软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2013,24(2):198−214 [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04349]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

无线传感器网络中移动协助的数据收集策略*

张希伟[1,2,3], 戴海鹏[1,2], 徐力杰[1,2], 陈贵海[1,2]

[1](计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学),江苏 南京 210093)

[2](南京大学 计算机科学与技术系,江苏 南京 210093)

[3](河海大学 计算机与信息学院,江苏 南京 210098)

通讯作者: 张希伟, E-mail: zxw@hhu.edu.cn, http://cies.hhu.edu.cn

摘 要: 利用移动数据收集器(mobile data collector,简称 MDC)进行传感器网络中感知数据的收集,可以有效地减少传感器将数据发送到静止基站的传输跳数,节约网络的能量,延长网络寿命.此外,MDC 通过循环收集传感器数据或承担数据转发的功能,避免节点间由于多跳传输引起的能量空洞(energy hole)以及节点失效造成的传输链路中断等问题.MDC 的移动性也为无线传感器网络的研究带来新的挑战.研究基于移动协助数据收集的无线传感器网络结构,分类总结了近年来提出的一些典型的基于 MDC 的算法和协议,着重讨论了 MDC 在网络能量、延迟、路由和传输等方面带来的性能变化.最后,进行了各种算法的比较性总结,针对传感器网络中 MDC 的研究提出了亟待解决的问题,并展望了其未来的发展方向.

关键词: 移动数据收集器;无线传感器网络;能耗;路由;延迟;数据传输

中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

中文引用格式: 张希伟,戴海鹏,徐力杰,陈贵海.无线传感器网络中移动协助的数据收集策略.软件学报,2013,24(2):198−214. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4349.htm

英文引用格式: Zhang XW, Dai HP, Xu LJ, Chen GH. Mobility-Assisted data gathering strategies in WSNs. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2013,24(2):198−214 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4349.htm

Mobility-Assisted Data Gathering Strategies in WSNs

ZHANG Xi-Wei[1,2,3], DAI Hai-Peng[1,2], XU Li-Jie[1,2], CHEN Gui-Hai[1,2]

[1](State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University), Nanjing 210093, China)

[2](Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

[3](College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Corresponding author: ZHANG Xi-Wei, E-mail: zxw@hhu.edu.cn, http://cies.hhu.edu.cn

Abstract: Data gathering in wireless sensor networks by employing mobile data collectors (MDCs) can greatly reduce the relay hops when the sensors transmit data to static base station. This prolongs the lifetime of whole network for the energy saving at sensors. To avoid the energy holes incurred by multi-hop relaying among sensors, MDCs gather data from the sensors directly or some nodes buffered data of other sensors. Furthermore, MDCs relay data from sensors to the base station when there are no complete links between them due the fact that some sensors were invalid. However, new challenges have arose for the mobility of MDCs in data gathering, which is different from static wireless sensor networks. This paper focuses on the mobility-assisted data of gathering strategies in wireless sensor networks. Some current novel theories and algorithms for data gathering based on MDCs are reviewed, and the taxonomy is described.

* 基金项目: 国家自然科学基金(61073152, 61133006); 国家重点基础发展研究计划(973)(2012CB316200); 国家杰出青年科学基金(60825205); 江苏省自然科学基金(BK2012584); 常州市自然科学基金(CJ20110025); 中央高校基本科研业务费(2009B21514)

收稿时间: 2011-10-19; 修改时间: 2012-03-09; 定稿时间: 2012-09-29; jos 在线出版时间: 2012-12-10

CNKI 网络优先出版: 2012-12-10 15:41, http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20121210.1541.001.html

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

More specifically, several typical algorithms and protocols are discussed in detail. In the end, advantages and disadvantages of the algorithms are summarized. The open research issues in this field are also pointed out.

Key words: MDC (mobile data collector); WSN (wireless sensor network); energy consumption; routing; delay; data transfer

近年来,无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)在很多领域得到了广泛应用,主要包括:(1) 事物监测,例如环境监测、桥梁结构监测、人体状况监测等;(2) 事件探测,例如入侵检测、火灾探测等;(3) 目标跟踪,例如车辆跟踪、轨迹确认等.在这些应用中,传感器节点(sensors)需要完成 3 个方面的工作:(1) 从感知环境中采集所需要的数据;(2) 将数据进行存储或处理;(3) 发送数据或转发其他节点的数据,最终达到 Sink 节点或基站(base station).

在大多数传感器网络应用中,传感器采用电池供电,因此节点的能量是 WSN 应用的瓶颈[1].能效是传感器网络性能的一个重要指标,典型例子就是能量空洞问题[2,3].在 WSN 中,数据流遵循多对一模式,离 Sink 较近的节点需要承担更多的通信负载.因此,这些节点容易过早耗尽自身的能量,导致在 Sink 周围出现能量空洞.能量空洞的出现使采集数据不能进一步传送给 Sink 节点,此时网络的生命周期结束,网络中遗留大量未被充分利用的能量资源.尽管一些研究采用多级传输半径方法和节点非均匀分布方法来尽可能地平衡网络能量的消耗,但能量空洞问题依然存在.

此外,传感器节点一般通过多跳(multi-hop)的方式将数据传输给 Sink,这就要求在传感器和 Sink 之间存在一条完整的数据通路.为了满足这个要求,在随机布撒的网络中,传感器的密度必须达到一定的阈值[4].然而,随着传感器能量的消耗或外界的破坏,部分节点无法使用,造成网络连通性的丧失,产生路由中断.要修复这些漏洞需要重新布置传感器,代价很大.

最近几年,很多研究人员在无线传感器网络中引入节点移动性来解决上述问题.移动节点充当数据收集器(mobile data collector,简称 MDC)的角色,按照一定的路线在网络中游走,如果其移动到传感器节点的通信范围内,节点即可将数据直接传输给 MDC.MDC 对数据进行处理,或者将数据转发给后台 Sink.我们称这样的网络为 WSN-MDC.此时,MDC 与传感器之间是 1 跳的数据传输,可以显著降低网络的能耗并避免多跳传输引起的能量空洞问题.同时,MDC 的移动性使得节点之间即使不存在数据通路也不影响数据的收集.因此,MDC 在稀疏网络或非连通网络中收集数据具有明显的优势[5,6].尽管如此,由于 MDC 的移动速度无法与无线传输的速度相提并论,传感器的数据从产生到传输给 Sink 存在较大的延时.因此在 WSN-MDC 的应用中,许多研究者提出采用如下的方式进行传输以达到网络能耗与数据传输延迟之间的 trade-off:将传感器节点的数据首先通过多跳的方式传输给一些数据缓存节点(称为汇聚点),MDC 只访问这些汇聚点以缩短移动路径、减少延时[7,8].图 1 是 WSN-MDC 的一个典型例子(传感器节点将数据传输给数据缓存节点(汇聚点),MDC 从缓存节点处收集数据并传输给后台的 base station).

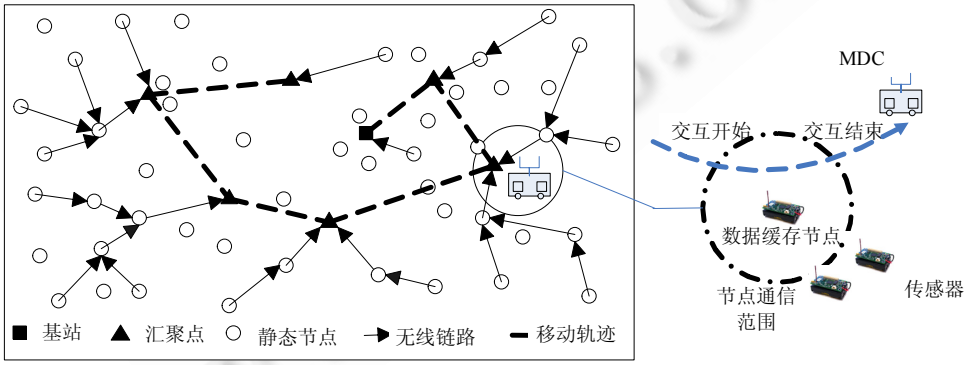

Fig.1 A classic application of WSN-MDC

图 1 一个典型 WSN-MDC 应用

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

1 MDC 及其应用

较早的利用 MDC 收集数据的方式是 Shah 等人提出的在稀疏的 WSN 中使用 Data Mule 收集传感器的数据[9].文献[9]指出,任何移动并且带有通信功能设备的物体都可作为 MDC,例如带有通信设备的人、动物或车辆等.由于 MDC 每次需要收集多个传感器的数据,因此其必须具有较多的能量和较大的存储空间.文献[10]在搭建的大规模 WSN 系统——GreenOrbs 中利用手持无线传输设备,通过人在网络中移动与传感器交互,如图 2 所示.Luo[11]等人将 WSN 应用于煤矿环境监测,把数据收集设备固定在采矿车上,通过矿车在轨道上来回的移动,传感器将采集到的温湿度和二氧化碳浓度数据传输给 MDC.BriMon 系统[12]在桥梁上部署传感器节点用于进行结构监测,利用在桥上行驶的火车或汽车作为 MDC 收集传感器的数据.在水下无线传感器网络(underwater WSN,简称 UWSN)应用系统中[13],水下自主航行器(autonomous underwater vehicle,简称 AUV)也可以作为 MDC 来使用.

为了方便对 MDC 进行控制,较多的应用采用机器车(robotic car)作为 MDC[7,14−19].机器车的控制系统通常采用单片机,如 51,AVR 或 ARM 等.移动装置采用 2 轮或 4 轮驱动,通过直流电机连接.通信装置一般与传感器上的通信模块相匹配,如使用 CC2430 等.通信装置可作为专门的模块连接到单片机的电路中.此外,单片机需要具有较强的计算能力和较大的存储容量,并且具有丰富的外围电路,通过 A/D 接口等可连接多种传感器,使 MDC 在必要时也可作为移动传感器.

一些大学和科研机构针对 WSN-MDC 专门设计并开发了一些机器车.图 3 是南加州大学(University of Southern California)的 Dantu 等人设计的移动节点 Robomote[14],耶鲁大学(Yale University)也研发了自己的移动节点 XYZ[15],这两种节点同时可作为移动传感器节点来使用.此外,还有 UCLA(University of California, Los Angeles)的 Packbot[16]和 Estrin 等人设计的 NIMs[17].我们也研发了一个基于机器车的 MDC——DataTruck[18],如图 4 所示.表 1 对部分基于机器车的 MDC 节点进行了性能上的比较.

Fig.2 Data gathering by handled devices
图 2 利用手持设备收集数据

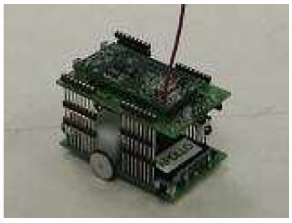

Fig.3 Robotmote developed by USC
图 3 USC 设计的 Robotmote 节点

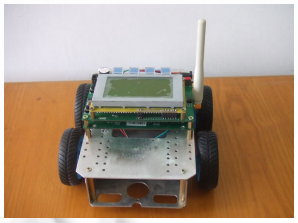

Fig.4 A node of DataTruck
图 4 一个 DataTruck 节点

Table 1 Performance comparison of some MDCs
表 1 一些 MDC 节点的性能比较

Product	Parameter								
	CPU	Communication module	Maximum speed (cm/s)	Storage (K)	Storage (M)	Speed of data uploading (kbps)	Interface for sensors	Maximum running time (hour)	Operating system
DataTruck	ARM7 LM3S1607	CC2431	130~190	128	16	250	Yes	1	uc/os-II
Robomote	AVR Atmel 8535	UART	15~20	1	0	19.2	No	1	tinyos
XYZ	ARM7 OKI ML67Q5002	CC2420	①	32	2	250	Yes	①	SOS

注①: XYZ 为沿绳索滑动的节点,在这 3 个方面无可比性.

根据 MDC 是否为传感器数据传输的最终目标,将 MDC 分为两类:Mobile Sink(MS)和 Mobile Relay(MR).前者是具有移动能力的 Sink 节点,而 Sink 本身用来接收网络中的传感器数据并进行处理.因此,Mobile Sink 更

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

适用于事件探测类应用,当 MS 接收到数据时,可立即进行处理[11,12,20].Mobile Relay 不是数据传输的最终目标,它仅负责收集传感器数据,并在移动过程中暂存这些数据,最终将数据转发给后台的 Sink 或 Base Station.例如,Data Mule 是一个典型的 MR.文献[4,7,21]中也将 MR 作为数据收集器.MR 需要较大的存储空间,但避免了 Sink 移动带来的动态路由等问题.

2 WSN-MDC 问题面临的挑战

利用 MDC 收集 WSN 中传感器的数据,有助于减少网络能量的消耗,避免能量空洞等问题,同时增加网络的可靠性及连通度,但另一方面也会带来网络相关传输、延时、路由、管理和计算等代价的提高.因此,WSN-MDC 的性能评价标准对基于 MDC 的算法及协议的可用性与有效性的分析至关重要.通过从多方面归纳总结 WSN-MDC 问题所面临的挑战,有助于清楚地比较各种算法之间的优缺点,这里归纳出如下几点:

(1) 数据有效性

对于实际应用而言,数据应当在规定的时间内到达,否则将失去意义.MDC 大都采用机器人小车,其速度只有 0.5m/s~2m/s[7],当其在一个较大的范围内移动时,需要花费大量的时间.有些研究利用人手持设备在网络中移动收集数据[10],速度更慢.鉴于这种原因,文献[7,21–28]等将 WSN-MDC 视为延时容忍网络(delay-tolerant network,简称 DTN).然而,很多实际的应用(例如事件监测)要求数据必须满足一定的时延,因此,如何尽可能地降低时延以保证数据有效性是 WSN-MDC 中最具挑战性的问题.

(2) 网络动态性

MDC 不停地移动,导致网络的拓扑与路由随时发生变化.在一些实时性要求较高的应用中[20],要求传感器采集的数据立即发送给 MDC,传感器需要维护到 MDC 的动态路由信息.MDC 在移动过程中广播位置信息,每个传感器节点动态地选择数据传输的最优路径,会带来额外的能耗.如何有效地维护动态路由,是 WSN-MDC 面临的一个挑战.

(3) 移动管理

移动管理包括 MDC 的路径规划和速度控制.MDC 的行为分为非可控(uncontrollable)和可控(controllable)两种[22,29].非可控即无法控制 MDC 的运动方式,对应 MDC 的移动轨迹包括随机的和可预测的.对于可控行为,移动轨迹包括固定的以及动态选择的.MDC 的速度主要包括匀速的与变速的.如何根据实际应用对 MDC 进行移动管理,是 WSN-MDC 的一个难点.

(4) 节能控制策略

由于传感器节点硬件平台资源受限,因此,尽可能地节约传感器节点有限的能量以及延长网络的使用寿命依然是 WSN-MDC 的重要性能指标.在实际的应用场景中,MDC 移动后重新构建路由消耗的节点能量,往往比减少多跳传输节约的能量还要多[30].因此,如何尽量降低传感器的工作频率以及减少数据传输量等为目标的节能控制策略,是 WSN-MDC 中的一项重要研究内容.

(5) 交互策略

MDC 的移动性带来通信的不确定性.MDC 随时可能进入或移出传感器的通信范围,尽可能地延长 MDC 与传感器的通信时间以及减少数据传输的出错率,是衡量节点发现与传输协议优劣的重要评价准则之一.此外,多个 MDC 与传感器之间以及 MDC 之间的交互策略也是 WSN-MDC 的重要研究内容.

(6) 网络可扩展性支持

保证网络的可扩展性是 WSN-MDC 中的另一个关键需求.没有可扩展性的保证,网络的性能会随着网络规模的增加而显著降低.针对不同的应用需求,WSN 的网络规模相差较大,同时,MDC 的数量要求也不尽相同,因此,网络的可扩展性需求在 WSN-MDC 中尤为明显.

在分析了 WSN-MDC 存在的优势和面临的挑战基础上,我们进一步整理并列出了 WSN-MDC 所覆盖的主要研究领域,如图 5 所示.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

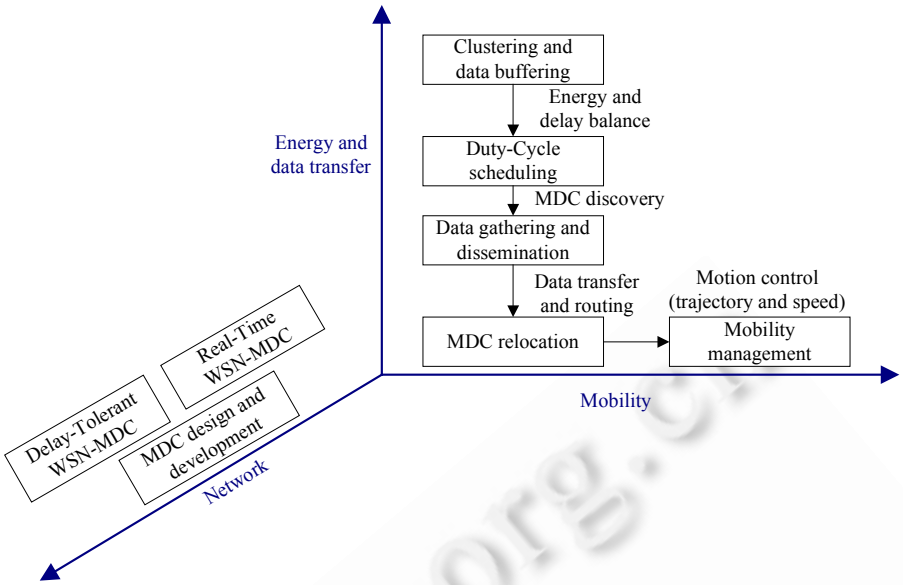

Fig.5 Main research fields covered by WSN-MDC

图 5 WSN-MDC 涵盖的主要研究领域

3 WSN-MDC 研究问题分类与现状

无线传感器网络中利用 MDC 进行数据收集,为网络研究带来一系列相关的新问题.除了考虑 MDC 的路径规划问题以外,更需要综合分析在能量、延时、移动速度、可靠性以及节点缓存等各个方面引起的变化.为了对 WSN-MDC 的相关问题有更加全面的了解,本文从应用方式和执行过程的角度对研究问题进行分类综述.

3.1 应用方式分类

WSN 的研究与应用密不可分,从应用的角度来看,可以将 WSN-MDC 分为两类:一类将 WSN-MDC 作为延时容忍网络,另一类仍将其作为具有实时要求的网络.通常情况下,前者由 MDC 收集传感器数据,传感器之间只有少量的多跳传输,只需时延在应用允许的范围内即可;后者通常采用移动 Sink,要求数据能够实时传输,即传感器感知数据后立即通过多跳传输给 MDC,这要求传感器能够实时地获知 MDC 的位置以及确定传输的路由.

3.1.1 延时容忍的 WSN-MDC

延时容忍意味着传感器感知到数据后可以不立即发送给 MDC,而存放在本地或某些数据缓冲节点上等待 MDC 进行收集.例如在森林环境监测、水文数据监测等应用中,大多数感知数据是非紧急的,只需要一段时间收集一次.因此,在保证应用时延限制条件下,节能是此类网络最大的优化目标.

可以将延时容忍的 WSN-MDC 描述成这样的模型:MDC 沿着路径 P 以恒定速度 V 移动并进行数据收集.传感器节点随机散布在移动轨道 P 两侧.假设在时间段 D 秒内,每个节点都会产生 q 比特数据且这些数据必须最迟在 D 秒内传送给 MDC.此处的 D 秒就是应用的时延限制.因此,移动轨道 P 的总长度上限 $l_m=V\times D$,表示 MDC 必须在 D 秒内完成一次移动周期,可将其称为 1 轮.上述时延 D、移动速度 V 和轨道长度 l_m 的关系表示在特定的移动速度和时延要求下,MDC 移动轨迹长度的上限是确定的,否则将无法在特定时延要求内完成数据收集.因此,可以用轨道长度上限 l_m 来间接地反映时延要求 D,选择长度不大于 l_m 的 MDC 轨迹即表示可以满足时延要求.

(1) 直接访问传感器节点

为了最大化网络能量,MDC 直接收集所有传感器节点数据,即通过一跳通信就完成数据传输.这类研究主要包括文献[19,22,23],研究目标集中在寻找一条最短路径遍历这些传感器节点.明显地,这类问题可以用类似于

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

TSP(traveling salesman problem)的方法来求解.

直接访问的方式不考虑延时问题,但由于不同位置的传感器节点可能存在差异,MDC 根据传感器的性能或状态调整数据收集的先后次序或频率.文献[24]考虑了传感器存储容量有限、数据可能溢出的情况.根据数据量大小的不同,将感知区域划分成多个区域,称为 bin.如果某个 bin 内的数据量较大,则 MDC 访问的频率较高,反之则较低,以确保数据不会溢出.

(2) 访问汇聚节点

MDC 直接收集所有传感器节点数据虽然能最大化节约网络的能量,但带来的时延也非常大.假设最远的传感器距离 Sink 点为 600m,有 10k 的数据需要传输给 MDC.若采用 CC1000 传输模块以多跳的方式进行,传输半径与速率分别为 20m 和 20Kbps,那么延时约为 $\frac{600\text{m}}{20\text{m}}\cdot\frac{10\text{Kb}}{20\text{Kbps}}=15\text{s}$. 如果通过 MDC 移动到该节点处收集数据,则其移动速度有限(0.5m/s~2m/s),因此延时为 5 分钟~20 分钟,这对于大部分的应用来说都是难以忍受的.一种更加时延有效的方法是选择一部分节点或位置(也称为虚拟点,该位置处可以没有传感器)作为汇聚节点(rendezvous point,简称 RP),传感器将数据先传输到 RP 或距离 RP 最近的传感器,MDC 只需访问这些 RP 即可完成数据收集.这类研究主要包括文献[7,21,25−28].

在基于 RP 的数据收集中,网络的能耗主要来自于传感器节点将数据传输到 RP 的能量损耗.如果传感器的数据量一定,则能耗由其到 RP 的传输跳数决定,网络总能耗最小化问题等价于全网节点距离其所属 RP 节点跳数和的最小化问题[25].实际上,网络分割成了以 RP 节点为簇头的多个簇,每个簇的规模越小,网络总能耗越小(极限情况下,每个传感器节点自己就是 RP).由此可见,在 RP 点均匀分布的情况下,其数量越大,网络能耗越小;但同时,连接 RP 点的路径越长,相应的时延越大.

RP 节点的位置和数量与网络的能耗有密切的关系.对于给定的一条移动路径,MDC 只能与该路径附近 1 跳范围内的节点(数据缓冲节点,即 RP)通信,此时 RP 点的位置已经确定.如果 MDC 以匀速方式运动,那么数据收集的延时也是固定的.固定路径使得对 MDC 的控制简单化,提高了系统的稳定性.此时的优化目标是传感器节点如何通过多跳将数据传输给 MDC,同时能耗最小[7],或者传输的数据量最大[31].

文献[26,27]假设传感器节点均匀分布在一个半径为 R 的圆形区域内,MDC 移动的环形区域设为数据缓冲区,缓冲区内的节点即为 RP.缓冲区内侧和外侧的节点将数据传输到该区域内的 RP,MDC 从 RP 点收集数据. Shi 等人证明了,当缓冲区处于距离圆心 $\sqrt{2}R/2$ 位置时,系统总能耗最小[26].文献[27]则关注节点间的负载均衡问题,即缓冲区设置在何处,使得网络中各节点的最大负载最小化.文中证明,Sink 沿着网络周围移动是最佳的移动策略.

上述移动策略仅应用在圆形区域内,未考虑网络中时延限制的问题.文献[7,28]研究了给定时延限制下的 RP 节点选择算法,其目标是根据上述延迟容忍的 WSN-MDC 模型选出一条长度不大于 l_m 的由 RP 点组成的 MDC 移动路径,使得网络能耗最小.文中采用最小连通树(steiner minimum tree,简称 SMT)的方式将传感器节点连接起来,通过前序遍历寻找长度不大于 l_m 的移动路径,该路径与最小连通树的交点即为 RP 点的位置.但该方法需要遍历网络中所有节点来选择 RP 点,能耗较大.文献[32]克服上述缺点,提出了一种基于地理位置信息的虚拟点选择算法.文献[22]考虑 MDC 方式作为 WSN 中数据收集的辅助手段,分析了使用 MDC 收集数据无法满足时延要求时,仍然采用传感器之间节点间多跳的方式将数据传输给后台 Sink 的能耗.

尽管在延时容忍的 WSN-MDC 应用中,只要在规定时间内完成数据传输即可,但时延仍然应该尽可能地缩短[21,33].文献[21]根据 RP 节点的重要程度为其赋予优先访问概率,而 He 等人[33]考虑了节点间感知数据的相似性,对 RP 点进行组合.这两种方法都是通过减少访问的 RP 点来压缩移动距离.

3.1.2 实时传输的 WSN-MDC

在实时性较强的一些应用中,例如事件探测、灾难报警等,感知数据需要立即传输给 Sink,即使 Sink 当前是在移动过程中.在这种情况下,MDC 主要采用 mobile Sink,数据仍采用多跳的方式传输.通过 Sink 的移动来平衡网络中节点的负载与能耗.需要解决两个问题:一是为优化网络性能,Sink 应移动到何处[29,34,35];二是在 Sink 移动

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

过程中数据如何传输,即实时路由问题[10,36−39].

移动 Sink 位置的选择与事件发生的区域有密切关系.如果仅考虑单个事件点,Sink 应移动到事件发生的区域,这样能节约传输能量,同时也可以减少数据传输的时间[29].文献[34]证明了,负载最大的传感器(转发节点)位于距离 Sink 最远事件的方向上.为了最小化节点负载,Sink 移动后的位置应与多个事件发生点的最大距离之和最小.然而该方法是一种集中式算法,需要知道事件发生的位置以确定 Sink 的移动.

文献[35]提出了一种距离受限的 Sink 移动策略.作者认为,Sink 的能量也是有限的,每一轮的移动长度应加以限制,并提出了一种线性混合整数规划模型(mixed integer linear program,简称 MILP).同样地,MILP 模型也是一个集中式的方法,需要 Sink 了解全局信息,计算复杂且实施困难.

Sink 移动带来的另一个问题是实时路由.一种简单的方式是,Sink 在移动过程中发送信标,通知传感器其当前位置,所有传感器逐级更新到 Sink 的最佳路由[36].这种方法更新代价大,每个节点都需要即时确定新的路由,并且更新频繁.为了使数据传输具有稳定性,应尽量保持原来的路由.尽管 Sink 在不停地移动,仍可通过更新部分传感器的路由来达到目的[10].在该方法下,大部分传感器的路由可能不是最佳的,即并非最短距离路由.

应该看到,上述两种路由更新方法均不可避免地增加了数据传输的时间:前一种是传感器等待 Sink 停止移动并重新建立路由树后才能将采集的数据传输给 Sink,重建路由树需要耗费一定的时间[39];后一种是将传感器数据按照原有路由发送,并由知道 Sink 移动位置的传感器进行转发,增加了转发的跳数[40].

针对 Sink 移动路径是固定的方式,文献[37]提出了一种基于学习的时间域路由算法(HLETDR).该算法强调移动 Sink 周期性地访问固定的传感器节点(称为 mole),使得 mole 能够准确地预测当前时间域内移动 Sink 处于该 mole 的概率.

文献[38,39]则通过预测移动 Sink 的下一个位置来优化路由更新过程.前者采用序列化的蒙特卡罗(sequential Monte Carlo)方法进行预测,这种方法使得每个数据转发节点都要预测 Sink 的位置,代价较大;后者通过预先设置 Sink 的移动路径图(mobility graph),从 MDC 的当前位置可推测下一个位置.由于需要提前知道 Sink 的移动方式,该方法具有局限性.

3.2 执行过程分类

MDC 按照一定的轨迹,以某种速度在网络中移动,并与传感器进行数据交互.从整个执行过程来看,可以将 WSN-MDC 中的行为分为 4 个方面:MDC 发现(MDC discovery)、动态路由(dynamic routing)、数据传输(data transfer)以及行为控制(motion control),如图 6 所示.

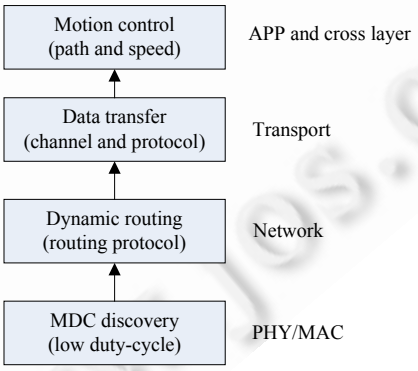

Fig.6 Layered model for WSN-MDC research

图 6 WSN-MDC 研究的层次化模型

我们借用网络层次的概念对 WSN-MDC 的相关研究内容进行介绍.从图 1 中可以看出,当 MDC 进入到传感器节点的通信范围内时,传感器应感知到 MDC 来临,并与其进行交互.当 MDC 的位置发生变化后,传感器需要找到新的路由,将数据实时地发送给 MDC.在数据传输过程中,MDC 与一个传感器或多个传感器进行通信,通

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

信协议的差异决定了其通信方式有所不同.此外,不同的应用需求将对 MDC 移动过程中的路径选择与速度控制产生影响.第 3.1.2 节中已介绍了路由的更新模式,这里,我们从另外 3 个方面对 WSN-MDC 问题进行分类和研究.

3.2.1 MDC 发现

MDC 在移动过程中间断性地发送信标(beacon),当传感器节点完整地接收到一个信标时,即可确定 MDC 在其通信范围内.而在实际应用中为了节约能量,传感器节点具有一定的工作周期(duty-cycle).当传感器节点不工作时,将自己处于睡眠状态,此时能耗最低.一段时间后节点醒来探测信道,当接收到 Beacon 后,节点转为通信状态进行数据通信,否则继续睡眠.因此,需要 MDC 和传感器协同来完成这一过程.

一类比较简单的发现协议是采用同步的方法[41].节点间严格按照事先约定好的时间点进行交互.传感器节点无需信道探测,在时间点到达时预先唤醒,能够最大程度地节约能量,但同步过程难以实现.

另一类非同步的方法中,传感器与 MDC 按照各自的规律进行工作.采用 MDC 主动唤醒传感器节点的机制.可以采用类似于 RFID 的方式,MDC 发送唤醒消息,其中包含的能量能够激活静态传感器节点,并产生一个中断使能数据传输[42].文献[43]采用多天线或多通道技术,长距离高能量的无线电用来传输数据或作为 low duty-cycle 的长距离探测,短距离低能量的无线电用来近距离探测 beacon 信号.后者由于能耗较低,探测频率可以较高.该方法在探测延时与能量之间寻找平衡.

还有一类方法通过先验信息来预测 MDC 到达传感器的时间点.当 MDC 采用固定路径移动时,其访问传感器节点的时间具有周期性.利用传感器节点每次记录下与 MDC 交互的时间点,以此预测 MDC 下一次到达的时间[25].若 MDC 的移动轨迹是随机的,则其访问同样具有周期性,但这种周期性不是一成不变的,而是随着时间变化的.此时,传感器节点必须改变自身的机制来适应这种变化.文献[6]中,传感器节点能改变自己的 duty-cycle.将时间分为多个时间片,在每一个时间片记录下移动节点访问的次数,利用指数加权平均滑动过滤器(exponentially weighted moving average filter,简称 EWMA)计算该时间片的权重,并作为调整 duty-cycle 的依据.

3.2.2 数据传输

从 MDC 的角度来看,其与一跳范围内的传感器节点进行数据通信.移动性给数据传输带来两个方面的变化:一是与 MDC 通信的节点不断地改变,在数量和能量上都有不同;二是 MDC 与节点的距离不断地改变引起通信信号强度变化.

传感器与 MDC 的通信信号强度随着两者之间的距离变化,因此,MDC 的移动给数据传输的成功率带来影响.文献[44]通过实验证明,传输成功率与 MDC 的移动速度、MDC 与传感器之间的距离、传感器产生数据的频率以及传感器的轮值周期(duty-cycle)都有着密切的关系.作者发现,需要选择在信号最强的一段时间内完成数据传输,此时的数据丢失率最小,所需的传输时间最小,同时消耗的能量也最少[45].设 t_1 为传输起始时间,t_2 为结束时间,需要最小化时间段 t_2-t_1 以完成传输数据量 B,可形式化为

$$\begin{cases}\text{minimize } t_2-t_1\\ \text{subject to } \int_{t_1}^{t_2} Th(t)\cdot \mathrm{d}t = B\end{cases}$$

其中,$Th(t)$为 throughput 的时间变化函数.假设时间由多个大小恒定的窗口组成,传感器将数据分为多个消息(message),这些消息在窗口中依次传输.可根据每个窗口中的消息丢失率和确认信息的接收概率来求 $Th(t)$.

一种常用的数据传输协议是自动请求重传(automatic repeat request,简称 ARQ)协议[45].在 WSN-MDC 中采用 ARQ 的一个优点是,针对传感器节点无法判断 MDC 何时移出通信范围,利用 ARQ 的超时机制,判断最后一个发送的数据如果超时没有收到确认,则可认为移动 MDC 已超出范围.但这种方法增加了数据通信量.

另一种常用的传输协议是停-等协议(stop-and-wait)[46].MDC 进入传感器通信范围后即停止移动,直到规定的时间或数据传输全部完成后再离开.类似地,文献[36]采用 MDC 主动通知的方法,在 MDC 移动之前,通知与之通信的传感器节点停止数据传输.这两种方法均减少了丢包率,但浪费了一定的通信时间.

WSN-MDC 中有两类特殊的数据传输方式:一类是在稀疏的传感器网络中,一个传感器可能同时与多个 MDC 传输数据[47];另一类是在密集传感器网络中,一个 MDC 可以与多个传感器通信[48].

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

从传感器的角度来看,一些研究考虑一对多的情况.文献[47]假设一个传感器节点同时传输给多个 MDC 的情况.例如在城市环境下,人(作为 MDC)从感知设备下载天气、温度等信息.这种情况下,至少 1 个 MDC 正确接收到传感器的信息才认为数据传输成功.文中采用基于网络编码的传输方法来提高数据传输的效率.

由于 MDC 可以与 1 跳范围内的多个节点进行通信,为了减少传输延时,文献[48]采用 SDMA(space-division multiple access)技术进行通信,移动 Sink 同时与多个传感器进行数据传输.采用 SDMA 技术与普通单天线相比,收集相同区域内传感器的数据至少能节约 35%的时间.

从协议的角度来看,现有的 802.15.4/ZigBee 协议没有考虑 MDC 的移动性,无法满足 WSN-MDC 中的数据传输要求.文献[30]对其进行了改进,提出了移动自适应的 MAC 接入机制.由于 MDC 随时可能移入或移出通信范围,为了节约传感器能量,文中采用超低能耗信道接入控制机制.

3.2.3 行为控制

在随机移动模型中,MDC 与传感器交互的时间、距离等属性无法控制.数据收集有延时和能耗的要求,必须对 MDC 的移动轨迹(trajectory)进行控制,以达到优化的目的.另一个与行为控制有关的属性是速度(speed).相同的路径,速度越快则延时越小,但 MDC 的移动速度也影响与传感器通信的时间.

在可控模式下,MDC 的移动路径可分为固定轨迹(static trajectory)和动态轨迹(dynamic trajectory)两种.前者是指 MDC 一旦根据性能要求确定了移动路径,就始终按此轨迹运动,不再改变[7,19,21−28];后者是指在 MDC 的运动过程中,根据外界情况的变化随时改变 MDC 的行进轨迹[49,50].在第 3.1 节,我们已经描述了根据相关性能要求确定移动路径的算法,这里不再赘述.

在现有的研究工作中,与数据传输有关的 MDC 运动方式主要有两种:一种是 MDC 以速度 v(可以是匀速,也可以是变速)通过节点通信区域;另一种是停-传(stop and communicate)方式.前者是指,当 MDC 移出通信范围时,如果节点尚有缓存数据未传输,则通过多跳继续传输(动态路由)或等待 MDC 下一次到来;后者是指,MDC 将在节点通信范围内停止运动,待节点缓存数据全部传输完毕后才继续移动.

当前,对速度的研究是基于上述第 1 种运动方式.文献[51]提出了一种可变速度控制(adaptive speed control)算法.MDC 的速度根据不同区域的拥塞程度进行控制.拥塞区域(congested zone)通常是指节点非常密集的区域,或者与 MDC 通信时间很短的区域,或者是信道质量很差的区域.

MDC 在节点通信范围内的交互时间被看作是一个 interval,其数据传输任务即为一个 job.为每一个 job 分配移动速度是一个 NP 完全问题[51].根据速度的调整过程将其分为 3 个阶段:最大加速阶段(accel interval)、稳定恒速阶段(plateau interval)和最大减速阶段(decel interval),如图 7 所示.启发式算法步骤如下:(1) 将所有 job 进行序列化;(2) 求解每一个 job 所需要的最大恒定速度,选择其中最小的,并计算最大加速与最大减速;(3) 如果 job 之间有交叠,对于加速、减速以及恒速阶段可以进行剪裁,即并不是每次都需要从速度 0 开始计算,可以从前面 job 的速度来计算下一 job 的速度;(4) 上述选择的最大恒定速度是所有 job 中最小的,对于其他 job 速度还有上升的空间,采用递归的方法重复上述过程,直至所有 job 对应的速度都求解结束.

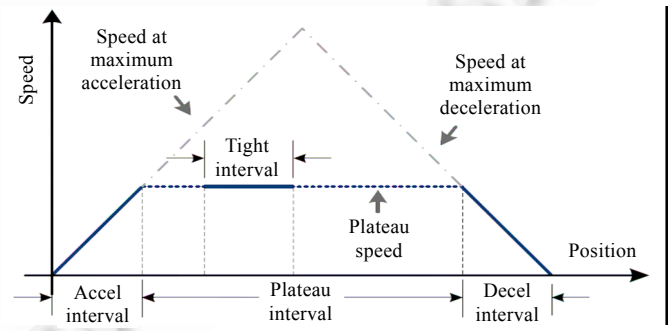

Fig.7 Three stages of speed adjust of MDC

图 7 MDC 速度调整的 3 个阶段

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

由以上 WSN-MDC 研究的分类我们不难看出,应用方式和相关执行属性两种分类方法既有各自特殊的分类角度,又有具体研究内容上的重叠.基于本节内容,图 8 进行了 WSN-MDC 相关算法与协议的分类总结.

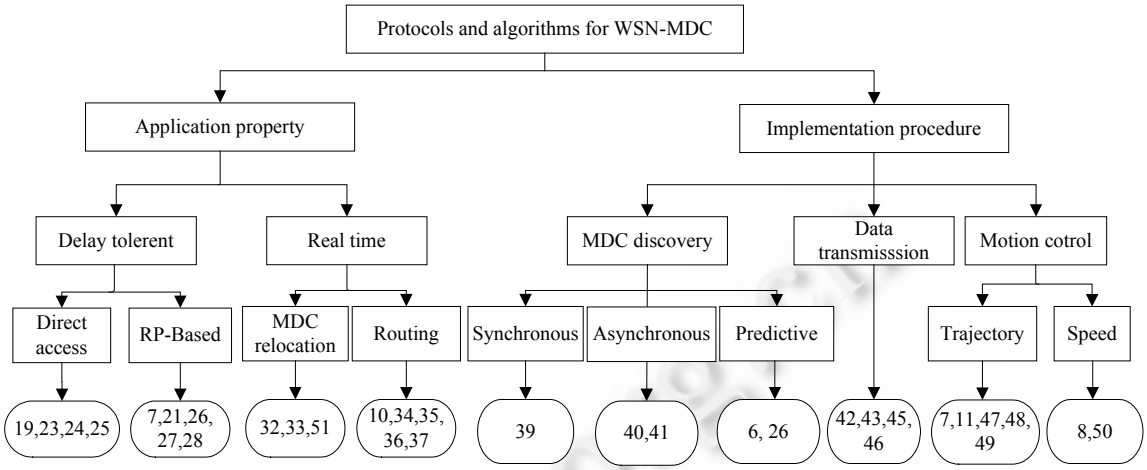

Fig.8 Protocols and algorithms for WSN-MDC: A taxonomy

图 8 WSN-MDC 相关算法与协议分类

4 典型的 WSN-MDC 算法与协议

基于前面对 WSN-MDC 的研究分类与总结,本节将详细介绍一些典型的研究成果,这些算法与协议都是综合考虑 WSN-MDC 多方面的性能要求,具有一定的应用价值.

4.1 综合能量与延时[7,22]

能耗与延时是 WSN-MDC 中最主要的矛盾.若 MDC 与每一个传感器都是单跳传输,则此时能耗最低,但延时最大;如果所有传感器都是以多跳传输,则延时最短,WSN-MDC 退化为静态传感器网络.因此,需要在能耗与延时之间找到一个折中.

一种解决方案是在完成数据传输任务的基础上最小化时延[22].每一轮中,MDC 与某个传感器存在 1 个或多个交互,每一个交互过程中 MDC 所移动的距离称为一个位置间隔(location interval).设移动路径被划分成 $2m+2$ 个位置间隔$[l_0,l_1],[l_1,l_2],\ldots,[l_{2m+1},l_{2m+2}]$.该问题可归纳为下面的线性规划算法:

对于每一个位置间隔$[l_i,l_{i+1}]$,存在如下的变量:

- z_i:MDC 在该间隔内的移动时间;
- P_{ij}:完成该间隔内分配的任务 j 所需要的时间.

目标:

$$\text{Minimize} \sum_{i=0}^{2m+1} z_i.$$

约束条件:

$$\sum_{i=0}^{2m+1} p_{ij} = \frac{\lambda_j}{R}\left(\sum_{i=0}^{2m+1} z_i + T\right)_b.$$

其中,λ_j 为任务 j 所在传感器的数据产生率,R 为带宽,T_b 为 MDC 在 base station 处的停留时间.

另一种解决方案是固定延时,最小化能量[7].若 MDC 是匀速移动,其路径的长度也固定,设为 L.该问题可被转化为一个图论的问题:给定传感器节点集合 S,1) 寻找一条移动路径 U,其长度不超过 L;2) 构造几何树$\{T_i(V_i,E_i)\}$,其根节点位于 U 上,$S\subseteq U_iV_i$,使得 $\sum_i\sum_{(u,v)\in E_i}|uv|$ 最小,其中,(u,v)是 T_i 的边,$|uv|$为 u 与 v 之间的欧几里得距离.可以证明,这是一个 NP-hard 问题.文献[7]给出了一种基于最小连通树的近似算法.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4.2 综合路由与代价[10]

前面已经指出,在具有实时要求的 WSN-MDC 中,传感器需要将数据立即传输给 MDC,因此需更新自己的路由表.当 MDC 从一个访问点移动到下一个访问点时,以 1 跳通信范围内的传感器作为根节点,重新构造路由树.MDC 广播当前位置,每一个传感器选择一条到根节点的最短路径,并更新路由信息.这种方式虽然简单,但重构路由树的能耗代价太大.同时,由于路由的变化造成数据丢包率增加,数据出错的概率增大.Li 等人提出一种仅更新部分传感器路由的方法,并且更新的规模可以根据设定的参数调整,如图 9 所示.

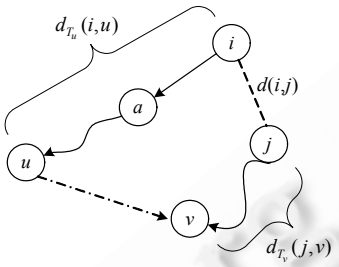

Fig.9 Routing updated incurred by Sink's mobility

图 9 Sink 移动引起的部分路由更新

假设 MDC 当前位于节点 u,以 u 为根节点构造路由树 T_u,传感器 i 通过最短路由将数据传给 u,计算 i 到 u 的路由距离(路由节点间的欧式距离之和) $d_{T_u}(i,u)$.设 j 为 i 的邻居节点,$d(i,j)$表示两者之间的距离.当 MDC 移动到节点 v 时,将构造以 v 为根节点的路由树 T_v.传感器 i 的路由更新过程如下(假设 j 已通过更新并存在到 v 的新路由):

(1) 节点 j 广播路由更新信息 $(d_{T_u}(u,v),d_{T_v}(j,v))$,其中, $d_{T_u}(u,v)$ 为 T_u 树中 u 到 v 的路由距离, $d_{T_v}(j,v)$ 表示 T_v 树中 j 到 v 的路由距离(初始情况下,MDC 发送的 $d_{T_v}(v,v)=0$).

(2) 节点 i 收到该信息后,计算 $\dfrac{d_{T_u}(v,u)+d_{T_u}(i,u)}{d_{T_v}(j,v)+d(i,j)}$.

(3) 判断 $\dfrac{d_{T_u}(v,u)+d_{T_u}(i,u)}{d_{T_v}(j,v)+d(i,j)}$ 的结果是否大于设定的阈值$\lambda(\lambda>1)$:

如果是,则 i 更新 $d_{T_v}(i,v)=d_{T_v}(j,v)+d(i,j)$,同时将 j 作为自己的下一跳邻居,并广播路由更新信息 $(d_{T_u}(u,v),d_{T_v}(i,v))$;

否则,丢弃该信息.

(4) 重复上述过程,直至所有节点完成更新.

第(3)步中, $\dfrac{d_{T_u}(v,u)+d_{T_u}(i,u)}{d_{T_v}(j,v)+d(i,j)}>\lambda$ 意味着,如果在树 T_u 中 i 到 v 的路由距离比树 T_v 中 i 到 v 的距离大λ倍,则应该将 i 原来的路由更新为 T_v 树中的新路由.可以看出,λ值的大小决定了更新范围的大小.

4.3 综合节点发现与数据传输[6,46]

为了节约传感器的能量,节点通常是以一定的 duty-cycle 周期性地睡眠与工作.当传感器睡眠一段时间后,将醒来探测 MDC 发送的 beacon 信号,如有,则进行数据传输;否则继续睡眠.MDC 一直发送 beacon 信号直到传感器探测到该信号为止,因此,传感器接收到完整的 Beacon 存在一定的延时,MDC 与传感器的有效通信时间(c)为其在传感器通信范围内的停留时间($c_{\max}$)减去接收到 beacon 信号的延时(D),如图 10 所示.其中,T_B 为 MDC 发送 beacon 的周期,T_{BD} 为 beacon 时长,T_{ON} 和 T_{OFF} 分别为传感器探测与睡眠的时长.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

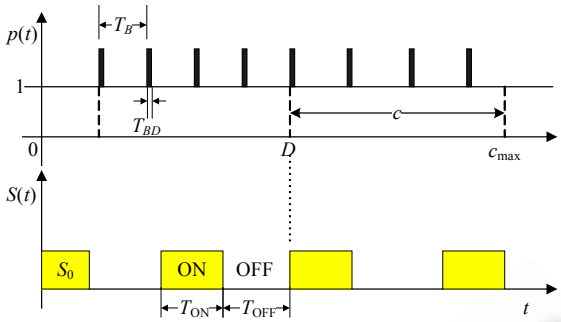

Fig.10 Example of Beacon discovery process

图 10 Beacon 发现过程示例

数据传输采用基于窗口(window-based)的 ARQ 协议.每个窗口由 w 个 message 和一个 ACK 组成,如图 11 所示.该窗口从 t 时刻开始,同时考虑了数据丢失概率,由于 MDC 与传感器的距离随时间变化,因此它是一个与时间有关的函数,设第 i 个 message 的丢失概率为 $p(t+i\cdot T_S)$.同样地,ACK 消息丢失概率为 $p(t+w\cdot T_S)$.一个周期内,MDC 正确接收到的数据量为 $R(t)$,期望值 $E[R(t)]=\sum_{i=0}^{w-1}[1-p(t+i\cdot T_S)]\cdot[1-p(t+w\cdot T_S)]$.因此,如果 MDC 与传感器交互共有 $W=\left\lfloor\frac{c_{\max}-D}{(w+1)\cdot T_S}\right\rfloor$ 个窗口,那么 MDC 总的接收数据量为

$$R=\sum_{i=0}^{W}R(t+i\cdot(w+1)\cdot T_S)\,|_{t=D}\,.$$

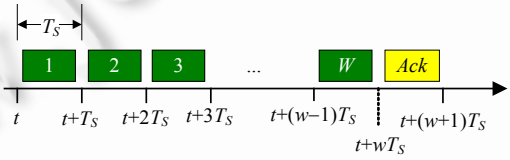

Fig.11 ARQ-Based communication for data transfer

图 11 基于 ARQ 通信的数据传输

可以看出,传感器传输给 MDC 的数据量依赖于接收到完整 beacon 的时间.同时,实验指出,duty-cycle 的高低决定了节点发现的时间以及有效通信时间,也影响了传输数据所带来的能耗.在这种情况下,低 duty-cycle 并不是能耗最低的,特别是当 MDC 的到达时间可预测的时候.

4.4 综合时空相关性与调度[52]

在事件探测的 WSN 应用中,事件的发生一般具有较强的时空相关性(spatial-temporal correlation,简称 S-T correlation),即某个事件可能会在一定的空间范围内发生,并持续一段时间.在该范围内,所有的同类传感器采集的数据都是相同的.MDC 在收集该事件的数据时,没有必要访问所有的传感器,只需在该范围内选择一个传感器收集数据即可,这样可以节约网络的能量.

在三维时空坐标系中,用半径为 R、高度为 H 的圆柱体来表示某个事件发生区域(R-H event region),如图 12 所示.用该圆柱体下平面表示事件区域,其中心坐标为(x,y,z),用 $E(x,y,z)$表示该区域.对于该区域内传感器节点 i (坐标为$[X_i,Y_i]$)在 t 时刻的数据的查询请求 Q_t^i,必须满足如下条件:

$$|(X_i,Y_i)\cdot(x,y)|\leqslant R \tag{1}$$

$$t\in[z,z+H+t_{buf}] \tag{2}$$

公式(1)中的绝对值表示两个坐标之间的欧氏距离,公式(2)中的 t_{buf} 表示传感器能够缓存数据的最大时间.

给定一个具有 M 个事件区域的网络,此时,能量优化问题可描述如下:寻找一个传感器节点序列$\langle S_{a_1},S_{a_2},$

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

S_{a_3},...〉,每一个传感器对应了一个事件区域,为了最大化网络寿命,满足 Min-Max 条件:

$$\text{maximize } \min_{1\leqslant i\leqslant M}(P_i-q_i).$$

其中,P_i 为收集数据之前传感器的剩余能量,q_i 为传感器 S_i 在序列中出现的次数.传感器与 MDC 每次交互的能耗为 1 个单位.

由于时间相关性和数据缓存时间 t_{buf} 的限制,若某个事件在 t 时刻发生,则 MDC 必须在 $t+H+t_{buf}$ 之前到达,否则数据将丢失.因此,需要对传感器节点序列的访问顺序进行排列,优化的目标是指 MDC 能够以最小的恒定速度行进.设节点序列调整后为〈$D_{R_1},D_{R_2},D_{R_3},...,D_{R_M}$〉,对应的访问时间为〈$T_1,T_2,T_3,\ldots,T_M$〉,则最小速度为

$$\text{minimize } \max_{1\leqslant i\leqslant M-1}\frac{|D_{R_i}\cdot D_{R_{i+1}}|}{T_{i+1}-T_i}.$$

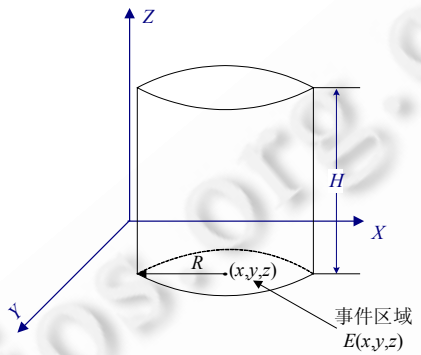

Fig.12 Spatial-Temporal correlation model in event detection

图 12 事件探测中的时空相关模型

5 WSN-MDC 相关研究比较与亟待解决的问题

5.1 相关研究工作比较

为了对已有的研究进行相互间的对比,本节对照本文第 3 节所列的协议与算法的相关属性与性能进行优缺点的比较与总结,见表 2.

Table 2 Comparison of related properties on WSN-MDC protocols and algorithms

表 2 WSN-MDC 协议与算法的相关属性比较

Article	Problem		Mobility model (speed change)	Multihop	#MDC	Energy efficiency	Latency	Metric of interest
	Path	Speed						
DIRL[6]	Yes	No	(Given constant)	No	Single	High	High	Latency
RD[7]	Yes	No	(Given constant)	Yes	Single	Moderate	Low	Energy
UDC[10]	No	No	(Given constant)	Yes	Single	Moderate	High	Reliability
MCSG[11]	Yes	No	(Given constant)	Yes	Multiple	High	Moderate	Energy
Sencar[19]	Yes	No	(Given constant)	Yes	Single	High	Moderate	Energy
PPS[21]	Yes	No	(Given constant)	Yes	Multiple	High	Moderate	Latency
DMS[22]	Yes	Yes	Variable	Yes	Single	Moderate	Moderate	Latency
MRME[24]	No	No	(Given constant)	No	Single	High	High	Reliability
MASP[25]	Yes	No	(Given constant)	Yes	Multiple	Moderate	Low	Reliability
MADG[26]	Yes	No	(Given constant)	Yes	Multiple	High	Low	Energy
TTDD[27]	Yes	No	(Given constant)	Yes	Multiple	High	Low	Energy
MILP[35]	Yes	No	(Given constant)	Yes	Single	Moderate	Moderate	Energy
SideWinder[38]	No	No	(Given constant)	No	Single	Moderate	Low	Reliability
PQR[39]	Yes	No	(Given constant)	No	Single	High	Low	Reliability
HAP[47]	Yes	No	(Given constant)	No	Multiple	High	High	Reliability
DMS+[51]	Yes	Yes	Variable	Yes	Single	Moderate	Low	Latency
FRDP[52]	Yes	No	(Given constant)	No	Single	High	High	Latency

注:1) path:是否确定 MDC 的路径;2) speed:是否确定 MDC 的速度;3) multihop:是否存在多跳数据传输.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

5.2 亟待解决的问题

虽然 WSN-MDC 的研究已经取得了一定的成果,但仍然有很多问题需要解决,主要体现在如下几点:

(1) 应用多样化

开发和设计更多的结合 MDC 的 WSN 应用.移动是无处不在的,任何移动物体配备数据收集装置就成为 MDC.现实生活中,手机、PDA 等手持设备使人也成为可下载数据的 MDC.无线传感器网络在战场侦察、阵地防御和情报获取等军事环境以及林场/牧场监视、灾难救护以及环境监测等民用项目中有广泛应用,通过车辆、人及特制的 MDC 等设备,使得这些应用更加可靠、有效.

(2) 节点定位

节点的定位是 WSN 应用的基础,同时也是 WSN 研究的热点与难点.传感器节点由于能量有限,无法通过 GPS 设备对其定位.而 MDC 的能量不受限制,可以为其配置 GPS 设备.此外,由于 MDC 通常沿着一定的路径移动,其位置可通过预测或动态的调整来计算.可以通过 MDC 对传感器节点进行定位,因此,MDC 为节点定位带来新的研究方向.

(3) 能耗与延时

网络的能耗与数据传输时延在 WSN-MDC 中是相互对立的.无论是给定时延要求最优化网络能耗,还是给定分簇结构,最小化时延需求,在计算几何和随机图论等数学理论上依然是 NP 难问题.如何针对具体的 WSN-MDC 应用设计出有效的算法与协议,将会是一个很有意义的研究课题.

(4) 安全性

MDC 的加入,使 WSN 成为一个异构网络.由于 MDC 具有移动性,随时有可能移出网络或重新移入网络,使得异构网络的安全性分析更为复杂.不同层次的节点在安全需求、资源限制、性能和可扩展性等多方面采用不同的安全措施,故需充分考虑数据传输过程所面临的各种安全威胁,为不同层次的节点制定有区别的安全方案.这方面的研究工作目前较为少见,是未来需要重点关注的研究方向.

(5) MDC 的控制

MDC 的移动方式与路径直接影响了网络的整体性能.然而一些移动物体,例如人或动物,其移动速度和方向几乎不受控制,即使是车辆或机器人,要对它们的速度等实现精确控制也是极其困难的.现有的研究就用折角线替代实际上平滑的拐弯线[22].需要进一步研究 MDC 的控制方式,使其更接近于实际的应用场合.

6 总 结

本文综述了无线传感器网络中加入移动数据收集器带来的网络性能方面的优化问题.对近年来出现的 WSN-MDC 相关的新思想与代表性研究成果进行归纳并加以介绍,结合策略的相关属性与性能进行了比较性总结.我们认为,得益于对 WSN 和机器人技术的研究,WSN-MDC 中对路由协议和 MDC 移动控制已有较多的研究,但是对 MDC 发现和数据传输的研究还不够深入.更重要的是,需要建立更多真实的、有意义的 WSN-MDC 应用,以便将相关算法与协议付诸实施.

致谢 在此,我们向曾经对本文提出宝贵建议的审稿专家以及加拿大圭尔夫大学的杨先一教授、美国蒙莫斯大学的王加存教授表示衷心的感谢.

References:

[1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. Computer Networks, 2002,38(4): 393−422. [doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4]

[2] Lian J, Naik K, Agnew G. Data capacity improvement of wireless sensor networks using non-uniform sensor distribution. Int'l Journal of Distributed Sensor Networks, 2006,2(2):121−145. [doi: 10.1080/15501320500201276]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[3] Olariu S, Stojmenovic I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2006. 1−12. [doi: 10.1109/INFOCOM.2006.296]

[4] Wang W, Srinivasan V, Chua KC. Trade-Offs between mobility and density for coverage in wireless sensor networks. In: Proc. of the ACM MobiCom. New York: ACM Press, 2007. 39−50. [doi: 10.1145/1287853.1287860]

[5] Dyo V, Mascolo C. Efficient node discovery in mobile wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE DCOSS. New York: ACM Press, 2008. 478−485. [doi: 10.1007/978-3-540-69170-9_33]

[6] Francesco DM, Shah K, Kumar M, Anastasi G. An adaptive strategy for energy-efficient data collection in sparse wireless sensor networks. In: Proc. of the EWSN. Springer-Verlag, 2010. 322−337. [doi: 10.1007/978-3-642-11917-0_21]

[7] Xing GL, Wang T, Jia WJ, Li M. Rendezvous design algorithms for wireless sensor networks with a mobile base station. In: Proc. of the ACM MobiHoc. New York: ACM Press, 2008. 231−240. [doi: 10.1145/1374618.1374650]

[8] Kansal A, Somasundara AA, Jea DD, Srivastava MB, Estrin D. Intelligent fluid infrastructure for embedded networks. In: Proc. of the ACM MobiSys. New York: ACM Press, 2004. 111−124. [doi: 10.1145/990064.990080]

[9] Shah RC, Roy S, Jain S, Brunette W. Data mules: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. In: Proc. of the ACM SNPA. New York: IEEE Press, 2003. 30−41. [doi: 10.1109/SNPA.2003.1203354]

[10] Li ZJ, Li M, Wang JL, Cao ZC. Ubiquitous data collection for mobile users in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2011. 2246−2254. [doi: 10.1109/INFCOM.2011.5935040]

[11] Luo J, Zhang Q, Wang D. Delay tolerant event collection for underground coal mine using mobile sinks. In: Proc. of the IEEE IWQoS. New York: IEEE Press, 2009. 1−9. [doi: 10.1109/IWQoS.2009.5201405]

[12] Chebrolu K, Raman B, Mishra N, Valiveti PK, Kumar R. BriMon: A sensor network system for railway bridge monitoring. In: Proc. of the ACM MobiSys. New York: IEEE Press, 2008. 2−14. [doi: 10.1145/1378600.1378603]

[13] Akyildiz IF, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. Ad Hoc Networks, 2005,3(3): 257−279. [doi: 10.1016/j.adhoc.2005.01.004]

[14] Dantu K, Rahimi M, Shah H, Babel S, Dhariwal A, Sukhatme GS. Robomote: Enabling mobility in sensor networks. In: Proc. of the IEEE IPSN. New York: ACM/IEEE Press, 2005. 404−409. [doi: 10.1109/IPSN.2005.1440957]

[15] Lymberopoulos D, Savvides A. Xyz: A motion-enabled, power aware sensor node platform for distributed sensor network applications. In: Proc. of the IEEE IPSN. New York: ACM/IEEE Press, 2005. 449−454. [doi: 10.1109/IPSN.2005.1440970]

[16] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, Heidemann J, Silva F. Directed diffusion for wireless sensor networking. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2003,11(1):2−14. [doi: 10.1109/TNET.2002.808417]

[17] Pon R, Batalin MA, Gordon J, Kansal A, Liu D, Rahimi M, Shirachi L, Yu Y, Hansen M, Kaiser WJ, Srivastava M, Sukhatme G, Estrin D. Networked infomechanical systems: A mobile embedded networked sensor platform. In: Proc. of the IEEE IPSN. New York: ACM/IEEE Press, 2005. 376−381. [doi: 10.1109/IPSN.2005.1440952]

[18] Zhang XW, Chen GH. Energy-Efficient platform designed for SDMA applications in mobile wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE WCNC. New York: IEEE Press, 2011. 2089−2094. [doi: 10.1109/WCNC.2011.5779476]

[19] Ma M, Yang YY. SenCar: An energy-efficient data gathering mechanism for large scale multihop sensor networks. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2007,18(10):1476−1488. [doi: 10.1109/TPDS.2007.1070]

[20] Ammari H, Das S. Data dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks: An information theoretic approach. In: Proc. of the IEEE MASS. New York: IEEE Press, 2005. 305−314. [doi: 10.1109/MAHSS.2005.1542814]

[21] Zhang XW, Zhang LL. Optimizing energy-latency trade-off in wireless sensor networks with mobile element. In: Proc. of the IEEE ICPADS. New York: IEEE Press, 2010. 534−541. [doi: 10.1109/ICPADS.2010.123]

[22] Ryo S, Rajesh KG. Optimizing energy-latency trade-off in sensor networks with controlled mobility. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2009. 2566−2570. [doi: 10.1109/INFCOM.2009.5062188]

[23] Nesamony S, Vairamuthu MK, Orlowska ME. On optimal route of a calibrating mobile sink in a wireless sensor network. In: Proc. of the IEEE INSS. New York: IEEE Press, 2007. 61−64. [doi: 10.1109/INSS.2007.4297389]

[24] Gu Y, Bozdag D, Ekici E. Mobile element based differentiated message delivery inwireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE WoWMoM. New York: IEEE Press, 2006. 83−92. [doi: 10.1109/WOWMOM.2006.73]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[25] Gao S, Zhang H, Das SK. Efficient data collection in wireless sensor networks with path-constrained mobile sinks. Mobile Computing, 2011,10(4):592−608. [doi: 10.1109/WOWMOM.2009.5282492]

[26] Shi GT, Liao MH. Movement-Assisted data gathering scheme with load balancing for sensor networks. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2007,18(9):2235−2244 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1010-9825/18/2235.htm [doi: 10.1360/jos182235]

[27] Luo J, Hubaux JP. Joint sink mobility and routing to maximize the lifetime of wireless sensor networks: The case of constrained mobility. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2010,18(3):871−884. [doi: 10.1109/TNET.2009.2033472]

[28] Xing G, Wang T, Xie Z, Jia W. Rendezvous planning in wireless sensor networks with mobile elements. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2008,7(12):1430−1443. [doi: 10.1109/TMC.2008.58]

[29] Basagni S, Carosi A, Melachrinoudis E, Petrioli C, Wang ZM. Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime. Wireless Networks, 2008,14(6):831−858. [doi: 10.1007/s11276-007-0017-x]

[30] Vlajic N, Stevanovic D, Spanogiannopoulos G. Strategies for improving performance of IEEE 802.15.4/ZigBee WSNs with path-constrained mobile sink(s). Computer Communications, 2011,34(6):743−757. [doi: 10.1016/j.comcom.2010.09.012]

[31] Gao S, Zhang HK, Xu HS. Efficient data gathering approach in sensor networks with path-fixed sinks. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2010,21(1):147−162 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/3688.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03688]

[32] Gao S, Zhang HK. Optimal path selection for mobile sink in delay-guaranteed sensor networks. Journal of Electronics, 2011,39(4):742−747 (in Chinese with English abstract).

[33] He L, Pan JP, Xu JD. A progressive approach to reducing data collection latency in wireless sensor networks with mobile elements. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2012. http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TMC.2012.105

[34] Vincze Z, Vass D, Vida R, Vidacs A, Telcs A. Adaptive sink mobility in event-driven densely deployed wireless sensor networks. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2007,3(2-3):255−284.

[35] Liang WF, Luo J, Xu X. Prolonging network lifetime via a controlled mobile sink in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE GlobeCom. New York: IEEE Press, 2010. 1−6. [doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683095]

[36] Luo J, Panchard J, Piorkowski M, Grossglauser M, Hubaux JP. MobiRoute: Routing towards a mobile sink for improving lifetime in sensor networks. In: Proc. of the IEEE DCOSS. New York: IEEE Press, 2006. 480−497. [doi: 10.1007/11776178_29]

[37] Baruah P, Urgaonkar R, Krishnamachari B. Learning-Enforced time domain routing to mobile sinks in wireless sensor fields. In: Proc. of the IEEE LCN. New York: IEEE Press, 2004. 525−532. [doi: 10.1109/LCN.2004.71]

[38] Keally M, Zhou G, Xing G. Sidewinder: A predictive data forwarding protocol for mobile wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE SECON. New York: IEEE Press, 2009. 1−9. [doi: 10.1109/SAHCN.2009.5168972]

[39] Kusy B, Lee H, Wicke M, Milosavljevic N, Guibas L. Predictive QoS routing to mobile sinks in wireless sensor networks. In: Proc. of the ACM IPSN. New York: ACM/IEEE Press, 2009. 109−120. [doi: 10.1145/1602165.1602177]

[40] Liu XX, Zhao H, Yang X, Li XL, Wang N. Trailing mobile sinks: A proactive data reporting protocol for wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE MASS. New York: IEEE Press, 2010. 214−223. [doi: 10.1109/MASS.2010.5663998]

[41] Chakrabarti A, Sabharwal A, Aazhang B. Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks. In: Proc. of the ACM IPSN. New York: ACM/IEEE Press, 2003. 129−145. [doi: 10.1007/3-540-36978-3_9]

[42] Ansari J, Pankin D, Mahonen P. Radio-Triggered wake-ups with addressing capabilities for extremely low power sensor network applications. In: Proc. of the IEEE PIMRC. New York: IEEE Press, 2008. 1−5. [doi:10.1007/s10776-009-0100-6]

[43] Yang X, Vaidya N. A wakeup scheme for sensor networks: Achieving balance between energy saving and end-to-end delay. In: Proc. of the IEEE RTAS. New York: IEEE Press, 2004. 19−26. [doi: 10.1109/RTTAS.2004.1317245]

[44] Anastasi G, Conti M, Gregori E, Spagoni C, Valente G. Motes sensor networks in dynamic scenarios: An experimental study for pervasive applications in urban environments. Int'l Journal of Ubiquitous Computing and Intelligence, 2007,1(1):9−16. [doi: 10.1166/juci.2007.002]

[45] Anastasi G, Conti M, Monaldi E, Passarella A. An adaptive data-transfer protocol for sensor networks with data mules. In: Proc. of the IEEE WoWMoM. New York: IEEE Press, 2007. 1−8. [doi: 10.1109/WOWMOM.2007.4351776]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[46] Somasundara A, Kansal A, Jea D, Estrin D, Srivastava M. Controllably mobile infrastructure for low energy embedded networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2006,5(8):958−973. [doi: 10.1109/TMC.2006.109]

[47] Anastasi G, Borgia E, Conti M, Gregori E. A hybrid adaptive protocol for reliable data delivery in WSNs with multiple mobile sinks. The Computer Journal, 2011,54(2):213−228. [doi: 10.1093/comjnl/bxq038]

[48] Zhao M, Ma M, Yang YY. Mobile data gathering with space-division multiple access in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. New York: IEEE Press, 2008. 1283−1291. [doi: 10.1109/INFOCOM.2008.185]

[49] Melodia T, Pompili D, Akyildiz IF. Handling mobility in wireless sensor and actor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2010,9(2):160−173. [doi: 10.1109/TMC.2009.102]

[50] Tseng YC, Wang YC, Cheng KY, Hsieh YY. iMouse: An integrated mobile surveillance and wireless sensor system. IEEE Computer, 2007,40(6):60−66. [doi: 10.1109/MC.2007.211]

[51] Sugihara R, Gupta RK. Optimal speed control of mobile node for data collection in sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2010,9(1):127−139. [doi: 10.1109/TMC.2009.113]

[52] Xu X, Luo J, Zhang Q. Delay tolerant event collection in sensor networks with mobile sink. In: Proc. of the IEEE Infocom. New York: IEEE Press, 2010. 2471−2479. [doi: 10.1109/INFCOM.2010.5462075]

附中文参考文献:

[26] 石高涛,廖明宏.传感器网络中具有负载平衡的移动协助数据收集模式.软件学报,2007,18(9):2235−2244. http://www.jos.org.cn/1010-9825/18/2235.htm [doi: 10.1360/jos182235]

[31] 郜帅,张宏科,徐怀松.Sink 轨迹固定传感器网络的高效数据采集机制.软件学报,2010,21(1):147−162. http://www.jos.org.cn/1000-9825/3688.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03688]

[32] 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.电子学报,2011,39(4):742−747.

张希伟(1977－),男,江苏无锡人,博士,讲师,CCF 会员,主要研究领域为无线传感器网络,移动机器人技术,网络中间件.
E-mail: zxw@hhu.edu.cn

徐力杰(1983－),男,博士生,主要研究领域为无线传感器网络,Mesh 网络.
E-mail: ljxu83@gmail.com

戴海鹏(1985－),男,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为移动传感器网络,Ad Hoc 网络.
E-mail: dhpphd2003@gmail.com

陈贵海(1963－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为分布与并行计算,网络系统,数据处理.
E-mail: gchen@nju.edu.cn

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn