

移动低占空比无线传感网中数据收集的研究进展

梁俊斌¹ 周翔¹ 王田² 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 福建 厦门 362021)²

摘要 移动低占空比无线传感网(Mobile Low-duty-cycle Wireless Sensor Networks, MLDC-WSN)是一种新型的传感器网络,它能克服传统无线传感网络(WSN)中仅考虑静态网络、网络能耗大等问题。但是,MLDC-WSN的新特性给数据收集应用带来了新的挑战,例如:移动性会导致网络拓扑结构不断改变,造成网络连通性不稳定;节点的苏醒时间短,造成通信延迟大。针对 MLDC-WSN 中数据收集的研究现状进行了分析和对比,分别从节点移动性管理、节点睡眠调度、数据收集协议等 3 个方面进行了综述。此外,还总结了该领域中待解决的重要科学问题,并对未来的研究方向进行了展望。

关键词 移动低占空比无线传感网,数据收集,移动性管理,睡眠调度

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.04.003

Research Progress on Data Collection in Mobile Low-duty-cycle Wireless Sensor Networks

LIANG Jun-bin¹ ZHOU Xiang¹ WANG Tian² LI Tao-shen¹

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

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

Abstract Mobile low-duty-cycle wireless sensor networks (MLDC-WSN) are a kind of new sensor networks appearing in recent years, which can overcome the drawbacks of large energy consumption in traditional static wireless sensor networks (WSN). However, new features of MLDC-WSN bring new challenges to data collection applications. For instances, mobility will cause network topology to change constantly, which will make the network connectivity become unstable. The nodes in the network only wake up for a small proportion of time, which will increase the communication latency. This paper analyzed and summarized research progress on data collection in MLDC-WSN, and gave in-depth analysis on three main aspects of existing works: mobility management of nodes, sleep scheduling of nodes, and data collection protocols in the networks. In addition, it pointed out several important scientific problems in this field, and discussed future research directions.

Keywords Mobile low-duty-cycle wireless sensor networks, Data collection, Mobile management, Sleep scheduling

1 前言

移动低占空比无线传感网是近年出现的一种新型自组织网络。它与传统的无线传感网络(Wireless Sensor Networks, WSN)一样,由大量能量、通信范围、存储容量和计算能力均有限的节点组成^[1-3],主要部署在人类无法进入的恶劣环境中,承担长期的监测或跟踪任务^[4-8]。但是,它与 WSN 存在明显的区别:网络中的节点不仅可以移动,而且会长时间进入睡眠状态以保存能量,从而延长生命周期(即低占空比)^[9-11]。

在 MLDC-WSN 中,任意时刻均会有大量节点处于睡眠

状态,因此数据传输时,发送节点不得不花费大量时间来等待接收节点的唤醒,从而造成严重的延迟^[12-15]。此外,节点的移动性也会导致网络拓扑不断改变,网络经常处于断裂状态,很难建立稳定的数据收集路由。传统的 WSN 数据收集方案并没有考虑以上因素的影响,因此很难应用于 MLDC-WSN 中。

数据收集是传感器网络中最基础和最重要的工作之一,它的目标是在尽可能短的时间内采集到网络中所有节点感知的数据^[16-20],使得用户可以对监测目标进行及时分析和处理。此外,数据收集应该尽可能少地消耗网络中节点的能量,使得节点可以工作更长的时间,延长网络的生命周期。

到稿日期:2017-01-15 返修日期:2017-04-03 本文受国家自然科学基金(61562005, 61572206, 61363067),广西自然科学基金(2015GXNSFAA139286),2015年广西高校科学技术研究项目(KY2015YB486)资助。

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,E-mail:liangjb2002@163.com;周翔(1995—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:feixiang11010@qq.com(通信作者);王田(1982—),男,博士,副教授,主要研究方向为物联网、云计算,E-mail:wangtian@hqu.edu.cn;李陶深(1957—),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,E-mail:tshli@gxu.edu.cn。

目前,有关 MLDC-WSN 中数据收集的研究还比较少。但是,近年来越来越多的研究者开始关注该问题,并提出了一些针对节点移动和睡眠所带来的高延迟、高能耗问题的解决方案。文中将对这些方案进行归纳和总结,分析相关工作的优点和缺点,明确当前的研究进展和存在的问题,并指明下一步的研究方向。

2 相关工作及对比分析

2.1 基本概念

定义 1(数据收集^[16]) 数据收集是指移动 Sink 收集到网络中全部节点的数据的过程。其中,移动 Sink 是网络中一个特殊的节点,一般认为其拥有无限的电源供应和充足的存储空间,主要负责采集全网的数据,然后发送给用户进行处理。

定义 2(工作周期^[1]) 工作周期是指一个固定长度的时间间隔 T ,在该时间间隔内,网络可以完成一次数据收集。本文所研究的数据收集是周期性的数据收集,即网络会按工作周期持续而且循环地进行数据收集操作,直至网络中有节点因耗尽能量而死亡。

定义 3(占空比^[3]) 占空比是指节点苏醒的工作时间 t 与其工作周期 T 的比值,即 $\tau = t/T$ 。其中,低占空比一般是指占空比 τ 的值低于 10%,而全占空比是指占空比 τ 的值等于 1。

定义 4(移动低占空比无线传感网^[17]) 移动低占空比无线传感网是一种节点和 Sink 均可以移动,且节点采用低占空比工作模式的网络,即节点大部分时间处于睡眠状态,只有少量时间苏醒而处于工作状态。

定义 5(多跳传输^[10]) 多跳传输指由于节点的通信半径有限,当一个节点 a 希望向远处的另一个节点 b 发送数据时,必须通过其他节点进行中继,以多跳的方式进行数据传输。

定义 6(空闲侦听^[11]) 传感器节点接收相邻节点所发送的数据时,由于无从得知发送的时间,导致传感器节点的通信模块处于持续侦听状态,使得大量的能源消耗在无效的侦听上。

定义 7(网络生命周期^[13]) 网络生命周期是指网络部署后,从开始工作到出现第一个节点能量耗尽而死亡的时间间隔。

定义 8(移动性管理^[21]) MLDC-WSN 中对 Sink 和节点的移动路径进行规划,使得 Sink 能访问到全网的每一个节点,从而收集到全网的数据。

定义 9(睡眠调度^[14]) MLDC-WSN 中的睡眠调度指的是,规划处于低占空比工作模式节点的睡眠苏醒时间,即节点在一个工作周期中何时进入睡眠状态而保存能量,何时苏醒而进行数据发送。

定义 10(缓存节点^[16]) 缓存节点指位于 Sink 行走路径附近的节点,且该节点存储有距 Sink 行走路径较远的节点的数据。

2.2 相关工作进展

传统 WSN 中的数据收集主要考虑静态网络,即网络部署后节点是静止的。此外,网络中的节点一直保持工作状态,不会进入睡眠状态,如图 1(a)所示。

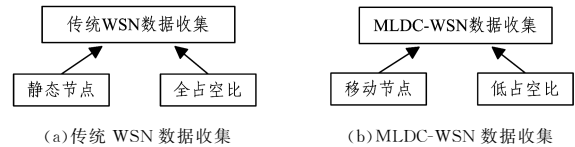


图 1 不同 WSN 的数据收集

Fig. 1 Data collection in different WSNs

MLDC-WSN 中的数据收集考虑的是移动网络,即网络部署后节点和 Sink 是移动的。此外,网络中的节点处于极低工作周期状态,即网络处于低占空比状态,如图 1(b)所示。

从图 1 可以看到,MLDC-WSN 与传统 WSN 最大的区别是,它拥有节点的移动性、低占空比的工作模式,以及相应的数据收集方法。因此,传统 WSN 的数据收集方法很难应用于 MLDC-WSN。近年来,研究者们已经对 MLDC-WSN 中的数据收集开展了一定工作,且取得了阶段性的进展。其中,针对节点移动性的研究被称为节点移动性管理,低占空比工作模式则侧重于调度网络中节点的睡眠时间,而数据收集是基于节点移动性和低占空比工作模式的新方法。接下来将分别对节点移动性管理、节点睡眠调度、数据收集协议等 3 个方面的研究进展进行综述。

2.3 节点移动性管理

节点移动管理的主要工作是规划移动节点和 Sink 的路径,使得 Sink 可以快速访问网络中的每个节点,从而能够以较低的延迟和能耗来收集全网的数据。由于节点在不断移动,使得网络中数据的传输面临两方面的困难:

1) 每个节点的邻居集合不断发生变化,且邻居的位置也在不断变化,使得下一跳中继节点难以选择。

2) 网络的连通性不稳定,在部分时刻可能发生断裂,使得网络中的通信难以进行。

因此,需要研究能解决以上困难的路径规划算法,以低能耗、低延迟实现可靠的数据收集。

2009 年,Kinalis 等人^[21]针对 Sink 的移动路径规划进行了研究,提出了以自适应停留时间访问网络的协议 MSAST。首先,将整个网络区域划分成若干大小相等的正方形区域。然后,移动 Sink 沿着划分好的正方形网络区域的边界行走,到达另一端网络边界后再转回反方向行走。移动 Sink 所行走的路径能够保证其与网络中的所有节点至少进行一次直接通信,这样就保证了所有节点能够以单跳的方式访问到移动 Sink。MSAST 协议可以保证访问到全网的节点,而且所有节点只发送一次数据就能完成数据传输,使节点的能量消耗最小化。但是,移动 Sink 需要访问网络中的每个节点,移动路径较长,延迟较大。

为了弥补^[21]移动路径较长的不足,Konstantopoulos 等人^[22]于 2012 年提出了一个分布式的多跳数据收集协议 BREEDG。首先,借鉴划分簇的思想,将靠近移动 Sink 行走路径的节点分配到一个面积较小的簇中,将距离移动 Sink 行走路径较远的节点分配到一个面积较大的簇中。然后,选取能量充足且靠近移动 Sink 行走路径的节点作为缓存节点。簇头将收集簇内的数据并发送到最近的缓存节点。最后,缓存节点将在移动 Sink 经过时进行数据传送。

2013年, Ma等人^[23]提出了基于区域覆盖的数据收集协议TPDG,与文献[22]相比,其能够减少移动Sink行走路径的长度,有效降低延迟。首先,在节点和Sink部署到网络后,移动Sink立即通过发送“Hello”消息来收集网络中所有节点的位置;然后,根据所收集到的位置信息,结合节点的通信半径,利用动态规划的方法找出一个能覆盖全网的位置集合。移动Sink只需要定期访问这些位置,即可收集到所有节点感知到的数据。由于节点保持静止,收集全网节点位置只需要进行一次,因此节点能耗负担较小。TPDG具有较低的延迟,但是需要全部节点的位置信息,这要求每个节点加装GPS等定位装置,增加了网络的成本。

文献[22-23]都提出了划区域分簇思想,但是没有考虑簇头的选择问题,网络中簇头节点能量消耗较大,会迅速耗尽能量而死亡,缩短了网络的生命周期。2014年,Zhao等人^[24]提出了一个基于负载均衡簇结构的分布式协议LBCDDU。首先,网络中的节点采用分布式的竞争方法决定自己是否成为簇头,剩余能量高的节点将拥有更大的概率成为簇头。每个簇中可以含有多个簇头,而在每个节点的通信范围内至少有一个簇头。然后,簇内的节点将动态选择能量水平高的簇头接收数据。当移动Sink进入簇时,多个簇头将自己收集到的数据数量信息发送给移动Sink,移动Sink则根据这些信息来决定停留位置并进行数据收集。

LBCDDU协议考虑了簇结构的能量均衡,度量的指标是节点剩余的能量,但是它没有考虑网络的链路质量,可能造成传输失败率较高。2016年,Guo等人^[25]提出了MLDC-WSN中的一个数据发送协议DaGCM,它在移动数据收集时会考虑动态无线链路质量。DaGCM协议允许多个移动节点同时向移动Sink发送数据,同时节点会监听网络链路质量,在弹性链路质量下确定传输功率,用局部优化的方法来解决数据收集延迟最小化问题。DaGCM协议中,由于节点监听网络链路质量需要消耗额外的能量,因此网络平均能耗较大。

表1对以上协议的相关属性及其性能进行了总结。

表1 MLDC-WSN中移动性管理算法的对比

Table 1 Contrast about mobility management algorithms in MLDC-WSN

协议	Sink访问 每一个节点	平均 能耗	访问 延迟	Sink 移动路径	网络 生命周期
MSAST	是	较小	较大	较长	较短
BREEDG	否	较小	较大	较短	较短
TPDG	否	较大	较小	短	较长
LBCDDU	否	较小	较大	较短	较长
DaGCM	否	较大	较小	较短	较短

根据上述内容及表1中的数据可以看出,MLDC-WSN中节点移动性管理的现有研究工作中,针对节点移动的网络的研究还比较少,网络的平均能耗和访问延迟很难同时达到最优。MSAST协议中由于Sink需要访问每一个节点,节点通过单跳将数据发送给Sink,因此网络的平均能耗较小,但Sink移动路径较长,访问节点延迟较大。DaGCM协议针对节点及Sink均移动的网络,由于节点移动的速度远小于节点间通信的速度,Sink访问节点的延迟会增大,因此DaGCM协议采用局部优化的方法来规避这种延迟。其他协议均针对节

点静止而Sink移动的网络,BREEDG协议和LBCDDU协议都能取得较小的网络能耗,其中前者网络中Sink移动路径较短,后者网络的能量负载较为均衡,但两种协议的节点访问延迟都较大。TPDG协议能取得较小的节点访问延迟,但其代价是需要为节点加装GPS装置,导致网络成本较高。

2.4 节点睡眠调度

节点睡眠调度的主要工作是规划节点的睡眠及苏醒时刻,使得当Sink访问到每个节点时,节点都能处于苏醒状态,降低因等待节点苏醒而产生的数据收集延迟。在MLDC-WSN中,节点的睡眠调度主要面临3方面的困难:

1)由于Sink和节点均在网络中移动,Sink何时移动到节点的通信范围内具有不确定性。

2)节点处于低占空比工作模式,节点处于苏醒状态的时间片很短,使得Sink很容易错过节点的苏醒时间片。

3)网络中节点的移动会导致节点在网络中分布不均匀,节点密集的区域,收集的数据高度相关和冗余;节点稀疏的区域,Sink逗留的时间短,可能错过节点的苏醒时间片。

因此需要研究可解决以上3方面困难的节点睡眠调度算法,使Sink以低延迟访问到网络中的所有节点,从而完成数据收集工作。

2010年,Jiao等人^[26]基于随机睡眠调度提出了一个最小化延迟的睡眠调度算法DCA-MLBS。随机睡眠调度,是指网络中的节点随机地进入睡眠和苏醒状态。在DCA-MLBS算法中,节点处于睡眠状态还是苏醒状态完全取决于随机数发生器。网络中的每个节点会自主产生一个随机数 α ,然后将这个随机数与一个既定的阈值 β 进行比较,若 $\alpha < \beta$,则节点苏醒,否则节点进入睡眠状态。DCA-MLBS算法的难点在于阈值 β 的选取, β 值太大将导致大量节点苏醒进行数据的转发和空闲侦听; β 值太小则会导致苏醒的节点数量少,不足以均匀覆盖网络范围。当节点广播时,苏醒的节点承担着转发的任务,直到节点的数据被Sink收到。DCA-MLBS算法的优点是算法简单,易于实现;缺点是选取不同的网络阈值 β 比较困难,以及由于节点在选择进入苏醒和睡眠状态时没有考虑网络中Sink的位置,可能导致数据传输距离较远,从而造成数据收集的延迟较大。

2012年,Cao等人^[27]提出了一个多流水线调度策略RMS。流水线睡眠调度,是指将网络中的节点划分为一条条的流水线,流水线上的节点按顺序依次进入苏醒状态。在单流水线的调度方式中,如果一个节点因为网络链路质量问题而发生数据传输失败,则需要等待下一个周期,在邻居接收节点再次醒来后才能再次将数据发送出去。RMS的思想是每个节点位于多条流水线中,如果其中一条流水线在之前的转发中出现了失败,那么节点将会在多条流水线中选择其他的流水线来及时将数据发送出去。RMS能减小因其他节点转发失败对后续节点产生的影响,降低节点的数据收集延迟。由于节点位于多条流水线中,在苏醒时刻需要监听多条流水线的网络动态,如传输失败等情况,因此需要消耗较多的能量。图2给出一个示例,节点A处于多条流水线中,如果节点A在向节点B发送数据包时发生了失败,则仍可在节点D的苏醒时刻将数据包发送出去。

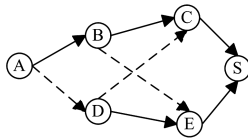


图2 一个RMS策略示例

Fig. 2 A sample of RMS strategies

2014年, Zhu等人^[28]提出了一个基于邻居节点地理路由信息的睡眠调度算法GSS。在GSS算法中, 每个节点根据网络中邻居节点的信息决定自身的睡眠和苏醒状态。首先获取每个节点 u 的地理位置 g_u , 并将节点 u 距离Sink最近的邻居进行标识; 然后将网络中的所有节点放入一个随机排序, 得到节点 u 的排序 $rank_u$, 并计算出节点 u 当前苏醒的邻居节点中排序小于 $rank_u$ 的子集 C_u 。节点 u 必须保证3个条件才能进入睡眠状态: 1) C_u 中的所有节点是连通的; 2) 节点 u 的每个邻居有至少 k 个苏醒的邻居在子集 C_u 中; 3) 节点 u 不是其他节点标识的离Sink最近的节点。GSS算法由于能保证节点周围存在 k 个苏醒的节点, 因此能在一定程度上保证节点数据传输的成功率。但是, 由于网络拓扑不断变化, 因此很难找到最优的 k 值。

表2直观地比较了几种MLDC-WSN中的节点睡眠调度算法的调度方式、平均能耗、传输延迟及它们的优缺点。

表2 MLDC-WSN中节点睡眠调度算法的对比

Table 2 Contrast about nodes sleep scheduling algorithms in MLDC-WSN

算法	调度方式	平均能耗	传输延迟	优点	缺点
DCA-MLBS	随机调度	较低	较大	算法简单 易于实现	数据传输 易中断
RMS	流水线调度	较高	较小	传输失败 容忍率高	节点侦听 能耗较大
GSS	基于节点 位置调度	较低	较小	数据传输 成功率高	难选取 最优 k 值

从表2中的数据可以看到, 针对MLDC-WSN中节点睡眠调度的研究工作还比较少, 主要是因为该种网络节点处于低占空比工作模式的同时, 网络中节点和Sink还在移动, 一般的睡眠调度算法很难保证在Sink移动到节点周围时, 节点正好处于苏醒状态; 同时, 节点睡眠调度算法也要考虑网络平均能耗和传输延迟的均衡问题。随机调度算法能取得较低的平均能耗, 但是传输延迟往往较大; 而流水线调度则正好相反; 相对而言, 基于节点位置的调度策略能取得较好的能耗、延迟均衡化, 但其难点在于网络难以选取最优的 k 值。

2.5 数据收集协议

有了MLDC-WSN中对节点与Sink的移动路径规划, 以及网络中节点睡眠及苏醒时刻的调度算法以后, 需要将网络中节点感知的数据发送给Sink, 即进行数据收集工作。在MLDC-WSN中, 由于节点和Sink会在网络中移动, 节点处于低占空比工作模式, 因此节点如何发现邻居以及如何将数据发送出去是数据收集工作的难题。

2014年, 陈良银等人^[29]提出了一种节点邻居发现算法CTQ。它的实现过程是, 利用节点的工作周期长度 T , 构建一个 $T=2h \times h$ 的矩阵, 并任选矩阵一列 c 的所有元素, 再任选第 r ($0 \leq r \leq h-1$)行, 从该行的第 c 列元素后再连续选择 h 个

元素作为节点的苏醒时间片(图3中深色部分), 如果第 c 列后的元素个数不足 h , 则采用循环包裹原理从第 r 行的第0列继续选取。因此, 任意两个一直处于物理连接状态的邻居节点在给定时限 $T=2h \times h$ 个连续时隙内, 一定可以相互发现。图3给出一个CTQ算法示例, 网络中节点的工作周期为18, 用CTQ算法构建两个节点的睡眠时刻, 能保证两个节点在时刻9同时苏醒, 因此两个节点在处于通信范围的前提下, 必然能够相互发现, 从而进行数据通信。

12	13	14	15	16	17	12	13	14	15	16	17
6	7	8	9	10	11	6	7	8	9	10	11
0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5

图3 一个CTQ算法示例

Fig. 3 A sample of CTQ algorithm

在获取了可靠的邻居信息后, 网络就能分布式地开展数据收集。Zhu等人^[28]于2014年研究了如何在MLDC-WSN中进行数据收集, 提出了基于地理距离的 k 邻居节点连通地理路由协议GCKN。GCKN协议决定节点在苏醒时刻是否进行数据发送, 以及确定数据发送的地理路由路径。首先, 每个节点发送探测消息, 要求处于苏醒状态的邻居返回确认信息, 当节点收到的确认数达到 k 时, 节点进入数据传输模式, 此时节点和Sink先将自己的地理位置广播给邻居节点, 通过对比, 每个节点对离Sink更近的邻居节点进行标识; 然后, 节点采用地理路由来进行数据传输。该算法只需要等待 k 个邻居醒来即可进行数据传输, 避免长时间等待邻居转发节点的苏醒, 同时有充足的邻居节点可供选择以进行转发, 避免了陷入局部空洞(即无下一跳节点可以选择)。但是, k 值的选择需要考虑网络密度、节点工作周期等多个因素, 很难找到最优值。

CTQ算法的优点在于能在限定的时限内确保两个邻居相互发现, 但是快速发现的概率较低。针对该问题, Huang等人^[30]于2015年提出了一个高效的邻居发现算法EasiND, 该算法能在只消耗少量能量的同时, 快速发现邻居。EasiND算法本质上建立了一个异步邻居发现系统, 包含一组信号调度序列和信道扫描序列, 它能在多信道通信场景中限定发现延迟, 快速发现邻居, 并实现延迟能耗的最优化。

为了保证相互发现的邻居之间能稳定地通信, Abdul Razaque等人^[31]于2015年研究了如何保证MLDC-WSN中数据收集的点对点传输, 提出了一个混合传输协议BN-MAC。BN-MAC协议能提供能量高效的点对点传输, 实现过程分为4个阶段: 1) 选取一跳范围内的邻居节点, 并且为它们分配位置; 2) 一跳范围内的区域通信; 3) 内部同步通信; 4) 选取边界节点加入其中。BN-MAC协议通过使用ILC模型消除了空闲监听, 从而为网络节省了相当大的能耗。

BN-MAC协议只能保证两个节点在苏醒时能进行稳定的数据收发, 在MLDC-WSN中, 节点同时处于苏醒的概率较低。为此, Chen等人^[32]于2016年提出了一个低延迟的主动式邻居节点通信算法Group-based Discovery, 该算法中节点积极地将它们现有邻居的睡眠调度时刻分享给新发现的邻居节点, 这样新发现的节点就能快速地获得周围节点的苏醒时

刻表,从而在其邻居节点的苏醒时刻主动苏醒并与之进行数据的传递。Group-based Discovery 算法的前提是节点在相互发现后需要获取邻居节点的睡眠时刻表,为下一步发现新邻居做准备。

表3对本节的算法协议进行了总结。

表3 数据收集的相关协议

Table 3 Related protocol about data collection

协议	主要思想	优点	缺点
CTQ	构造节点的占空比矩阵,选取苏醒节点	限定时限发现邻居	快速发现概率较低
EasiND	建立信道扫描序列,在多信道场景限定发现延迟	可以快速发现邻居	扫描信道能耗较大
Group-based Discovery	节点将现有邻居睡眠调度时刻共享给新发现的邻居	快速发现邻居能耗较低	发现全部概率较低
GCKN	节点收到的确认数到达 k 时,进入数据传输模式	转发节点充足避免局部空洞	很难找到最优 k 值
BN-MAC	分阶段的混合MAC协议	节省能耗	适用场景较为单一

根据表3总结的信息可以看到,现有的关于MLDC-WSN中的数据收集协议中,大部分协议的研究重点是局域范围内节点间的发现及数据传输;针对全网数据收集方法的研究还较少。

3 待解决的问题及未来的研究方向

MLDC-WSN中针对数据收集的研究虽然已经取得了一些进展,但是仍然存在一些亟待解决的问题。下面将对这些问题进行总结,并展望未来的研究方向。

(1)如何快速地发现所有邻居节点

MLDC-WSN中,节点的邻居发现存在如下新的特点:1)节点处于低占空比工作模式,使得距离在一跳范围内的两个邻居节点无法立刻相互发现。这是因为节点苏醒时间较短,相邻两个节点被动地按唤醒时刻表苏醒,很难同时处于苏醒状态。此外,同时处于苏醒状态的节点的时钟也可能不同步,而邻居发现要求节点同时处于苏醒状态,因此快速地发现邻居变得困难。2)节点在网络中移动,使得前一时刻相邻的两个节点可能在下一时刻相距较远,网络拓扑结构的不断变化导致邻居集合变化较大,发现所有的邻居需要更多的时间。因此,需要研究一个新的协议来快速地发现所有邻居节点。

在未来,可主要从如下两个方向进行研究:1)基于节点主动式苏醒的邻居发现。研究如何使节点在睡眠苏醒调度表中的睡眠时刻主动苏醒,与正处于苏醒的节点进行邻居发现,以达到快速发现邻居的目的。2)节点移动预测机制。动态性地结合网络中节点的移动模型,研究如何预测节点的邻居在下一时刻的移动范围,从而有选择地进行下一时刻的邻居发现,实现快速发现所有邻居节点的目的。

(2)能耗和时延的均衡

在MLDC-WSN中,节点会在唤醒时移动,这样会耗费大量的能量。此外,节点的移动会导致网络拓扑不断变化,数据传输的路径选择更为困难,增加了节点的数据传送到Sink的延迟。因此,需要设计新的方案来降低网络中节点的能耗和数据收集延迟。

但是,能耗和时延往往相互制约,主要表现在:1)网络中

节点处于低占空比工作模式,降低了用于空闲侦听的能耗;2)低占空比工作模式下,任意时刻均有大量节点处于睡眠状态,数据发送节点必须长时间地等待接收节点的唤醒,导致数据收集的延迟增大。现有的算法协议往往是牺牲能耗或时延这两个度量值中的一个,来实现另一个度量值的优化。因此,需要研究一种能耗时延均衡策略,实现MLDC-WSN中低延迟、低能耗的数据收集。

在未来,可以主要研究:结合节点移动模型调度节点的睡眠/唤醒时刻的策略。在进行节点睡眠调度的同时兼顾节点的移动模型,利用已知的节点移动决策信息,动态地调整节点的睡眠调度方案,实现能耗和时延的均衡。

(3)移动决策的动态调整

在MLDC-WSN中,节点的移动会导致节点负载不均衡。节点的移动可能会使得它到Sink的距离更远,导致节点必须通过多跳转发才能将数据传送到Sink。此外,节点在网络中移动后,容易导致网络中节点分布不均匀。因此,部分区域的节点可能需要承担过多的转发任务(负载),导致因能量耗费过快而过早死亡,缩短网络的生命周期。因此,需要动态地调整节点的移动决策,使得节点均匀地分布在网络区域中,减少数据的转发跳数并均衡节点的负载,延长网络的生命周期。

针对上述问题,未来可以研究的方向如下:1)移动决策的动态调整。结合实际网络拓扑与应用对网络的要求,动态地调整移动决策,实现网络中节点的均匀分布。2)节点最佳候选移动位置的选择。结合节点的位置信息与节点自身剩余的能量及存储空间等信息,规划节点的最佳候选移动位置,实现网络中节点负载的均衡。

(4)Sink行走路径及缓存节点的选择

MLDC-WSN中,Sink行走路径及缓存节点的选择存在如下新的特点:1)节点处于低占空比工作模式,Sink行走节点附近时,需要等待睡眠的节点苏醒后才能进行数据收集工作。因此,需要结合节点的睡眠时刻表制定Sink的行走路径,使得Sink优先行走至正处于苏醒的节点周围来收集数据。2)由于节点的移动,Sink行走路径周围的节点在不断变化,远离Sink行走路径的节点需要合适的转发节点才能将数据传输到Sink节点。因此,需要结合节点的移动模式来选择合适的Sink行走路径上的节点作为缓存节点。远处的节点将自己的数据传送给缓存节点,使得Sink在行走至缓存节点附近时,能收集到这些节点的数据。

针对该问题,未来可从以下方向展开研究:Sink行走路径上节点集合的划分和子集映射;如何将大规模网络问题划分为子集合问题,同时考虑小规模区域Sink访问不到节点的问题;如何在子集合问题中选取缓存节点,作为一个子集映射。

结束语 本文综述了MLDC-WSN中数据收集的研究进展。相比传统的WSN,MLDC-WSN具有移动性、低占空比等新特性,为数据收集应用带来了新的难点问题,引起了研究者的重点关注。本文对MLDC-WSN中的3个重要研究问题即移动性管理、睡眠调度、数据收集协议进行了归纳和总结,分析和对比了当前具有代表性的研究成果。可以看到,现有的工作还处于起步阶段,尽管已经取得了一定的进展,但是还

存在诸多不足。本文进一步提出了 MLDC-WSN 中数据收集研究的 4 个待解决的科学问题:如何快速发现所有邻居节点,能耗和时延的均衡,移动决策的动态调整,Sink 行走路径及缓存节点的选择。同时对每个问题存在的原因进行了分析,并展望了下一步的研究方向。

参 考 文 献

- [1] PAZZI R W, BOUKERCHE A, DE GRANDE R E, et al. A clustered trail-based data dissemination protocol for improving the lifetime of duty cycle enabled wireless sensor networks[J]. *Wireless Networks*, 2017, 23(1):177-192.
- [2] ROSEN S, LUO H, CHEN Q A, et al. Discovering fine-grained RRC state dynamics and performance impacts in cellular networks[C]// *Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. ACM, 2014:177-188.
- [3] CHENG L, GU Y, HE T, et al. Dynamic switching-based reliable flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the 32nd IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2013:1393-1401.
- [4] GUTIÉRREZ J, VILLA-MEDINA J F, NIETO-GARIBAY A, et al. Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(1):166-176.
- [5] THOTAHEWA K M S, KHAN J Y, YUCE M R. Power efficient ultra wide band based wireless body area networks with narrowband feedback path[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 13(8):1829-1842.
- [6] MAGNO M, POPOVICI E, BRAVIN A, et al. Low-power wireless accelerometer-based system for wear detection of bandsaw blades[C]// *IEEE International Conference on Industrial Informatics*. IEEE, 2013:630-635.
- [7] ZHANG D, LI G, ZHENG K, et al. An energy-balanced routing method based on forward-aware factor for wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(1):766-773.
- [8] TAO D, JIN L, WANG Y, et al. Rank preserving discriminant analysis for human behavior recognition on wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(1):813-823.
- [9] CHENG L, NIU J, GU Y, et al. Energy-efficient statistical delay guarantee for duty-cycled wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the 12th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking*. IEEE, 2015:46-54.
- [10] CAO Z, HE Y, LIU Y. L2: Lazy forwarding in low duty cycle wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the 31st IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2012:1323-1331.
- [11] GU Y, HE T, LIN M, et al. Spatiotemporal delay control for low-duty-cycle sensor networks[C]// *Proceedings of the 30th IEEE Conference on Real-Time Systems Symposium*. IEEE, 2009:127-137.
- [12] HAN K, LIU Y, LUO J. Duty-cycle-aware minimum-energy multicasting in wireless sensor networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 2013, 21(3):910-923.
- [13] GUO S, HE L, GU Y, et al. Opportunistic flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2014, 63(11):2787-2802.
- [14] GU Y, HE T. Data forwarding in extremely low duty-cycle sensor networks with unreliable communication links[C]// *Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. ACM, 2007:321-334.
- [15] XIONG S, LI J, LI M, et al. Multiple task scheduling for low-duty-cycled wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2011:1323-1331.
- [16] ZHAO M, YANG Y. Optimization-based distributed algorithms for mobile data gathering in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(10):1464-1477.
- [17] KIM D, ABAY B H, UMA R N, et al. Minimizing data collection latency in wireless sensor network with multiple mobile elements[C]// *Proceedings of the 31st IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2012:504-512.
- [18] GUO S, WANG C, YANG Y. Mobile data gathering with wireless energy replenishment in rechargeable sensor networks[C]// *Proceedings of the 32nd IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2013:1932-1940.
- [19] GUO L, BEYAH R, LI Y. SMITE: A stochastic compressive data collection protocol for mobile wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2011:1611-1619.
- [20] LUO S, MAO X, SUN Y, et al. Delay minimum data collection in the low-duty-cycle wireless sensor networks[C]// *Proceedings of IEEE Global Communications Conference*. IEEE, 2012:232-237.
- [21] KINALIS A, NIKOLETSEAS S, PATROUMPA D, et al. Biased sink mobility with adaptive stop times for low latency data collection in sensor networks[J]. *Information Fusion*, 2014, 15:56-63.
- [22] KONSTANTOPOULOS C, PANTZIOU G, GAVALAS D, et al. A rendezvous-based approach enabling energy-efficient sensory data collection with mobile sinks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 23(5):809-817.
- [23] MA M, YANG Y, ZHAO M. Tour planning for mobile data-gathering mechanisms in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(4):1472-1483.
- [24] ZHAO M, YANG Y, WANG C. Mobile data gathering with load balanced clustering and dual data uploading in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015, 14(4):770-785.
- [25] GUO S, YANG Y, WANG C. DaGCM: a concurrent data uploading framework for mobile data gathering in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2016, 15(3):610-626.
- [26] JIAO X, LOU W, MA J, et al. Duty-cycle-aware minimum latency broadcast scheduling in multi-hop wireless networks[C]// *Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*. IEEE, 2010:754-763.

- Neural Information Processing Systems, 2014;855-863.
- [18] QI Y, ATALLAH M J. Efficient Privacy-Preserving k-Nearest Neighbor Search[C]// International Conference on Distributed Computing Systems. IEEE, 2008;311-319.
- [19] ZHAN J Z, CHANG L W, MATWIN S. Privacy preserving k-nearest neighbor classification[J]. IJ Network Security, 2005, 1(1):46-51.
- [20] KUMAR P, SINGH M D, SAXENA A. HEMIN: A cryptographic approach for private k-NN classification[C]// International Conference on Data Mining. Las Vegas, USA, 2008;500-505.
- [21] ZHU J. A New Scheme to Privacy-Preserving Collaborative Data Mining[C]// International Conference on Information Assurance and Security. IEEE, 2009;468-471.
- [22] UTSUNOMIYA Y, TOYODA K, SASASE I. LPCQP: Lightweight Private Circular Query Protocol with Divided POI-table and Somewhat Homomorphic Encryption for Privacy-Preserving k-NN Search [J]. Journal of Information Processing, 2016, 24(1):109-122.
- [23] BREIMAN L. Random Forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1):5-32.
- [24] GEURTS P, ERNST D, WEHENKEL L. Extremely randomized trees[J]. Machine Encrypted Data, 2006, 63(1):3-42.
- [25] CUTLER A, ZHAO G. Pert-perfect random tree ensembles[J]. Computing Science and Statistics, 2001, 33:490-497.
- [26] ZHAN J. Using Homomorphic Encryption For Privacy-Preserving Collaborative Decision Tree Classification[C]// IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining, 2007 (CIDM 2007). IEEE, 2007;637-645.
- [27] ZHAN J. Privacy-preserving collaborative data mining[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2008, 3(2):31-41.
- [28] BARNI M, FAILLA P, LAZZERETTI R, et al. Privacy-Preserving ECG Classification with Branching Programs and Neural Networks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2011, 6(2):452-468.
- [29] BOST R, POPA R A, TU S, et al. Machine Learning Classification over Encrypted Data[C]// Network and Distributed System Security Symposium. 2014.
- [30] ASLETT L J M, ESPERANCA P M, HOLMES C C. Encrypted statistical machine learning: new privacy preserving methods [J]. arXiv preprint arXiv:1508.06845, 2015.
- [31] FAN J, VERCAUTEREN F. Somewhat Practical Fully Homomorphic Encryption[J]. IACR Cryptology ePrint Archive, 2012, 2012:144.
- [32] GOLDWASSER S, MICALI S. Probabilistic encryption & how to play mental poker keeping secret all partial information[C]// Fourteenth ACM Symposium on Theory of Computing. ACM, 1982;365-377.
- [33] SHAI HALEVI. Helib-an implementation of homomorphice encryption[OL]. <https://github.com/shaih/HElib>.
- [34] RAJU R, KOMALAVALLI R, KESAVAKUMAR V. Privacy maintenance collaborative data mining-a practical approach[C]// 2009 2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET). IEEE, 2009;307-311.
- [35] LIU X H. Research on Algorithms for privacy-preserving Support Vector Machines[D]. Qingdao: University of Science and Technology in Shandong Province, 2011. (in Chinese) 刘晓红. 隐私保护支持向量机的算法研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
- [36] GRAEPEL T, LAUTER K, NAEHRIG M. ML confidential: machine learning on encrypted data [C] // International Conference on Information Security and Cryptology. Springer-Verlag, 2012;1-21.
- [37] YAO Y C, SONG L, E C. Research on Homomorphic Encryption based distributed K-means Clustering Algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2017, 27(2):81-85. (in Chinese) 姚禹丞, 宋玲, 鄂驰. 同态加密的分布式 K 均值聚类算法研究 [J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(2):81-85.
- [38] LI S D, DOU J W, WANG D S. Homomorphic Encryption Algorithm and its Application in Cloud Security[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(6):1378-1388. (in Chinese) 李顺东, 窦家维, 王道顺. 同态加密算法及其在云安全中的应用 [J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(6):1378-1388.

(上接第 24 页)

- [27] CAO Y, GUO S, HE T. Robust multi-pipeline scheduling in low-duty-cycle wireless sensor networks [C] // Proceedings of the 31st IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE, 2012;361-369.
- [28] ZHU C, YANG L T, SHU L, et al. A geographic routing oriented sleep scheduling algorithm in duty-cycled sensor networks [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2012;5473-5477.
- [29] CHEN L Y, YAN B S, ZHANG J Y, et al. Neighbor discovery algorithm in Mobile Low-Duty-Cycle Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Software, 2014, 25(6):1352-1368. (in Chinese) 陈良银, 颜秉姝, 张靖宇, 等. 移动低占空比传感网邻居发现算法 [J]. 软件学报, 2014, 25(6):1352-1368.
- [30] HUANG T, CHEN H, ZHANG Y, et al. EasiND: Effective Neighbor Discovery Algorithms for Asynchronous and Asymmetric-Duty-Cycle Multi-channel Mobile WSNs [J]. Wireless Personal Communications, 2015, 84(4):3031-3055.
- [31] RAZAQUE A, ELLEITHY K M. Low duty cycle, energy-efficient and mobility-based boarder node—MAC hybrid protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2015, 81(2):265-284.
- [32] CHEN L, SHU Y, GU Y, et al. Group-based Neighbor Discovery in Low-duty-cycle Mobile Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(8):1996-2009.