指移动元素移动到节点处以单跳的方式直接收集数据,这种数据收集方式可以最大化地减少网络能耗,延长网络生命期,但是由于移动元素要移动到每个节点处收集数据,因此会导致数据收集时延较大,很难满足实时性要求较高的网络需求.

考虑到节点数据采集速率及缓存容量的差异,文献[45]提出了基于动态截止时间的调度方法(mobile element scheduling with dynamic deadlines, MESDD). 基站根据节点缓存容量和数据采集速率决定其访问截止时间并决定其访问的先后顺序,且每次访问后更新节点的访问截止时间. 该文中提出了2种决定节点访问顺序的方法:EDF(earliest deadline first with k -look ahead)和MWSF(minimum weight sum first). 网络中的节点组成一个连通图,节点连线上的数值构成了其代价矩阵 $cost_{n \times n}$, $cost_{ij}$ 表示移动节点由节点 i 移动到节点 j 所需时间. $DL_{n \times 1}$ 组成了各个节点的动态时延向量,其由节点缓存耗尽所需的时间 OT_i 和访问时间动态决定,即:

$$DL_i = T_{cur} + OT_i, \tag{17}$$

其中, DL_i 表示节点 i 的动态时延, T_{cur} 表示当前访问时间. 算法 EDF with k -look ahead 的基本思想是对于在请求序列的前 k 个节点寻找1个访问序列,使得它们均不会超过其截止时间且第 $k+1$ 个节点的访问时间最早,得到的访问序列中的第1个节点作为下一个访问节点,并且根据式(17)更新其截止时间,对于后续节点执行相同的操作. 而 MWSF 算法则分别给时延和访问代价一个权重,选择其和较小的节点作为下一个访问节点,其计算公式为

$$W_i = \rho \times (DL_i - T_{cur}) + (1 - \rho) \times cost_{mi}, \tag{18}$$

其中, m 为当前正在访问的节点. 这种方法的缺点是基站只在节点发出数据传输请求时才考虑对其进行数据收集,并且可能引起基站在同一条路径上反复移动而消耗大量能量.

当前大多研究是在降低网络能耗和缩短移动路径之间寻找折中,如文献[46-49]等,以使其能在满足时延要求的前提下尽量延长网络生命周期.

为优化移动元素的移动路径,文献[46]提出了基于遗传算法的方法(data mule path planning optimization, DMPPPO). 其创新在于根据节点剩余能量来调整节点广播功率,进而改变其通信范围,数

据收集器的路径根据节点的通信范围不断进行调整,如图6所示. 同样调整节点通信范围的还有文献[47]. 文献[48]提出基于聚类的遗传算法(balanced standard deviation algorithm, BSDA). 首先根据聚类算法(clustering algorithm)将网络分为簇状结构,并将簇内节点的重叠通信区域设置为航点,数据收集器只须经过这些航点收集数据即可. 同时设计算法 LLA(look-ahead locating algorithm)来缩短路径. 此方法的缺点是没有考虑数据融合以提高数据收集效率,同时,数据收集器在收集完所有数据后才返回基站,时延较大,不适用于实时性要求比较高的应用场景. Gu 等人在文献[49]中分析了基站移动性、路由、时延等对数据收集时延的影响,并提出解决方案 ESWC(efficient scheduling for the mobile sink in wireless sensor network with delay constraint)来优化基站移动路径,它的优点是综合考虑了影响时延和能耗的众多因素.

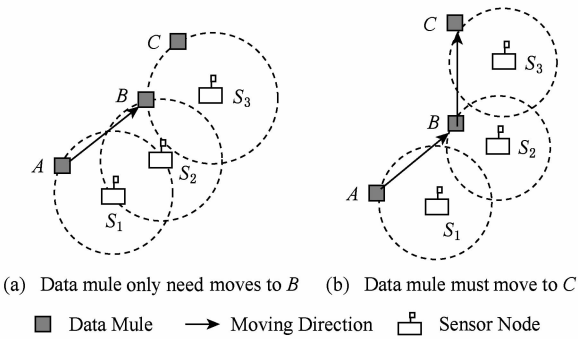


Fig. 6 The diagram of path planning influenced by the power

图6 功率影响数据驴子路径规划示意图

Tashtarian 等人^[50]提出了基于事件的数据收集方式,当节点捕获到事件时,根据信息量和事件类型决定其访问时间. 据此文章提出了基于决策树的算法 ODT(optimal deadline-based trajectory)来确定基站移动路径. 文献[51]研究了时延最小化问题 DLMP(delivery latency minimization problem). 作者证明 DLMP 是 NP 难问题,并提出替代启发式算法(substitution heuristic algorithm, SHA). 其根据路径经过节点通信范围的边界上时路径最短的原则,用节点通信范围边界上的点来代替节点以缩短基站的路径长度. 缺点在于该算法时间复杂度较高,为 $O(n^3)$,当 n 较大时,算法的开销过高,因此可扩展性差.

另外一些研究指出使用多个移动元素也能很好地降低数据收集时延^[52]. 文献[53-54]提出了基于

邻居的一般最小生成树路径优化模型 (general minimum spanning tree with neighborhood, GMSTN). 文献针对 2 种情况分别提出 2 类最优化问题: 1) 数据驴子只有在在基站附近才能与基站通信 (即 k -TSPN 问题); 2) 数据驴子随时都可以与基站通信 (即 k -PCPN 问题). 缺点是没有合理调度数据驴子, 某个区域可能先后被不同数据驴子访问. 文献[55]设计的时延感知数据收集方法 (latency-aware data acquisition, LA-DA) 则将该问题建模为线性优化问题. Alomari 等人^[56]提出利用距离较近的汇聚点 (closest rendezvous points, CRPs) 来设计移动元素移动路径. 其根据基于遗传算法的 TSP 路径规划确定 CRPs 的访问顺序, 作者也考虑了多移动元素的 CRPs 算法并证明利用多移动元素能够降低数据收集时延.

显然, 在传感网中引入多个移动元素能很好地降低数据收集时延. 另外一些学者考虑到移动元素移动过程中可能不能将节点中缓存的数据全部收集, 因此提出了停靠点的概念, 即在网络中适当位置停靠合适的时间, 以使节点能够完成数据的交付.

Sugihara 等人^[57]将数据收集过程形式化为带位置和时间约束的任务调度问题 DMS (data mule scheduling). 文中提出 3 个子问题: 路径选择、速度控制、任务调度, 并运用启发式贪心算法来动态调度数据驴子. 缺点是数据驴子要访问每个节点进行数据收集, 时延仍然较大. 文献[58]提出延迟容忍移动接收器模型 (delay tolerant mobile sink model, DT-MSM), 但是其没有给出确定基站停靠时间的依据或设计相应的优化算法. 文献[59]对文献[58]中的模型进行优化, 提出了分布式算法 DALM-DT (distributed algorithm for lifetime maximization), 其设计了优化算法确定基站的停留时间和节点每轮转发的数据量. 但是其假设基站的移动时间可以忽略, 而实际场景中由于基站移动速度有限, 因此其移动时间占较大的比重. 文献[60]设计了启发式算法 TFSTS (trajectory finding and sojourn time scheduling), 每次迭代得到新的停靠点和停留时间, 并加到基站移动轨迹中. 缺点在于启发式算法只能得到局部最优结果. 停靠点的提出使移动元素可以收集全部数据, 避免了数据的丢失.

文献[61]提出了适用于不同节点密度的方法 DAWN (density adaptive routing with node deadline awareness). 移动元素根据节点密度来决定收集多少数据和收集哪些节点的数据使其能在规定时延内

将数据交付给基站. 该方法的缺点在于仅仅考虑了节点的密度, 而没有考虑网络中其他的限制因素.

在这类数据收集方式中, 文献[46, 50, 57]规划移动元素的路径以使其能够移动到每个节点处直接收集数据, 这种方式对于规模较小的网络能满足时延的要求, 但是若网络的规模较大, 则其时延会非常大. 文献[56]等中提出的汇聚点的思想能很好地解决这个问题, 移动元素只需要访问汇聚点就可以收集到整个网络中采集到的传感数据, 且其也大大缩短了移动路径, 降低了数据收集时延. 另外, 文献[52-56]中提出的使用多个移动元素的方法也能在一定程度上解决这个问题, 另外多移动元素的引入使网络具有很强的扩展性.

3.3.2 被动数据收集

动态移动数据收集方式下的被动数据收集方式是指节点采集到数据后, 根据移动元素的移动规律将数据通过多跳的方式转发到移动元素即将到达的位置. 这种数据收集方式能够很好地降低数据收集时延, 但是网络中的节点需要知道网络的全局位置信息, 因此对节点的硬件要求较高.

考虑到时延和网络生命期的问题, 文献[62]提出了最大化容忍时延和网络生命期问题 (maximum tolerant delay and the network lifetime, MTDNL), 其在网络中寻找停靠节点, 以这些节点为根节点将其附近的节点组成树状结构. 为了保证根节点附近的节点不成为网络性能的瓶颈, 要求树的深度尽量小; 为了满足时间限制的要求, 所选择的停靠点尽可能的少. 缺点是没有考虑数据融合.

3.3.3 混合数据收集

混合数据收集是指在一定的网络结构 (如树状结构、簇状结构、网格结构) 中, 节点将采集到的数据通过多跳转发给汇聚点 (如树根节点、簇头节点等), 移动元素访问汇聚点进行数据收集的方式.

文献[63]提出了渐进优化方法 MR-CSS (multirate combine skip substitute). 首先得到移动的 TSP 路径, 然后根据不同的速率动态调整移动路径以使移动路径最优.

为了尽量降低数据收集时延, 近年来, 相关研究的新思路是在降低能耗和缩短移动节点路径上达到折中, 如文献[64-66]等. Zhang 等人^[64]针对最小化能量和时延 (min-energy min-latency, MEML) 问题, 结合汇聚点选取和移动路径的优化来均衡时延与能耗, 提出基于概率的路径选择算法 (probabilistic path selection algorithm, PPSA). 其根据数据

收集点的访问概率决定移动路径. 缺点是收敛效果较差. Rao 等人^[65]提出的基于网络协助的数据收集方法(network-assisted data collection, NADC)分析了能耗及时延对基站移动路径选择的影响,提出了基于 k (k 是可调参数)跳的分布式路径选择方法. 优点是当基站不能收集完数据时可适当的停留;缺点是没有定量考虑数据延迟约束. 文献^[66]提出了基于遗传算法和本地搜索协助的算法(genetic algorithm with assistance of local searches, GAALS). 簇头节点利用本地搜索形成最优通信树和最优移动路径,数据收集器沿着最优路径访问簇头节点收集数据,通过限制通信树的深度降低网络能耗和减轻簇头节点的网络负载. 图 7 所示是 2 跳范围内的示意图. 文献^[67]提出了基于加权汇聚规划的方法(weighted rendezvous planning, WRP),其在给定时延要求内尽量增加基站移动路径以减少网络中数据的多跳转发,进而降低网络能耗. 该文中基于节点的权重来选择汇聚点,权重通过节点在单位时间内采集的数据量和节点到基站移动路径上汇聚点的跳数的乘积得到. 当移动路径中加入新的汇聚点时将收集数据较少的汇聚点从路径中移除. 该方法很好地适应了小规模の時延敏感型应用,但是当网络范围较大时仍然会存在各种问题,可扩展性较差.

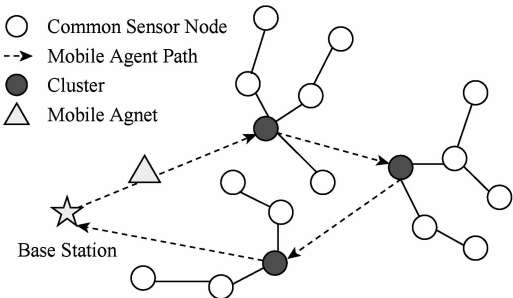


Fig. 7 Mobile data collocation in 2-hop based on cluster network
图 7 基于簇状结构的 2 跳移动数据收集

以上这类寻求能耗和移动路径折中的方法取得了很好的效果,但是其也只能得到近似最优的启发式方法. 而另外一些研究指出若引入多个移动元素进行数据收集^[68],则能更好地降低数据收集的时延. 使用多移动元素的方法一般是不断地调度各个移动元素到数据缓存点收集数据^[69]或者是使每个移动元素负责网络中 1 个分区的数据收集^[70-72]. 基于自组织分簇算法数据收集方法(self-organization clustering algorithm region data collection, SOC-RDC)^[69]将网络中的节点分簇,簇头节点收集到数

据后向基站发送请求信息. 基站根据请求信息调度离相应簇较近的数据收集器来收集数据. 此方式对节点硬件要求较高,如节点需要具备定位能力. 文献^[70-71]提出分层的协作式数据收集方法(hierarchical and cooperative data-gathering, HiCoDG). 在 HiCoDG 中存在 2 种移动元素进行相互协作:移动数据收集器(mobile collector, MC)和移动中继(mobile relay, MR). 网络中的节点被分为不同的组,每个组由 1 个 MC 负责数据收集. MR 定期访问网络中预先设置的位置点 MPs(meeting points),在该位置 MC 可以向 MR 交付收集到的数据. 该文中提出了协作式移动调度方法(cooperative movement scheduling, CMS),其动态地规划 MR 和 MC 的路径及移动速率使他们同时到达 MP 处直接进行数据交付. 该算法能够达到较小的数据时延和较低的网络能耗,但是硬件成本昂贵,在 MP 处要有一定的设备来缓存数据. 在 Joy 等人^[72]提出的基于移动元素的有效数据收集(efficient data collection using mobile elements, EDC-MEs)算法中数据收集器利用 TSP 算法选择移动路径在目标分区内完成对一组簇头节点的数据采集. 该方法的缺点是没有考虑对多个收集器的合理调度.

引入多个移动元素后,每个移动元素只需要负责部分区域而不再需要在整个网络范围内移动,并且各个移动元素可以相互协作以取得更好的效果. 在确保数据收集时延的基础上,为了尽量保证网络生命期,提高网络性能,文献^[73-75]提出了在簇状结构网络中,每个簇中选择多个簇头节点的思想.

基于网络分层的思想,在 LBC-MU(load balanced clustering and MIMO uploading)^[73]和 LBC-DDU(load balanced clustering and dual data uploading)^[74]中,作者提出了由节点、簇头和数据收集器组成的 3 层架构,如图 8 所示. 在节点层设计分布式负载均衡算法 LBC 对节点进行分簇,其在每簇中选择多个簇头节点以平衡负载,在簇头层通过设置簇头节点的通信范围保证簇间连通性. 但是其增加了算法复杂度和网络代价. 方法 BEDA-SC(distributed algorithm based energy with speed control)^[75]同样在簇中选择多个簇头节点,其将簇中能量剩余较多的 2 个节点作为簇头. 该方法新颖之处在于它同时关注移动元素的速度控制问题,很好地保证了收集数据的完整性和可靠性.

选择多个簇头节点的思想很好地均衡了网络负载,延长了网络生命期. 另一些方法考虑在网络中寻找停靠点,如文献^[76-78]等.

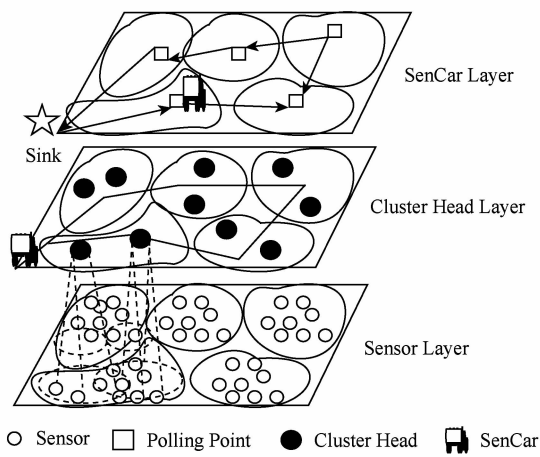


Fig. 8 Data collocation based on three layer structure
图 8 3 层架构模式下的数据收集

基于高效的时延受限数据收集问题 (efficient delay-constrained data collection, EDDC), 文献 [76] 提出动态调度移动基站, 其根据节点的能耗, 调度基站到能量剩余较多的节点组成的停靠点处收集数据, 其他节点将数据转发到停靠点处. 基于有限中继内的移动数据收集问题 (bounded relay hop mobile data gathering, BRH-MDG), Zhao 等人 [77] 提出基于优先权的停靠点选择算法 (priority based PP selection algorithm, PB-PSA) 来寻找最优的停靠点集合 (polling points, PPs). 在 k 跳范围内能和更多节点通信且距离基站较近的节点被选为停靠点. 节点首先将自己标记为停靠点并向其邻居节点发送 k 轮的信息 (包括节点 ID、邻居节点数目及距离基站的跳数), 以保证节点能够得到其 k 跳范围内的节点信息, 在每一轮过程中选择邻居节点较多的节点作为其相关的停靠点, 并去掉自己为停靠点的标志, 经过 k 轮后仍是停靠点的节点被选为最终的停靠点. 这种方法对网络中节点的分布要求较高, 若节点分布不均匀则很难找到最优的停靠点和移动路

径, 而在实际应用中节点的分布情况是很难控制的, 另外当树的深度较大时, 停靠点周围的“热点”问题仍然存在. 同样基于停靠点的思想, 文献 [78] 提出了基于无线能量补充的移动数据收集方法 (wireless energy replenishment and anchor-point based mobile data gathering, WerMDG). 其基本思想是在网络中寻找停靠点 (anchor-points), 移动收集器 (SenCar) 在停靠点处能同时进行充电和数据收集. SenCar 根据节点剩余能量和位置决定停靠点的访问顺序. 该方法的优点是引入了无线充电技术, 考虑了对节点充电的过程, 避免了单个节点死亡引起的网络分割失效等现象; 存在的缺点是对数据收集的延迟没有严格的保证.

为了寻找移动元素的最优路径, 文献 [64, 66, 70-71] 中提出的使用线性规划的方法来达到较低的能耗和时延的折中, 与文献 [63, 72, 75] 中使用 TSP 算法得到最优路径的方法相似, 这些方法只是能得到近似最优路径的启发式方法. 因此其还需要根据其他的因素进行适当调整; 文献 [69-72] 提出的使用多个移动元素收集数据的方法具有很好的可扩展性, 当网络范围扩大时只需要相应地增加移动元素的数量即可, 但是这种方法需要节点知道自己的地理位置信息, 硬件要求较高.

4 分析比较

由于传感网应用环境不尽相同, 用户需求多种多样, 因此数据收集方法具有多样性的特点, 本节基于上文的分类方法对各类数据收集方式进行了对比分析. 表 1 为随机移动数据收集方式特点的比较, 表 2 为固定路径移动数据收集方式特点的比较, 表 3 为动态移动数据收集方式特点的比较.

Table 1 Characteristics of the Random Moving Methods
表 1 随机移动数据收集方式特点

Method	Mobile Element	Number of Mobile Elements	Data Fusion	Network Structure	Exist Multihop	Need Location	Number of Deadline	Deadline Trait
RGDG ^[24]	Sink	Multiple	Yes	Grid/Tree	Yes	Yes		
FMDP ^[25]	Collector	Single	No	Normal	No	No		
WFS ^[26]	Collector	Multiple	No	Normal	Yes	No		
CBDG ^[27]	Sensor	Multiple	No	Normal	Yes	No	Single	Static
EAR2 ^[28]	Sink	Single	No	Normal	Yes	Yes		
EGs ^[29]	Sink	Single	No	Grid	Yes	Yes	Single	Static
DRADG ^[30]	Sensor	Multiple	No	Normal	Yes	Yes		

Table 2 Characteristics of the Fixed Moving Path Methods

表 2 固定路径移动数据收集方式特点

Method	Mobile Element	Move Track	Number of Mobile Element	Data Fusion	Network Structure	Exist Multihop	Need Location	Number of Deadline	Deadline Trait
DSR&-DTR ^[31]	Collector	Exist	Single	No	Normal	Yes	Yes	Multiple	Static
VNP ^[32]	Sink	Exist	Single	Yes	Normal	Yes	Yes	Single	Static
NOM ^[33]	Sink	Exist	Multiple	No	Grid	Yes	No		
RBA ^[34]	Sink	Exist	Multiple	Yes	Cluster	Yes	Yes		
BSMAST ^[35]	Sink	Exist	Single	No	Grid	No	Yes	Single	Static
PRDC ^[36]	Collector	No	Multiple	No	Cluster	No	No		
RCC ^[37]	Collector	No	Single	Yes	Cluster	Yes	Yes		
ILP ^[38]	Collector	No	Multiple	No	Cluster	No	Yes	Single	Static
CHBDC ^[39]	Collector	No	Single	No	Normal	No	Yes		
DCP-MDGS-RHC ^[40]	Collector	No	Single	Yes	Cluster	Yes	No		
LPDGMS ^[41]	Sink	No	Single	No	Sub-area	Yes	Yes		
CTP ^[42]	Collector	No	Single	Yes	Cluster	Yes	Yes	Single	Static
EDC-MS ^[43]	Sink/RP	No	Multiple	Yes	Cluster	Yes	Yes	Multiple	
NDCMC ^[44]	Sink	No	Single	No	Cluster	Yes	Yes		

Table 3 Characteristics of the Dynamic Moving Methods

表 3 动态移动数据收集方式特点

Method	Data Collection Mode	Mobile Element	Number of Mobile Element	MEs Cooperative	Data Fusion	Network Structure	Exist Multihop	Need Location	Energy Constraint of MEs	Number of Deadline	Deadline Trait
MESDD ^[45]	Active	Sink	Multiple		No	Cluster	No	Yes	No	Multiple	Dynamic
DMPPO ^[46]	Active	Collector	Single		No	Normal	No	Yes	No	Single	Static
BSDA ^[48]	Active	Collector	Single		No	Cluster	No	Yes	No	Single	Static
ESWC ^[49]	Active	Sink	Single		No	Normal	No	Yes	No		
ODT ^[50]	Active	Sink	Multiple	No	No	Sub-area	No	Yes	No	Multiple	Dynamic
SHA ^[51]	Active	Sink	Single		No	Normal	No	Yes	No		
GMSTN ^[53-54]	Active	Sink	Multiple		No	Normal	No	Yes	No		
LA-DA ^[55]	Active	Sink	Multiple	Yes	No	Cluster	No	No	No	Single	Static
CRPs ^[56]	Active	Collector	Multiple		Yes	Cluster	No	Yes	Yes		
DMS ^[57]	Active	Collector	Single	No	No	Cluster	No	Yes	No		
DT-MSM ^[58]	Active	Sink	Single		No	Normal	No	Yes	No	Single	Static
DALM-DT ^[59]	Active	Sink	Single		No	Normal	No	Yes	No		
TFSTS ^[60]	Active	Sink	Single		No	Normal	No	Yes	No	Single	Static
DAWN ^[61]	Active	Sensor	Multiple	No	No	Normal	No	Yes	No		
MTDNL ^[62]	Passive	Sink	Single		No	Tree	Yes	No	No	Single	Static
MR-CSS ^[63]	Hybrid	Collector	Single		Yes	Tree	No	No	No	Single	Static
PPSA ^[64]	Hybrid	Collector	Single	No	Yes	Tree	Yes	Yes	No	Multiple	Static
NADC ^[65]	Hybrid	Sink	Single		Yes	Cluster	Yes	No	No	Single	Static
GAALS ^[66]	Hybrid	Collector	Single		Yes	Tree	Yes	Yes	Yes		
WRP ^[67]	Hybrid	Sink	Single	No	Yes	Normal	Yes	Yes	No	Single	Static
SOC-RDC ^[69]	Hybrid	Collector	Multiple	No	Yes	Cluster	Yes	Yes	No	Single	Static
HiCoDG ^[70-71]	Hybrid	Collector	Multiple	Yes	Yes	Cluster	Yes	No	No	Single	Static
EDC-MEs ^[72]	Hybrid	Collector	Multiple	No	Yes	Cluster	Yes	No	No		
LBC ^[73-74]	Hybrid	Collector	Single		Yes	Normal	Yes	No	No	Single	Static
BEDA-SC ^[75]	Hybrid	Collector	Single		Yes	Cluster	Yes	No	No	Single	Static
EDDC ^[76]	Hybrid	Sink	Multiple		No	Tree	Yes	Yes	No	Single	Static
PB-PSA ^[77]	Hybrid	Collector	Single		Yes	Tree	Yes	No	No	Multiple	Static
WerMDG ^[78]	Hybrid	Collector	Single		Yes	Normal	Yes	Yes	Yes		

综合表 1 可知,目前基于随机移动数据收集方式中,一方面没有对节点进行划分、规划,且大多采用多跳传输,这样会消耗大量能量;另一方面在已有的研究中只是提出降低数据收集时延,但对时延的多态性、动态性没有明确的界定,因此这种数据收集方式不能应用于特定时延要求的环境中.究其根本原因是随机移动数据收集方式虽然能最大限度地延长网络生命期,但是由于节点移动的随机性,使得很难对其进行规划.另外很难保证移动元素遍历整个网络,导致数据的丢失,难以保证数据完整性.由于这种方式的种种缺陷,在这方面的研究较少.

综合表 2 可知,固定路径移动数据收集方式中,一方面大多使用单个移动元素,而在实际应用中网络规模一般较大,因此只使用单个移动元素远远不能满足时延需求;另一方面由于基于轨道移动的方法中轨道的铺设等会增加网络成本,而无移动轨道的方法又不可避免环境中障碍物等自然条件的影响,因此这种数据收集方式的研究同样也不够广泛.

综合表 3 可知:

1) 主动数据收集方式基本没有考虑数据融合,也很少有多跳传输,因此其可以很大程度地降低传输能耗.但是主动数据收集模式下,移动元素需要知道传感器节点的位置信息,这就要求移动元素自身装备 GPS 或其他定位设备,无疑增加了硬件开销.

2) 目前动态移动数据收集中的被动数据收集研究较少,主要还是因为能耗问题,节点采集到数据后通过多跳向移动元素转发,造成传输能耗的增加.被动数据收集虽然没能利用动态移动数据收集的优势,但它保证了较小的时延,适用于时效性要求较高的场景.

3) 混合数据收集充分利用了数据融合技术,移动元素只需要访问网络中少数汇聚节点即可完成数据收集,因此能够达到时延和能耗之间的最优化折中.

4) 绝大部分动态移动数据收集方式都需要全局或部分节点的位置信息,从而有利于移动元素即时调整方向,选择最优路径进行数据收集.

通过对以上文献的实验方法进行分析,发现大多数实验场景是在矩形网络中随机分布节点以生成稀疏或稠密的网络,在网络中将节点根据不同的标准,如地理位置等,分成簇状、网格、树状等网络结构.也有部分方法使用圆形实验场景,如[39,45,50]等,还有一些方法要求节点在网络中尽量规则分布,如[34-35]等.各种方法通过设计移动元素不同的移动路径来达到降低数据收集时延和网络能耗的目的.本文对 9 种有代表性的方法进行了对比,对其网络场景大小、传感节点数量、数据收集的时延数据等进行了定量的分析,9 种方法的各个变量值如表 4 所示:

Table 4 Analysis Result of the Time Delay in the Typical Methods

表 4 典型方法时延数据分析结果

Method	Move Mode	Number of Mobile Element	Network Structure	Network Type	Length of Network Area/m	Number of Sensors	Communication Radius/m	Need Location	Move Speed /(m•s ⁻¹)	Deadline/s
DRADG ^[29]	Random	Single	Normal	Sparse	1500	200	50	Yes	1-10	350-400
BSMAST ^[35]	Fixed Path	Single	Grid	Dense	200	300		Yes	4-20	200-450
CTPs ^[40]	Fixed Path	Single	Cluster	Sparse	100-500	100-500	15-50	Yes	1	600-1 200
LPDGMS ^[39]	Fixed Path	Single	Sub-area		500	800-1 200	60	Yes	4-20	10-50
SHA ^[50]	Dynamic	Single	Normal		600	50	70	Yes	1	100-3 500
NADC ^[65]	Dynamic	Single	Cluster	Dense	150	60		Yes		30-80
SOC-RDC ^[69]	Dynamic	Multiple	Cluster		100-350	100	20	Yes	5	10-25
HiCoDG ^[70-71]	Dynamic	Multiple	Cluster	Sparse	2000	32		No	5-30	100-900
LBC ^[73-74]	Dynamic	Single	Normal	Sparse	50-400	50-500	40	No		950-1 200

通过对表 4 的对比分析,可以看出网络中移动元素的数量、节点的密集程度、网络的结构、节点的通信半径、移动元素的移动速度等都会对网络中数据收集时延产生很大的影响,下面将对其进行分别分析.

1) 移动元素数量

当网络区域中只有单个移动元素时,它要负责收集网络中所有节点感知到的数据,因此对其缓存容量、移动速度等都会有一定的要求.若缓存容量过小,则其不能存储网络中节点感知到的所有数据,会

引起数据丢失等现象的产生导致数据不完整,或者是重要数据的丢失.若使用多个移动元素,则可以使每个移动元素只负责部分区域的数据收集,减小了移动元素的移动范围,因此可以取得很好的效果.另外,在使用多个移动元素的方法中网络的扩展性也比较较好,当网络范围扩大时,只需要增加一些移动节点即可.

2) 节点的密集程度

节点比较密集的网络中,节点相互之间可以进行通信,因此可以进行数据转发,这样移动元素只需要访问网络中的部分节点(如汇聚点)即可完成数据收集任务.若网络中节点分布比较稀疏,它们之间的通信受到限制,移动元素需要遍历网络中的每个节点才能完成数据收集,显然其数据收集时延会比较大.

3) 网络的结构类型

若节点只是组成一般的网络,则需要经过多跳或者使移动元素移动到每个节点处才能完成数据收集.若将网络中的节点组成簇状、树状、网格等特殊结构,则可以将数据转发至汇聚节点(簇头、树根、网格中心等节点)缓存起来,等待移动元素经过时交付数据,这样一方面可以大大缩短移动元素的移动路径,有效降低数据收集时延;另一方面可以减少数据的转发,在一定程度上减少网络能耗.

4) 节点的通信半径

在规划移动元素的路径时,只需要使进行数据交付的节点能够和移动元素进行通信即可,因此,若节点的通信半径较大,则可以有效缩短移动路径,降低数据收集时延;若通信半径较小,则移动元素的移动路径要大大增加才能访问每一个需要交付数据的节点.

5) 移动元素的移动速度

若节点移动过慢,则其完成1个周期的数据收集需要较长时间,导致时延增大;若其移动过快,又会导致节点在移动元素通信范围内时不能将其缓存的数据全部交付给移动元素等引起数据丢失等现象的产生.

此外,数据产生速率、数据融合、移动元素在汇聚节点的停靠时间等都会对时延产生影响.而不同的应用对时延的要求也存在很大的差异,因此在实际使用中,应根据实际的需求来选择合适的方法.

5 未来的研究方向

如前几节所述,时延受限的移动式数据收集在

保障网络性能和实际应用中展现出的巨大潜力,得到国内外研究人员广泛的关注.研究人员针对传感网的应用需求和特征进行了大量卓有成效的研究,但由于其关注的网络特性、优化的性能指标、采取的技术手段和具体应用的网络环境各不相同,因而在实际应用中还存在一定的问题和不足.通过对文中列举的方法进行分析,可以总结出该领域未来的研究方向:

1) 考虑同时具有多个不同时延要求的场景

从第3,4节的方法综述及表1~3中可知,已有的移动式数据收集模型对时延的设定多为单个时延.在实际应用中,网络中可能存在多种类型的传感器,比如温度、湿度等,温度数据的时延和湿度数据的时延是不同的,因此在规划移动节点路径时,应该同时满足多种不同时延的限制性条件,该研究问题是不同于传统单个时延的网络场景.

2) 考虑移动元素自身的限制

根据我们第3节中的综述结果,绝大多数时延受限的移动式数据收集策略都假定移动元素自身不受限制,但是在实际情况下,移动元素自身也会受到能量和存储容量等方面的限制.因此在设计移动路径时,如果综合考虑移动元素自身的能量和存储容量的限制,数据收集问题将变得更为复杂同时也更为实际,这将是未来的研究方向之一.

3) 多个移动元素之间进行深度、动态的协作

当网络规模较大时,一般引入多个移动元素.但目前基于多移动元素的数据收集方法大多是将网络分区,在每个子区域中使用1个移动元素,而没有考虑多个元素之间更密切的配合和协作,以进一步降低时延.此外,由于网络的动态性,固定分区负责的方法自适应性和负载均衡性较差.因此对这方面的研究工作较为少见,是未来需要重点关注的研究方向.

4) 考虑复杂多变的网络环境以设计更具容错性的算法

传感网是动态变化的复杂网络,节点和通讯链路存在各种不稳定的因素,容易发生故障及产生错误.因此设计数据收集方法时需要考虑方法的容错性.然而,目前时延受限的移动式数据收集方法大多只考虑平坦的网络环境,没有障碍物及无线噪声的干扰并且网络环境也不会发生变化,这并不适合实际应用情况.因此在以后的研究工作中应该加入对这方面的考虑,以提出更具容错性的数据收集方式.

5) 减少对位置信息的依赖性

在现有的研究中,大多要求节点和移动元素知

道相互的位置,这种方式:①增加了对节点的硬件要求;②节点之间交换位置信息消耗了网络能量,增加了网络负载;③当网络环境发生变化时,节点的位置一般会发生变化,这样就需要节点之间经常交换位置信息,但是频繁的位置信息更新又会增加能耗.因此如何减少移动式数据收集方法对位置信息的依赖成为未来研究方向之一.

6) 与无线充电技术的结合

无线充电技术[78-79]的发展为传感网带来了新的曙光,携带大量能量的移动节点可以移动至固定节点处,除提供传统的数据收集服务外,还可以为其进行充电,从而从源头上为整个网络“注入”能量.由于无线充电也需要耗费时间,因此设计移动路线时不能和之前的研究一样只考虑移动消耗的时间.目前同时考虑数据收集时延限制和移动节点充电的研究甚少,有待进行大量的研究和实验工作.

6 结束语

由于传感网资源有限且与应用高度相关,为解决减少网络能耗和降低数据收集时延之间的矛盾,研究人员做了大量的研究.利用移动节点进行数据收集就是降低网络能耗的热点研究之一,然而由于实际环境因素和硬件条件的约束,目前已有的方法仍然存在局限性.本文综述了传感网中时延受限的移动式数据收集这类方法,对该领域的代表性研究成果进行了分析,结合各种方法的相关属性和性能进行了对比性总结,揭示了目前已有方法在实际应用中仍然存在的问题和不足,展望了未来亟待解决的研究问题.

参 考 文 献

- [1] Liang Junbin, Li Taoshen. A LT-codes-based scheme for improving data persistence in wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50 (7): 1349-1361 (in Chinese)
(梁俊斌, 李陶深. 传感器网络中基于 LT 码的提高数据持续性方案[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(7): 1349-1361)
- [2] Nguyen D N, Krunz M. A cooperative MIMO framework for wireless sensor networks [J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2014, 10(3): Article 43
- [3] Raj R, Babu S, Benson K, et al. Efficient path rescheduling of heterogeneous mobile data collectors for dynamic events in shanty town emergency response [C] //Proc of 2015 IEEE Global Communications Conf (GLOBECOM). Piscataway, NJ: IEEE, 2015
- [4] Zhang Xiaoling, Liang Wei, Yu Haibin, et al. Survey of transmission scheduling methods in wireless sensor networks [J]. Journal on Communications, 2012, 33(5): 143-157 (in Chinese)
(张晓玲, 梁伟, 于海斌, 等. 无线传感器网络传输调度方法综述[J]. 通信学报, 2012, 33(5): 143-157)
- [5] Cao Zhichao, He Yuan, Ma Qiang, et al. L^2 : Lazy forwarding in low-duty-cycle wireless sensor network [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2015, 23(3): 922-930
- [6] Lai Yongxuan, Lin Ziyu. Data gathering in opportunistic wireless sensor networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012 (11): 1319-1322
- [7] Wang Tian, Jia Weijia, Wang Guojun, et al. Hole avoiding in advance routing with hole recovery mechanism in wireless sensor networks [J]. Adhoc & Sensor Wireless Networks, 2012, 16(1/2/3): 191-213
- [8] Liang Junbin, Zou Shaojun, Li Taoshen. Data collection based on orientation angle routing in mobile sensor networks [J]. Science China: Information Sciences, 2015, 45 (1): 111-128 (in Chinese)
(梁俊斌, 邹绍军, 李陶深. 移动传感网中基于定向角度路由的数据收集[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(1): 111-128)
- [9] Wang Tian, Peng Zhen, Chen Yonghong, et al. Continuous tracking for mobile targets with mobility nodes in WSNs [C] //Proc of Int Conf on Smart Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 261-268
- [10] Zhang Xiwei, Dai Haipeng, Xu Lijie, et al. Mobility-assisted data gathering strategies in WSNs [J]. Journal of Software, 2013, 24(2): 198-214 (in Chinese)
(张希伟, 戴海鹏, 徐力杰, 等. 无线传感器网络中移动协助的数据收集策略[J]. 软件学报, 2013, 24(2): 198-214)
- [11] Wu Xiuchao, Brown K N, Sreenan C J. Data pre-forwarding for opportunistic data collection in wireless sensor networks [J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2014, 11(1): Article 8
- [12] Zhao Miao, Gong Dawei, Yang Yuanyuan. Network cost minimization for mobile data gathering in wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Communications, 2015, 63 (11): 4418-4432
- [13] Di Francesco M, Das S K, Anastasi G. Data collection in wireless sensor networks with mobile elements: A survey [J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2011, 8(1): Article 7
- [14] Hou I. Broadcasting delay-constrained traffic over unreliable wireless links with network coding [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2015, 23(3): 728-740
- [15] Song Xin, Wang Cuirong. Linear regression based distributed data gathering optimization strategy for wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(3): 568-580 (in Chinese)
(宋欣, 王翠荣. 基于线性回归的无线传感器网络分布式数据采集优化策略[J]. 计算机学报, 2012, 35(3): 568-580)

- [16] Feng Cheng, Li Zhijun, Jiang Shouxu. Data aggregation scheduling on wireless mobile sensor networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(3): 685-700 (in Chinese)
(冯诚, 李治军, 姜守旭. 无线移动感知网络上的数据聚集传输规划[J]. 计算机学报, 2015, 38(3): 685-700)
- [17] Lai Yongxuan, Xie Jinshan, Lin Ziyu, et al. Adaptive data gathering in mobile sensor networks using speedy mobile elements [J]. Sensors, 2015, 15(9): 23218-23248
- [18] Dong Mianxiong, Ota K, Yang L T, et al. Mobile agent-based energy-aware and user-centric data collection in wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2014, 74: 58-70
- [19] Xing Guoliang, Wang Tian, Xie Zhihui, et al. Rendezvous planning in mobility-assisted wireless sensor networks [C] // Proc of the 28th IEEE Int Real-Time Systems Symp. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 311-320
- [20] Xing Guoliang, Li Minming, Wang Tian, et al. Efficient rendezvous algorithms for mobility-enabled wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2012, 11(1): 47-60
- [21] Xing Guoliang, Wang Tian, Jia Weijia, et al. Rendezvous design algorithms for wireless sensor networks with a mobile base station [C] // Proc of the 9th ACM Int Symp on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM, 2008: 231-240
- [22] Bagaa M, Younis M, Djenouri D, et al. Distributed low-latency data aggregation scheduling in wireless sensor networks [J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2015, 11(3): Article 49
- [23] Lin Hui, Uster H. Exact and heuristic algorithms for data-gathering cluster-based wireless sensor network design problem [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2014, 22(3): 903-916
- [24] Liu Wenjun, Fan Jianxi, Zhang Shukui, et al. Grid-based real-time data gathering protocol in wireless sensor network with mobile sink [C] // Proc of the High Performance Computing and Communications & IEEE Int Conf on Embedded and Ubiquitous Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 857-864
- [25] Duong T, Nguyen T. Fast Markov decision process for data collection in sensor networks [C] // Proc of the 23rd Int Conf on Computer Communication and Networks (ICCCN). Piscataway, NJ: IEEE, 2014
- [26] Jiao Weiwei, Cheng Long, Chen Min, et al. Efficient data delivery in wireless sensor networks with ubiquitous mobile data collectors [C] // Proc of the IEEE/IFIP 8th Int Conf on Embedded and Ubiquitous Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 232-239
- [27] Cha Seunghun, Talipov E, Cha Hojung. Data delivery scheme for intermittently connected mobile sensor networks [J]. Computer Communications, 2013, 36(5): 504-519
- [28] Park S, Lee E, Park H, et al. Strategy for real-time data dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks [C] // Proc of the 21st IEEE Int Symp on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1905-1910
- [29] Lee E, Park S, Oh S, et al. Real-time routing protocol based on expect grids for mobile sinks in wireless sensor networks [C] // Proc of 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Piscataway, NJ: IEEE, 2011
- [30] Feng Yong, Gong Haigang, Fan Mingyu, et al. A distance-aware replica adaptive data gathering protocol for delay tolerant mobile sensor networks [J]. Sensors, 2011, 11(4): 4104-4117
- [31] Alsalih W, Hassanein H, Akl S. Routing to a mobile data collector on a predefined trajectory [C] // Proc of IEEE Int Conf on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 7-11
- [32] Gao Shuai, Zhang Hongke. Optimal path selection for mobile sink in delay-guaranteed sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 742-747 (in Chinese)
(郜帅, 张宏科. 时延受限传感器网络移动 Sink 路径选择方法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(4): 742-747)
- [33] Poe W Y, Beck M, Schmitt J B. Achieving high lifetime and low delay in very large sensors networks using mobile sinks [C] // Proc of the 8th IEEE Int Conf on Distributed Computing in Sensor Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 17-24
- [34] Konstantopoulos C, Pantziou G, Gavalas D, et al. A rendezvous-based approach enabling energy-efficient sensory data collection with mobile sinks [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(5): 809-817
- [35] Kinalis A, Nikolettseas S, Patroumpa D, et al. Biased sink mobility with adaptive stop times for low latency data collection in sensor networks [J]. Information Fusion, 2014, 15(2): 56-63
- [36] Almi'ani K, Viglas A, Libman L. Energy-efficient data gathering with tour length-constrained mobile elements in wireless sensor networks [C] // Proc of the 35th IEEE Conf on Local Computer Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 582-589
- [37] Kumar A K, Sivalingam K M. On reducing delay in mobile data collection based wireless sensor networks [J]. Wireless Networks, 2013, 19(3): 285-299
- [38] Almi'ani K, Viglas A. Mobile element path planning for time-constrained data gathering in wireless sensor networks [C] // Proc of the 24th IEEE Int Conf on Advanced Information Networking and Applications. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 843-850
- [39] Xu Ronghua, Dai Hongjun, Wang Fengyu, et al. A convex hull based optimization to reduce the data delivery latency of the mobile elements in wireless sensor networks [C] // Proc of IEEE Int Conf on Embedded. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 2245-2252

- [40] Chowdhury S, Giri C. Data collection point based mobile data gathering scheme with relay hop constraint [C] //Proc of Int Conf on Communications and Informatics. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 282-287
- [41] Zhu Chuan, Wang Yao, Han Guangjie, et al. A location prediction based data gathering protocol for wireless sensor networks using a mobile sink [G] //Ad-hoc Networks and Wireless, ADHOC-NOW. Berlin: Springer, 2014: 152-164
- [42] Ghaleb M, Subramaniam S, Othman M, et al. Predetermined path of mobile data gathering in wireless sensor networks based on network layout [J/OL]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014, 2014: 51 [2015-11-01]. <http://jwcn.eurasipjournals.com/content/2014/1/51>
- [43] Asmaa E Z, Said R. Efficient data collection in wireless sensor networks using mobile sink [C] //Proc of 2014 Mediterranean on Microwave Symp (MMS 2014). Piscataway, NJ: IEEE, 2014
- [44] Zhang Ruonan, Pan Jianping, Liu Jiajia, et al. A hybrid approach using mobile element and hierarchical clustering for data collection in WSNs [C] //Proc of 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1566-1571
- [45] Somasundara A A, Ramamoorthy A, Srivastava M B. Mobile element scheduling with dynamic deadlines [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2007, 6(4): 395-410
- [46] Lai Yungliang, Jiang J R. A genetic algorithm for data mule path planning in wireless sensor networks [J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2013, 7(1): 413-419
- [47] Zhang Xinming, Zhang Yue, Yan Fan, et al. Interference-based topology control algorithm for delay-constrained mobile ad hoc networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2015, 14(4): 742-754
- [48] Wu Shaoyou, Liu Jingsin. Evolutionary path planning of a data mule in wireless sensor network by using shortcuts [C] //Proc of 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 2708-2715
- [49] Gu Yu, Ji Yusheng, Li Jie, et al. ESWC: Efficient scheduling for the mobile sink in wireless sensor networks with delay constraint [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(7): 1310-1320
- [50] Tashtarian F, Moghaddam M H Y, Sohraby K, et al. ODT: Optimal deadline-based trajectory for mobile sinks in WSN: A decision tree and dynamic programming approach [J]. Computer Networks, 2015, 77(16): 128-143
- [51] Tang Jiqiang, Huang Hongyu, Guo Songtao, et al. Dellat: Delivery latency minimization in wireless sensor networks with mobile sink [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2015, 83: 133-142
- [52] Senturk I F, Akkaya K. Mobile data collector assignment and scheduling for minimizing data delay in partitioned wireless sensor networks [G] //Ad Hoc Networks. Berlin: Springer, 2014: 15-31
- [53] Kim D, Abay B H, Uma R N, et al. Minimizing data collection latency in wireless sensor network with multiple mobile elements [C] //Proc of 2012 IEEE Int Conf on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 504-512
- [54] Kim D, Uma R N, Abay B H, et al. Minimum latency multiple data mule trajectory planning in wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2014, 13(4): 838-851
- [55] Ke Huan, Guo Song, Miyazaki T. Towards latency-aware data acquisition in wireless sensor network [C] //Proc of the 8th IEEE Int Symp on MCSoc. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 82-87
- [56] Alomari A, Aslam N, Phillips W, et al. A scheme for using closest rendezvous points and Mobile Elements for data gathering in wireless sensor networks [C] //Proc of 2014 IFIP Wireless Days. Piscataway, NJ: IEEE, 2014
- [57] Sugihara R, Gupta R K. Optimal speed control of mobile node for data collection in sensor networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2010, 9(1): 127-139
- [58] Yun Youngsang, Xia Ye. Maximizing the lifetime of wireless sensor networks with mobile sink in delay-tolerant applications [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2010, 9(9): 1308-1318
- [59] Yun Youngsang, Xia Ye, Behdani B, et al. Distributed algorithm for lifetime maximization in a delay-tolerant wireless sensor network with a mobile sink [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2013, 12(10): 1920-1930
- [60] Ren Xiaojiang, Liang Weifa. Delay-tolerant data gathering in energy harvesting sensor networks with a mobile sink [C] //Proc of IEEE Global Communications Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 93-99
- [61] Fu Qiao, Krishnamachari B, Zhang Lin. DAWN: A density adaptive routing for deadline-based data collection in vehicular delay tolerant networks [J]. Tsinghua Science and Technology, 2013, 18(3): 230-241
- [62] Xu Zichuan, Liang Weifa, Xu Yinlong. Network lifetime maximization in delay-tolerant sensor networks with a mobile sink [C] //Proc of the 8th IEEE Int Conf on Distributed Computing in Sensor Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 9-16
- [63] He Liang, Pan Jianping, Xu Jingdong. A progressive approach to reducing data collection latency in wireless sensor networks with mobile elements [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2013, 12(7): 1308-1320
- [64] Zhang Xiwei, Zhang Lili. Optimizing energy-latency trade-off in wireless sensor networks with mobile element [C] //Proc of the 16th IEEE Int Conf on Parallel and Distributed Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 534-541
- [65] Rao J, Biswas S. Network-assisted sink navigation for distributed data gathering: Stability and delay-energy trade-offs [J]. Computer Communications, 2010, 33(2): 160-175

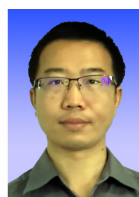
- [66] Romao O C, Santos A G, Mateus G R. Lifetime maximization of hop-and-delay constrained wireless sensor networks with mobile agent [C] //Proc of 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway, NJ: IEEE, 2013; 1083-1090
- [67] Salarian H, Chin K W, Naghdy F. An energy-efficient mobile-sink path selection strategy for wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2014, 63(5): 2407-2419
- [68] Xing Guoliang, Wang Tian, Xie Zhihui, et al. Rendezvous planning in wireless sensor networks with mobile elements [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2008, 7(12): 1430-1443
- [69] Zhang Chun, Shumin F. Exploiting mobility for data collection in wireless sensor networks with delay reduction [C] //Proc of the 30th Chinese Control Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2011; 4952-4956
- [70] Van Le D, Oh H, Yoon S. HiCoDG: A hierarchical data-gathering scheme using cooperative multiple mobile elements [J]. Sensors, 2014, 14(12): 24278-24304
- [71] Van Le D, Oh H, Yoon S. A novel hierarchical cooperative data gathering architecture using multiple mobile elements [C] //Proc of the 6th IEEE Int Conf on Ubiquitous and Future Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2014; 522-527
- [72] Joy N, Kumar S S. Efficient data collection in wireless sensor networks using mobile elements [J]. Journal of Information Technology & Mechanical Engineering, 2014, 1(3): 13-24
- [73] Zhao Miao, Yang Yuanyuan. A framework for mobile data gathering with load balanced clustering and MIMO uploading [C] //Proc of IEEE Int Conf on Computer Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2011; 2759-2767
- [74] Zhao Miao, Yang Yuanyuan, Wang C. Mobile data gathering with load balanced clustering and dual data uploading in wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2015, 14(4): 770-785
- [75] Liu Ruichao, Guo Songtao. Energy-efficient data gathering algorithm with speed control [J]. Application Research of Computers, 2014, 31(3): 860-865 (in Chinese)
(刘瑞超, 郭松涛. 带速度控制的能量高效的数据收集算法 [J]. 计算机应用研究, 2014, 31(3): 860-865)
- [76] Charalampous K, Nikolaos V, Grammati P, et al. Efficient delay-constrained data collection in wireless sensor networks using mobile sinks [C] //Proc of 2015 8th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2015
- [77] Zhao Miao, Yang Yuanyuan. Bounded relay hop mobile data gathering in wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Computers, 2012, 61(2): 265-277

- [78] Guo Songtao, Wang Cong, Yang Yuanyuan. Joint mobile data gathering and energy provisioning in wireless rechargeable sensor networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2014, 13(12): 2836-2852

- [79] Xie Liguang, Shi Yi, Hou Y T, et al. A mobile platform for wireless charging and data collection in sensor networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(8): 1521-1533



Wang Wenhua, born in 1988. Master candidate. Her main research interests include wireless location and mobile computing.



Wang Tian, born in 1982. PhD, associate professor. Senior member of CCF. His main research interests include wireless networks, cloud computing, social network, Internet of things and mobile computing.



Wu Qun, born in 1991. Master candidate. His main research interests include social network and wireless sensor networks.



Wang Guojun, born in 1970. PhD, professor and PhD supervisor. Adjunct professor at Temple University, a visiting scholar at Florida Atlantic University, and research fellow at the Hong Kong Polytechnic University. Distinguished member of CCF, and member of the IEEE, ACM, and IEICE. His main research interests include network and information security, Internet of things and cloud computing.



Jia Weijia, born in 1957. PhD, professor and PhD supervisor. Senior member of the IEEE and member of the ACM and CCF. His main research interests include next generation wireless communication, protocols, heterogeneous networks.