

无线传感器网络中移动式覆盖控制研究综述

蒋文贤¹ 缪海星¹ 王田¹ 赖永炫² 王国军³ 贾维嘉⁴

¹(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

²(厦门大学 软件学院, 福建 厦门 361005)

³(广州大学 计算机科学与教育软件学院, 广州 510006)

⁴(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

E-mail: cs_tianwang@163.com

摘要: 在无线传感器网络中, 节点能量限制、硬件以及通信链路故障等问题, 造成网络空洞的产生且影响了网络的正常运作, 因此如何确保网络覆盖率成为传感器网络中需要解决的重要问题. 近年来, 通过引入移动节点来进行覆盖控制, 提高传感器网络的覆盖率成为一个新的研究趋势. 本文通过充分调研利用移动节点进行网络覆盖控制的方法, 并对其进行了分类和比较, 归纳了移动式网络覆盖的各种方法的特点, 分析这些方法的性能和适用范围, 总结存在的主要问题, 并指出未来的研究方向.

关键词: 无线传感器网络; 移动节点; 网络空洞; 覆盖控制

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-1220(2017)03-0417-08

Survey on Coverage Control with Mobile Elements in Wireless Sensor Networks

JIANG Wen-xian¹, MIAO Hai-xing¹, WANG Tian¹, LAI Yong-xuan², WANG Guo-jun³, JIA Wei-jia⁴

¹(Department of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

²(College of Software, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

³(School of Computer Science and Educational Software, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

⁴(Electronic Information and Electrical Engineering College, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Due to the existence problems of energy depletion, hardware failure and communication link failure and so on, which causes network holes and affects the normal network operation. The insurance of coverage becomes an urgent issue in wireless sensor networks. In recent years, a new research trend is to utilize mobile nodes for coverage control, which increases the coverage of wireless sensor networks. In this paper, we have a comprehensive investigation about the current major topology control methods with mobile nodes, and summarize the characteristics of mobile topology control methods via classification and comparison of these methods. Finally, we analyze the performances and the application scopes of these methods, summarize the main problems, and point out the future research directions.

Key words: wireless sensor networks; mobile nodes; network holes; coverage control

1 引言

无线传感器网络(WSNs, Wireless Sensor Networks)是由大量部署在监测区域内的微型传感器节点组成的自组织网络^[1]. 广泛应用于安全监控及数据传输等多个领域^[2, 3].

在WSNs中, 节点一般随机部署在相对恶劣的环境中, 并且每一个节点的能量、通信范围以及感知范围都是有限的, 因此其在工作过程中可能会因为能量有限、硬件故障、通信故障以及恶意攻击等原因而失效^[4, 5]. 传感器节点的失效会导致网络分割, 降低网络覆盖率, 从而使得WSNs生存期受到严重影响^[6]. 因此, 如何消除网络空洞以提高网络覆盖率是一个亟待解决的问题^[7]. 在传统WSNs中, 通常是增加节点数量或是使用通信能力更强的节点来实现空洞覆盖^[8, 9]. 然而这种方法因

成本有限、节点通信范围限制无法从根本上解决问题.

近几年来, 在传统WSNs中引入移动性节点^[10, 11], 使得网络配置更加灵活、可变. 比如, 调度移动节点到失效节点处以覆盖网络空洞^[12, 13]. 此外, 移动式覆盖控制方法还可以调节网络中传感器节点的分布以实现负载均衡从而延长网络的生存期. 本文对移动式覆盖网络空洞的主要方法进行调研, 并将这些方法分类比较, 归纳并分析了移动式覆盖控制方法的特点及适用范围, 提出了目前存在的主要问题, 最后探讨了未来的研究方向.

2 移动式覆盖控制问题概述及度量指标

2.1 问题描述

有效覆盖填充网络空洞是WSNs的研究热点之一. 如何

收稿日期: 2016-01-11 收修改稿日期: 2016-03-11 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61532013)资助; 国家科技支撑计划项目(2015BAH16F00/F01/F02)资助; 国家自然科学基金项目(61672441, 61572206)资助; 福建省科技计划重点项目(2014H0030)资助. 作者简介: 蒋文贤, 男, 1974年生, 硕士, 副教授, CCF会员, 研究方向为无线传感器网络; 缪海星, 男, 1991年生, 硕士研究生, 研究方向为移动计算、无线传感器网络; 王田(通信作者), 男, 1982年生, 博士, 副教授, CCF会员, 研究方向为无线传感器网络、移动计算、物联网; 赖永炫, 男, 1981年生, 博士, 副教授, CCF会员, 研究方向为机会网络、传感器网络数据管理和数据库; 王国军, 男, 1970年生, 博士, 教授, CCF会员, 研究方向为可信计算、移动计算、智能计算; 贾维嘉, 男, 1957年生, 博士, 教授, CCF会员, 研究方向为任播路由、容错计算、无线通信.

保证网络连通并消除网络空洞是提升网络生存周期的关键因素。传统的覆盖控制方法有基于功率控制和基于睡眠调度等。基于功率控制的覆盖控制是指传感器通过控制自身的功率来调节感知及通信半径以改变网络覆盖,从而满足覆盖及连通的要求。基于睡眠调度的覆盖控制是指通过唤醒冗余的传感器节点来保持网络的覆盖状态以解决节点故障产生的网络空洞问题。

近年来,向传统 WSNs 中引入少量移动节点来解决网络空洞是一大趋势。当网络中因某些节点失效而产生网络空洞时,通过调度移动节点来代替或修复失效节点。在引入了移动节点后,网络变得更加灵活,其拓扑结构也因此多变,在某种程度上能达到负载均衡的目的,进而提高了网络生存周期。

2.2 主要衡量指标

移动式覆盖控制主要有以下几种度量指标:

2.2.1 网络覆盖率

较高的网络覆盖率确保了其对网络环境中信息数据的感知和采集的完整性,因此成为网络中其他功能的基础条件,对监测区域的覆盖率越大就越能保证各项指标的性能。

2.2.2 网络连通性

网络连通性的强弱可以通过连通等级来衡量,如果任意两个节点间不相交的链路越多,其连通等级越强,相应的连通性更强。

2.2.3 最小化节点移动距离

有效调度移动节点,使节点移动距离最小化,在一定程度上能加快空洞修复速度,提升网络性能。

2.2.4 网络生存周期

节点能量是影响网络生存周期的关键因素,因此有效均衡节点间的能量,将有效延长网络生存周期。

3 存在的问题及挑战

目前对移动式覆盖控制技术的研究主要存在如下的一些问题及挑战:

3.1 如何确定合适的移动节点数量

虽然引入移动性节点可以消除覆盖空洞,但是如果移动节点过多,相应的成本代价将会变大,因此如何确定合适的移动节点数目是需要考虑的重点之一。

3.2 提高网络中节点定位精度

实际在修复覆盖空洞时,需要获知空洞乃至故障节点的位置。然而实际环境相比理想状态复杂得多,定位精度会受到各种环境因素的干扰,因此提高网络节点定位精度将会对整个 WSNs 网络具有积极意义。

3.3 节省移动节点的能量消耗

在实际网络中,移动性节点在网络中的移动并非无限制。相比普通节点,移动节点功能更强,但是其能量始终有限,在设计移动节点的调度方式时,也需要将节点的能耗纳入考虑点之一。

3.4 降低算法的复杂度

不同的 WSNs 覆盖控制技术实现的方式不同,因此算法复杂程度也有一定差别。衡量覆盖控制技术是否优化的一项

重要指标就是其算法复杂度。算法复杂度包括时间复杂度、通信复杂度以及实现的复杂度等,需要综合考虑。

4 移动式覆盖控制方法的分类

在不同的分类标准下,移动式覆盖控制存在多种分类,例如根据应用场景的不同可以分为应用于 2D 网络和应用于 3D 网络的方法等,具体分类情况如下:

4.1 基于应用场景的分类

根据应用的场景的不同,可分为应用于 2D 场景网络和应用于 3D 场景网络中的覆盖控制。应用于 2D 场景网络中的覆盖控制是指覆盖控制方法应用于模拟的 2D 场景网络中,这种网络相对比较简单。而应用于 3D 场景网络中的覆盖控制更加接近真实环境,但也比 2D 网络环境要复杂的多,因此分析及建模的难度较大,但是其应用范围却更加的广泛。

4.2 基于移动节点比例的分类

根据移动节点的占比情况,可将其分为全移动和部分移动。全移动的节点覆盖控制更加灵活、拓扑可变,但是成本也相对较高;部分移动是指由固定节点和移动节点构成的覆盖控制,相比全移动,其成本较低,但灵活、可变性不如全移动方法。

4.3 基于网络连通强度的分类

根据网络连通强度的不同,可分为 1-连通和 k-连通网络中的覆盖控制,1-连通是指在网络中任意两个节点之间至少有一条通信链路,其成本低,连通性较弱。k-连通是指要保证任意两个节点间至少有 k 条不相交的通信链路,k 值通常为 2,k 值越大,连通性越好,但网络拓扑更加复杂,相应的算法复杂度越高。

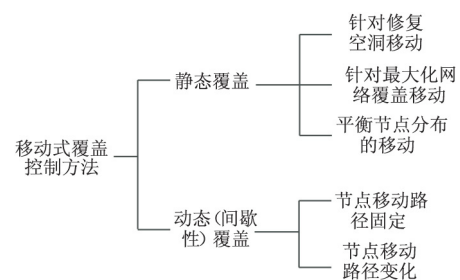


图 1 基于移动节点的覆盖控制方法分类

Fig.1 Classification of coverage control methods with mobile elements

目前已有的分类方法针对应用场景、算法类型等特性入手分类,无法体现出移动性节点在覆盖控制中所起到的作用。在充分调研各种移动式覆盖控制方法后,笔者发现基于移动节点的移动特性来分类能更加客观的归纳、总结各个方法,移动特性才是反应移动式覆盖本质特征的关键性因素。因此首先将移动式覆盖控制方法分为针对静态覆盖和针对动态(间歇性)覆盖两大类。在静态覆盖方法中,移动节点在覆盖更新节点仅移动一次。而在动态覆盖(间歇性)方法中,移动节点可以多次进行移动以更新网络中的覆盖。以这两大类为基础并根据移动特性为划分标准,可以进行进一步的细分。具体的分类如图 1 所示。本文后面的部分将根据图 1 中的分类方

法进行详细介绍。

5 典型的移动式覆盖技术方法解析

移动式覆盖技术可按照移动性节点是否一直处于运动状态(可以多次移动)分为静态覆盖和动态覆盖。静态覆盖是指移动性节点响应某种需求移动到某一个合适的位置以改善当前覆盖率,之后不再移动,不具有周期性;动态覆盖是指节点可以根据规定的时间间隔进行移动,即移动到某一位置后,还需要不断地移动以实现新的覆盖,从而使网络的覆盖状态是不断变化的,其要求监测区域在某个时间间隔内至少被覆盖一次。

5.1 静态覆盖

静态覆盖依据优化目标的不同分为针对修复空洞的移动、针对最大化网络覆盖的移动和针对平衡节点分布的移动。其中,针对修复空洞的移动方法是检测网络空洞所在的位置,然后再根据覆盖控制方法移动节点以缩小或消除空洞。针对最大化网络覆盖的移动方法的目的是最大化节点的覆盖效率,即定量的最大化节点所能完成的覆盖范围。针对平衡节点分布的移动方法主要是一种定性的、粗略的覆盖,即只保证某一大小的子区域有尽可能相同数量的节点,使得网络中的节点分布均匀。

5.1.1 针对修复空洞移动

针对修复空洞的移动方法是指当检测到网络因节点故障出现或者将要出现空洞时,利用移动性节点移动到空洞位置,以修复网络的覆盖率。

文献[14]提出了高效移动方案 EEMS (Energy-Efficient Motion Strategy)。首先将监测区域进行三角划分,以每个三角形的外接圆的圆心作为关键点。然后通过监测关键点是否处于网络节点的感知范围内来确定其周围是否存在空洞。如果关键点不在节点的感知范围内,则认为该关键点附近存在空洞。修复空洞时遵从渗透原则,按照优先修复离覆盖区域最近的关键点的原则来确定需要修复的关键点位置序列,然后利用贪婪算法将移动节点依次与这些关键点匹配以得到最优的调度方案。如此一来缩短了节点平均移动距离,同时降低了能耗。该方法的缺点是算法是中心式的,需要全局的网络信息,因此应用到大规模的网络有一定难度。

文献[15]提出了一种基于哈密顿回路的蛇形移动节点控制策略 SCRP (snake-like cascading replacement process) 实现完全覆盖。首先建立一个网格监测模型,如图 2 所示,在每个网格内选举一个节点作为头节点监测相邻网格。所有网格的头节点形成一个有向的哈密顿回路。当某个网格内头节点发生故障时,则其哈密顿回路上前一网格中的移动节点沿着回路移动到此网格中来充当头节点,依次向前类推。只需要局部网络拓扑,算法复杂度低。其缺点是空网格附近网格中的移动节点需要沿着回路才能移动到空网格中,使其移动距离和能耗大大增加。

文献[16]基于 Voronoi 图检测空洞,设计了控制节点移动的分布式协议 VEC (VEctor-Based), VOR (VORonoi-Based) 和 Minimax。主要思想是通过传感器节点不断地迭代移动到达最终合适的位置,在每一次迭代中,传感器会通过

Voronoi 图检测覆盖空洞。如果空洞存在,则计算出一个目标位置并移动到该位置修复空洞。全移动节点的网络配置,导致能量消耗高。

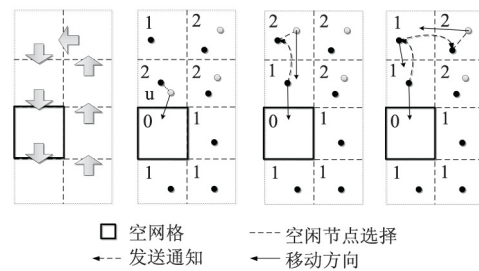


图 2 空网格在哈密顿圈上的位置及节点的移动响应
Fig. 2 Vacant grid, its location along the Hamilton cycle, and the mobile response of the nodes

文献[17]针对节点的移动能力有限提出了 DCM (Dynamic Coverage Maintenance) 方案,利用初始部署的覆盖冗余完善网络覆盖。当节点发生故障造成覆盖空洞时,空洞周围的邻居节点会根据自身的覆盖冗余决定朝向空洞移动的距离,进而缩小空洞乃至消除空洞。利用空洞周围邻居节点移动,缩短了节点移动距离,节约了能耗。

文献[18]提出了四种分布式部署策略完善网络覆盖。其中最大最小顶点和最大最小边算法分别最大化 Voronoi 中节点到顶点和边的最小距离。VEDGE 算法是前两种算法的结合。最小最大边算法是最小化 Voronoi 图中节点到边的最大距离。当检测到 Voronoi 图中的空洞时,节点根据以上算法以一个合适的方向移动来最小化空洞。这些都是建立在对网络进行多边形划分的基础上对节点进行重定位来最大化网络覆盖。文中所提出的算法是分布式的,适用于大规模网络。覆盖率提升了,但移动节点数量过多。

文献[19]提出了一种针对网络中空洞的检测和修复的综合方案 HEAL (holes detection and healing)。方案分为两个阶段,第一阶段包含三个子任务:空洞识别,空洞发现和边缘检测。这个阶段提出了一个基于 GG (Gabriel graph) 图的分布式空洞检测算法 DHD (distributed hole detection)。第二阶段包含两个子任务:空洞区域确定和节点重定位。该阶段提出了一个基于虚拟力的修复算法,只有距离空洞合适距离的节点参与修复,空洞的中心与参与空洞修复的节点间存在吸引力。方法可以精确地定位了空洞所在的位置,节约了修复代价(节点移动距离)。

文献[20]提出了一种利用机器人协助节点重定位以感知并修复空洞的方法 R3S2 (Randomized Robot-assisted Relocation of Static Sensors)。机器人在监测区域进行随机移动,移动过程中通过本地通信发现网络中的空洞以及冗余传感器节点,然后将冗余的传感器节点迁移至空洞的位置修复空洞。机器人是移动随机的,因此算法复杂度低,但是空洞的发现效率不高,且消耗了不必要的能量。

针对修复空洞的移动式覆盖控制方法首先检测空洞的位置,其次根据空洞的位置选择合适的移动节点对空洞进行修复。这一类方法的思路较为简单,重点是如何准确定位空洞

且优化移动节点的调度使得修复的效率更高.

5.1.2 针对最大化网络覆盖移动

针对最大化网络覆盖的移动式覆盖控制方法的目的是最大化地提高节点的工作效率,即最大化节点所能覆盖的范围.尽可能地较少节点间的覆盖重叠使之达到有限节点数所能达到的最大覆盖.

文献[21]所提出的VFA(virtual force algorithm)算法是一种经典的覆盖算法.如图3所示,将网络中的节点视为带电粒子,在节点通信范围内存在排斥力和吸引力,并设定一个距离阈值 $d_{th} < r$ 通信.当节点间的距离大于 d_{th} 时就会产生吸引力从而收缩覆盖范围,当节点间的距离小于 d_{th} 就会产生排斥力从而扩张覆盖范围.在图3中以节点S1为例,节点S1与S2的距离大于 d_{th} ,节点S1受到节点S2的吸引力F12作用,节点S1与S3的距离小于 d_{th} ,S1受到S3的排斥力F13的作用.节点在吸引力与排斥力的作用下进行移动最终达到一个平衡状态,从而使网络达到一个最大且节点分布均匀的覆盖.但是该方法一般适用于节点分布密集的网络,很难通过定量的理论证明最终的覆盖性能.

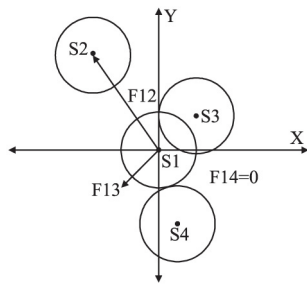


图3 四个节点虚拟力示意图

Fig.3 An example of virtual forces with four sensors

文献[22]提出了基于最小覆盖重叠MCO(Minimum Coverage Overlap)的分布式移动部署算法.传感器节点根据其覆盖情况,计算覆盖重叠变化因子,并向覆盖重叠减小最快的方向移动.通过算法的不断迭代运行,节点之间的覆盖重叠不断减小,从而保证传感器网络的覆盖范围得到有效的改善.考虑了节点的移动距离,降低了一定的网络能耗.该部署方案实现了网络覆盖的最大化,不过其是根据局部信息决策的,从而导致节点分布的密度不均.

文献[23]提出了适应多个被监测目标不同覆盖质量要求的多重覆盖算法WMCA(weighted multiple coverage algorithm)在虚拟力算法(VFA)的基础上,在保证网络覆盖的同时,实现了不同目标的不同覆盖率需求,兼顾了网络覆盖质量和网络资源的优化.不过由于要考虑不同的覆盖需求,使得算法的复杂度较高.

文献[24]提出了传感器移动方案MBA(Mobile Barrier Algorithm),实现了栅栏覆盖的最大化及移动距离最小化.栅栏覆盖考虑的是在目标穿越监测区域时受到有效的监控,一般是传感器节点排列成一条相互重叠的链并横跨整个监测区域.算法定义了若干栅栏点并确保移动节点可以到达这些点,然后利用最大流算法生成一个最优的移动方案.优点是利用移动节点有效改善了覆盖率,但是中心式算法需要全局网络信息,容易造成网络能量消耗不均衡.

文献[25]提出了利用移动节点的部署来解决点覆盖和网络连通问题.针对点覆盖问题有两个启发式算法,分别是基于团划分的算法和基于多边形划分的TV-greedy(target based Voronoi greedy)算法.针对网络连通性问题,该文献提出了结合有限边长度的施泰纳树方案.该文献是结合以上两种方案来解决移动传感器节点部署问题.优点是算法复杂度接近最优,但是中心式的算法不适用于大规模网络.

文献[26]考虑节点自我部署问题,围绕点覆盖建立了F-Converge评价标准.部署传感器节点于等边三角形划分区域,并提出了两种局部化方案:GA(Greedy Advance)和GRG(Greedy-Rotation-Greedy).GA是节点贪婪式地朝着"感兴趣的点"接近,GRG是指当节点朝着"感兴趣的点"移动时,若遭到阻碍就绕行.

文献[27]认为移动节点的移动次数和范围是有限的,并提出了一种能保证k-重覆盖的传感器节点密度.还提出了一种分布式重定位算法DMA(Distributed Mobility Algorithm),只利用局部网络信息就可以重定位自身并描述算法计算复杂度和信息开销.对于移动节点的数量进行评估,降低了移动节点的数目.

文献[28]针对定位误差对栅栏覆盖的影响提出一种容错的栅栏覆盖方法FTBC(Fault Tolerant Barrier Coverage).文献对两个固定节点之间的真实距离与测量距离的关系进行分析并推导出移动节点的最小数量以确保两个固定节点之间区域的覆盖,并提出了容错加权图来对栅栏覆盖形成问题进行建模.缺点是在确定移动节点数量时没有考虑到移动的成本.

文献[29]提出了一种解决点覆盖问题的方案CPI(Covering Points of Interest).假设网络由移动节点和一个基站组成,在最初部署状态,基站与每个节点都相互连通.每个节点都朝着"感兴趣的点"移动,其独立进行移动决策,不过在移动过程中需要保持同邻居节点的连通.缺点是节点频繁地调度算法增加了能耗.

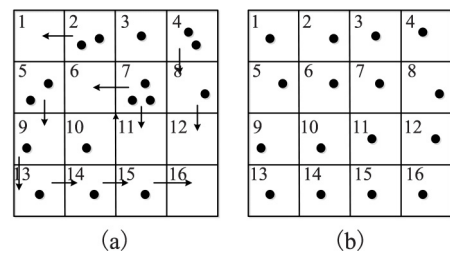


图4 最优移动方案

Fig.4 Optimal movement plan

最大化网络覆盖的移动式覆盖控制方法的目标是尽可能地最大化节点的覆盖范围,减少节点间的覆盖重叠.但是这类方法大部分都认为节点间是连通的,对网络连通性的考虑不是很全面.

5.1.3 平衡节点分布的移动

平衡节点分布的移动覆盖控制是定性的、粗略的覆盖,是保证某一大小的子区域内有尽可能相同数量的节点.根据某种算法对网络进行覆盖控制使得网络中的节点分布尽量均匀,以达到尽量均衡网络覆盖的目的.与上一节的主要区别

是提供一种粗粒度的均衡性覆盖.

文献 [30] 提出了一种传感器节点有限移动的部署方案 FBSM(Flip-Based Sensor Mobility) 如上页图 4 所示, 将网络划分为网格结构. 有限移动体现在节点只能上、下、左、右移动, 并只能移动到相邻网格. 在部署节点后, 首先每个节点会向基站发送自身的位置信息, 基站根据这些信息建立一个虚拟图, 通过虚拟图确定移动方案来实现覆盖的最大化以及移动次数最小化. 限制了移动节点的能量, 最小化了能量消耗. 该方法的目标是使网络中节点分布尽量均匀, 无法应用于有特殊要求的网络模型中.

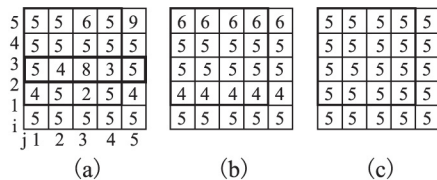


图 5 SMART 扫描调度过程

Fig. 5 Scan scheduling processes of SMART

SMART(scan-based movement-assisted sensor deployment method) 方法^[31]重点考虑的是传感器节点均匀分布问题. 如图 7 所示, 先随机部署传感器节点, 扫描节点的分布情况得到图 5 (a), 对图 5 (a) 进行依次进行行调整和列调整分别得到图 5 (b) 和图 5 (c) 的结果, 这样就得到了一个均匀的网络分

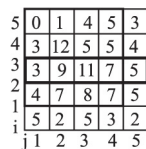


图 6 初始网络分布图

Fig. 6 Initial distribution network

布图. 根据得到的分布图调度节点的移动使节点在监测区域分布均匀以达到一个负载平衡的状态, 但是在一些情况下某些网格之间的负载还是有所差距的.

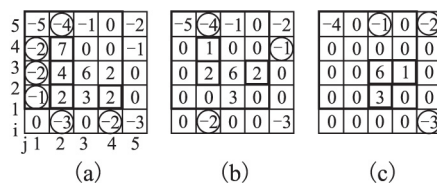


图 7 局部匈牙利算法

Fig. 7 Local Hungary algorithm

文献 [32] 提出了一种基于局部匈牙利算法 LHS(Local Hungarian Solution) 的传感器节点协同移动部署方案. 匈牙利算法是解决二分图匹配问题的, 在这里将 WSNs 的分布均衡问题转化为二分图, 只需要局部的网络信息来实现传感器节点的均匀分布, 节点移动次数少, 节约了能耗. 如图 6 所示是一个初始的网络分布图, 图 7 是调用局部匈牙利算法三次迭代的结果. 图 7 (a) 将图 6 中的每个网格减去一个均值得到的, 正数网格付出节点, 负数和 0 网格会接受节点, 该算法达到的节点平衡效果优于 SMART 算法.

这类移动式覆盖控制方法考虑了节点分布均衡的问题, 使得节点在网络中的分布均匀. 尽可能地均衡网络的通信、计算等能量消耗, 延长网络的生存期.

上述的这类移动式覆盖控制方法面向的都是静态式的覆盖, 移动性节点响应式地移动无周期性. 在这类方法中当节点故障较多时若想得到较好的故障修复效果就需要较多的移动式节点, 增加了网络的成本.

5.2 动态(间歇性)覆盖

动态覆盖是指网络中用于故障修复的移动性节点周期性地移动以满足网络的覆盖需求. 这类方法充分利用了节点的移动性, 减少了移动性节点数量, 降低了网络成本. 动态(间歇性)覆盖根据节点是否沿着固定的路径移动又分为移动路径固定和移动路径变化两类覆盖方法. 移动路径固定是指移动性节点在网络中进行监测任务时其移动路径是固定不变的, 即只能沿着既定的路径移动. 移动路径变化是指移动节点的路径在监测过程中可以根据需求实时发生变化.

5.2.1 节点移动路径固定

节点移动路径固定的覆盖方式是指移动节点的移动路径是固定不变的, 即在网络区域中移动节点的移动路径确定后节点即沿着此路径移动, 在整个网络生命期中路径不再改变.

文献 [33] 提出了扫描覆盖(Sweep coverage) 的方法. 不同于传统的覆盖, 扫描覆盖只需要周期性地监测"感兴趣的点". 因此只需要少量的移动节点就可以监测大量"感兴趣的点"从而实现扫描式覆盖. "感兴趣的点"间利用 TSP(Traveling Salesman Problem) 算法建立路径之后进行分片, 每一片由一个移动节点负责监测. 优点是每一片由一个移动节点负责, 并且有对节点的数量进行最小化的考虑, 减少了移动节点数量. 缺点是周期性的监测使得节点移动频率高, 因此增加了能耗.

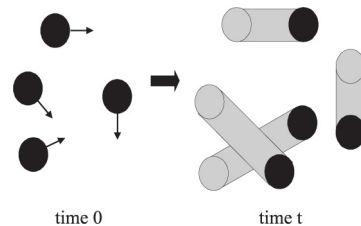


图 8 不同时间点的覆盖情况

Fig. 8 Coverage conditions of different time

文献 [34] 针对点覆盖提出了一种移动节点部署方案 CM(Circular movement). 该方案利用沿着环形路径移动且速度可变的传感器节点实现对多监测点的覆盖. 通过在移动中发现"感兴趣的点"并相应调整速度以满足覆盖和连通性的限制. 优点是同时考虑了连通性和覆盖要求, 缺点是没有考虑到节点的能耗问题.

节点移动路径固定的覆盖方式可以周期性地对网络进行检测并修复故障, 可以实现对网络故障的最大化检测和修复, 但是其需要移动节点频繁地进行移动, 增加了网络能耗.

5.2.2 节点移动路径变化

节点移动路径变化的覆盖方式是指移动性节点的移动路径不是固定不变的, 而是在监测过程中能够根据具体的需求不断地生成、变化. 这种方法可以根据网络中故障发生的不同

同位置不断地调节移动节点的移动路径以取得最优的故障修复效果。

文献[35]提出了基于入侵者和传感器节点之间零和博弈的纳什均衡 NEZG(Nash equilibrium of the zero-sum game) 的动态覆盖策略。如上页图 8 所示,在不同的时间点网络呈现出不同的覆盖情况。该策略用监测时间间隔表示监测区域在某个时间间隔内必须受到监测,用覆盖保持时间表示覆盖在一段时间内不发生变化。优点是最大化了一定时间间隔内的覆盖以及最小化监测到入侵者的时间,减少了需要的移动节点数。缺点是节点移动频繁能耗较大。

文献[36,37]提出了 ADIP(autonomously decide its path) 方法。移动节点根据周围节点与固定节点的信息协同确定一个目标点,通过路径规划算法决策一条在给定时间间隔内到达目标点的路径,并在移动过程中收集固定节点所未监测区域的信息,从而完善网络覆盖。相比固定路径的算法提升了覆盖率,节约了移动节点数。

文献[38]提出三种随机移动 RW(Random Walk) 模型,分别是直线移动、圆弧移动和曲线移动。通过在节点满足均匀分布和节点满足泊松分布的网络环境中进行实验来说明明文中方法能够提高覆盖效率,并且将移动性从2D平面拓展到

表1 移动式覆盖控制方法

Table 1 Coverage control algorithms with mobile elements

方法	覆盖特性	移动节点比例	是否追求多重覆盖	最小化节点移动距离	方法性质	节点移动方式	2D 还是 3D 覆盖	覆盖类型	多移动节点协作
EEMS [14]	静态覆盖	部分移动节点	否	有	中心式	自由移动	2D	区域覆盖	无
SCRIP [15]	静态覆盖	全移动节点	否	取平均	分布式	固定路径	2D	区域覆盖	有
VEC, VOR and Minimax [16]	静态覆盖	全移动节点	否	有	分布式	自由移动	2D	点覆盖	有
DCM [17]	静态覆盖	全移动节点	否	有	分布式	受限移动	2D	区域覆盖	有
VEDGE [18]	静态覆盖	全移动节点	否	-	分布式	受限移动	2D	区域覆盖	有
HEAL [19]	静态覆盖	全移动节点	否	有	分布式	受限移动	2D	区域覆盖	有
R3S2 [20]	静态覆盖	部分移动节点	否	有	分布式	自由移动	2D	区域覆盖	无
VFA [21]	静态覆盖	全移动节点	否	-	中心式	受限移动	2D	区域覆盖	有
MCO [22]	静态覆盖	全移动节点	否	有	分布式	自由移动	2D	区域覆盖	有
WMCA [23]	静态覆盖	全移动节点	是	有	中心式	自由移动	2D	区域覆盖/点覆盖	无
MBA [24]	静态覆盖	全移动或部分移动	否	有	中心式	受限移动	2D	栅栏覆盖	无
TV-greedy [25]	静态覆盖	全移动节点	否	有	中心式	受限移动	2D	点覆盖	无
GA and GRG [26]	静态覆盖	全移动节点	否	-	分布式	自由移动	2D	点覆盖	有
DMA [27]	静态覆盖	部分移动节点	是	有	分布式	受限移动	2D	区域覆盖	无
FTBC [28]	静态覆盖	部分移动节点	否	有	中心式	自由移动	2D	栅栏覆盖	无
CPI [29]	静态覆盖	全移动节点	否	-	分布式	受限移动	2D	点覆盖	有
FBSM [30]	静态覆盖	全移动节点	否	有	中心式	受限移动	2D	区域覆盖	无
SMART [31]	静态覆盖	全移动节点	否	有	混合式	自由移动	2D	区域覆盖	有
LHS [32]	静态覆盖	全移动节点	否	有	分布式	自由移动	2D	区域覆盖	有
Sweep coverage [33]	动态(间歇性)覆盖	部分移动节点	否	有	中心式/分布式	固定路径	2D	点覆盖	有
CM [34]	动态(间歇性)覆盖	全移动节点	否	无	分布式	固定路径	2D	点覆盖	有
NEZG [35]	动态(间歇性)覆盖	部分移动节点	否	-	分布式	随机移动	2D	区域覆盖	无
ADIP [36] [37]	动态(间歇性)覆盖	部分移动节点	否	有	分布式	自由移动	2D	区域覆盖	无
RW [38]	动态(间歇性)覆盖	全移动节点	否	无	分布式	随机移动	3D	区域覆盖	无
CSP [39]	动态(间歇性)覆盖	全移动节点	否	有	分布式	自由移动	2D	栅栏覆盖	有

3D 空间。但是移动的模型比较简单且都带有随机参数,增加了一些不必要的移动消耗,同时对覆盖效率存在负面影响。

文献[39]尝试通过动态调度传感器节点来完善在节点较少情况下的栅栏覆盖。首先设计周期性监测调度算法 PMS(periodic monitoring scheduling) 利用移动性节点沿着警戒线进行周期性监测。基于这个算法又提出协同传感器巡逻算法 CSP(coordinated sensor patrolling) 来完善栅栏覆盖。这种算法利用节点移动性和过去入侵者的到达信息来完善覆盖。

这类实现动态覆盖类型的移动式覆盖控制方法与之前的

方法相比有一定的新颖性,减少了网络中节点的数目。然而节点的移动相对比较频繁,因此还需要考虑能量的优化问题。

6 现有方法的比较及分析

由于实际环境因素的复杂性,WSNs 的应用场景也不尽相同。移动式连通控制方法呈现出多样性特点,表1为基于本文的分类方法对移动式覆盖控制方法各种性能指标的比较。

表1展示了针对网络覆盖的移动式覆盖控制方法的特

点 通过分析比较我们可以看出:

1) 对于 3D 场景网络的覆盖控制方法相对较少

在 2D 场景网络中,移动节点是在平面上移动的;在 3D 场景网络中,移动节点的移动可能是在曲面或者更加复杂的移动区域中.因此 3D 场景网络相对于 2D 场景网络在算法的设计上更加地复杂.

2) 可以满足多重覆盖要求的移动式覆盖控制方法不多

实现网络区域中的多重覆盖可以很好的避免网络中的节点故障等原因引起的网络性能降低,然而实现多重覆盖需要更多的传感器节点,算法复杂度相比只追求最大化网络覆盖的算法也更高.随着网络规模的增大,导致多重覆盖的实现也变得更加困难.

3) 多数移动式覆盖控制算法的类型都是分布式的

随着 WSNs 规模的增大,中心式方法的缺点越来越突显.这时候分布式方法的效果反而更优.根据这一趋势,设计分布式的移动式覆盖控制方法会是一个主流.

4) 大部分是移动式覆盖控制方法追求的是静态覆盖

静态覆盖的方法比较容易实现且其复杂度也相对较低,运动式的覆盖是一种比较新颖的覆盖类型,但是移动节点移动过于频繁会导致能耗过高.如果移动节点的能耗问题得到解决,这一类覆盖方法也会成为比较好的选择.

5) 大部分算法是基于全移动节点的应用场合

通过确定合适的移动节点数量完成覆盖控制任务,有利于节约网络的能耗.不对移动节点的数量进行评估从而导致移动节点数量过多则浪费资源,移动节点数量太少则不足以完成覆盖控制任务.

7 总结与展望

在 WSNs 应用中,由于节点能量有限、硬件故障以及通信瓶颈等问题的存在,网络拓扑结构很容易发生改变导致覆盖空洞的产生,对整个网络造成无法估量的损失.近几年来,向传统 WSNs 中引入功能较强的移动节点,为解决网络空洞注入了新的活力.本文对目前利用移动节点的主流网络覆盖方法进行了详细的分类和比较,归纳、总结了其性能和使用范围,指出了当前的方法存在的主要问题.最后探讨了未来的研究方向:

1) 设计综合考虑多种指标的方法

现有的多数方法一般都只重点考虑其中一个性能指标,因此在提及其它方面指标时显得比较局限.而在实际应用中,需要多方面的、综合的覆盖控制需求,其各性能指标均具有不同的现实意义,因此考虑多种指标(如上文提到的四类挑战性指标)的移动式覆盖控制方法能更好地应用与实际中.

2) 研究面向 3D 场景网络的方法

目前已有的移动式覆盖控制方法大多都是针对 2D 场景网络,针对 3D 场景网络的方法比较少.由于 3D 场景的网络相比 2D 场景的网络更加的复杂,目前大部分移动式覆盖控制方法还无法应用于 3D 场景的网络中.随着 WSNs 应用范围的进一步扩大,研究适应 3D 场景的移动式覆盖控制方法比较有现实意义,因此如何将 2D 场景中的方法拓展到 3D 场景将是一个重要的研究方向.

3) 将原有的中心式方法拓展为分布式方法

在小规模网络中,中心式的覆盖控制方法的性能优于分布式方法,但是在实际的大规模网络中,节点的移动需求更大,导致其计算量突增,其缺点也越发突显.相比中心式方法,分布式方法可以进行同步调度,具有更好地适应性,因此使用分布式移动覆盖将是未来研究的考虑点之一.

4) 研究针对运动式覆盖的控制方法

运动式覆盖作为一种新颖的覆盖方式,针对这种方式的覆盖控制方法不多.这类方法的特点是利用节点的移动性,周期性地对网络中的关键区域/关键点进行监测,有效地减少传感器节点的数量,使 WSNs 的监测调度更加地灵活.但是,由于运动过于频繁使得其实现的难度相对较大,移动节点能耗较高.因此还需要通过进一步的研究来缓解或者消除这些瓶颈以更好的使用运动式覆盖的覆盖控制方法.

5) 考虑移动节点间的协同合作机制

相比普通节点,移动节点的计算等各项功能都更强,通过移动节点间的相互合作,设计一个整体调度的最优策略,不仅可以合理利用移动节点以防重复调度,还能减少网络整体开销.

6) 考虑实际部署感知模型优化问题

目前的传感器节点的感知模型大多使用的都是比较规则的图形如圆形或多边形,但是在实际的部署环境中会面对各种因素的干扰造成感知区域并非规则的.因此针对不同的应用场景还需要进一步地考虑更加完善的感知模型.

References:

- [1] Wang Wen-hua, Wang Tian, Wu Qun, et al. Survey of delay-constrained data collection with mobile elements in WSN [J]. Journal of Computer Research and Development 2016, 53(11): 1-19.
- [2] Wang Tian, Peng Zhen, Liang Jun-bing, et al. Following targets for mobile tracking in wireless sensor networks [J]. ACM Transactions on Sensor Networks 2016, 12(4): 31.
- [3] Wang Tian, Jia Wei-jia, Zhong Bi-meng, et al. BlueCat: an infrastructure-free system for relative mobile localization [J]. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks 2015, 29(1-4): 133-152.
- [4] Li Wen-feng, Fu Xiu-wen. Survey on invulnerability of wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Computers 2015, 38(3): 625-647.
- [5] Mahapatro A, Khilar P M. Fault diagnosis in wireless sensor networks: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 2000-2026.
- [6] Zhu Chuan, Zheng Chun-lin, Shu Lei, et al. A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks [J]. Journal of Network and Computer Applications 2012, 35(2): 619-632.
- [7] Wang Huan-zhao, Meng Fan-zhi, Li Zeng-zhi. Energy efficient coverage conserving protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Software 2010, 21(12): 3124-3137.
- [8] Zhang Xin-ming, Zhang Yue, Yan Fan. Interference-based topology control algorithm for delay-constrained mobile ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing 2015, 14(4): 742-754.
- [9] Torkestani J A. An adaptive energy-efficient area coverage algorithm for wireless sensor networks [J]. Ad Hoc Networks 2013, 11(6): 1655-1666.
- [10] Wang Tian, Peng Zhen, Chen Yong-hong, et al. Heterogeneous wireless sensor networks for continuously tracking mobile targets [J]. Journal of Chinese Computer Systems 2015, 36(3): 503-507.
- [11] Wang Tian, Peng Zhen, Liang Jun-bin, et al. Detecting targets based

- on a realistic detection and decision model in wireless sensor networks [M]. *Wireless Algorithms, Systems, and Applications*. Springer International Publishing, 2015: 836-844.
- [12] Wang Liang-min, Li Fei, Qin Ying. Resilient method for recovering coverage holes of wireless sensor networks by using mobile nodes [J]. *Journal on Communications* 2011, 32(4): 1-8.
- [13] Yang Kai, Liu Quan, Zhang Shu-kui, et al. Hole recovery algorithm based on mobile inner nodes in wireless sensor networks [J]. *Journal on Communications* 2012, 33(9): 116-124.
- [14] Zhang Zhen-jiang, Fu Jun-song, Chao Han-Chieh. An energy-efficient motion strategy for mobile sensors in mixed wireless sensor networks [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 2013.
- [15] Jiang Z, Wu J, Kline R, et al. Mobility control for complete coverage in wireless sensor networks [C]. 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, IEEE, 2008: 291-296.
- [16] Wang G, Cao G, La Porta T. Movement-assisted sensor deployment [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 2006, 5(6): 640-652.
- [17] Sekhar A, Manoj B S, Murthy C S R. Dynamic coverage maintenance algorithms for sensor networks with limited mobility [C]. Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, IEEE, 2005: 51-60.
- [18] Mahboubi H, Moezzi K, Aghdam A, et al. Distributed deployment algorithms for improved coverage in a network of wireless mobile sensors [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 2014, 10(1): 163-174.
- [19] Senouci M R, Mellouk A, Assoune K. Localized movement-assisted sensor deployment algorithm for hole detection and healing [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 25(5): 1267-1276.
- [20] Li X, Fletcher G, Nayak A, et al. Randomized carrier-based sensor relocation in wireless sensor and robot networks [J]. *Ad Hoc Networks* 2013, 11(7): 1951-1962.
- [21] Zou Y, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces [C]. IEEE International Conference on Computer Communications on Institute of Electrical Engineers, IEEE, 2003, 2: 1293-1303.
- [22] Gong Wei-bin, Chang Yi-lin, Shen Zhong, et al. Mobile deployment based on minimum coverage overlap in wireless sensor networks [J]. *Journal of System Simulation* 2008, 20(13): 3604-3609.
- [23] Liu Li-ping, Li Gui-dan, Wang Zhi, et al. A weighted multiple coverage algorithm in wireless sensor networks [J]. *Journal of Tianjin University* 2009, 42(4): 309-315.
- [24] Saipulla A, Liu B, Xing G, et al. Barrier coverage with sensors of limited mobility [C]. Proceedings of the Eleventh ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. ACM, 2010: 201-210.
- [25] Liao Zhuo-fan, Wang Jian-xin, Zhang Shi-geng, et al. Minimizing movement for target coverage and network connectivity in mobile sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 2014, 26(7): 1971-1983.
- [26] Li X, Frey H, Santoro N, et al. Strictly localized sensor self-deployment for optimal focused coverage [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 2011, 10(11): 1520-1533.
- [27] Srinivasan W W V, Chua K C. Trade-offs between mobility and density for coverage in wireless sensor networks [C]. Proceedings of the 13th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, ACM, 2007: 39-50.
- [28] Wang Z, Chen H, Cao Q, et al. Fault tolerant barrier coverage for wireless sensor networks [C]. 2014 Proceedings IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2014: 1869-1877.
- [29] Erdelj M, Razafindralambo T, Simplot-Ryl D. Covering points of interest with mobile sensors [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 2013, 24(1): 32-43.
- [30] Chellappan S, Bai X, Ma B, et al. Mobility limited flip-based sensor networks deployment [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2007, 18(2): 199-211.
- [31] Yang Shu-hui, Li Ming-lu, Wu Jie. Scan-based movement-assisted sensor deployment methods in wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 2007, 18(8): 1108-1121.
- [32] Yang Shu-hui, Wu Jie, Dai Fei. Localized movement-assisted sensor deployment in wireless sensor networks [C]. IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, IEEE, 2006: 753-758.
- [33] Li Mo, Cheng Wei-fang, Liu Ke-bin, et al. Sweep coverage with mobile sensors [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(11): 1534-1545.
- [34] Erdelj M, Loscri V, Natalizio E, et al. Multiple point of interest discovery and coverage with mobile wireless sensors [J]. *Ad Hoc Networks* 2013, 11(8): 2288-2300.
- [35] Liu B, Dousse O, Nain P, et al. Dynamic coverage of mobile sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 2013, 24(2): 301-311.
- [36] Lambrou T P, Panayiotou C G. Improving area coverage using mobility in sensor networks [C]. Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems and Computing: Theory and Applications (ISYC'06), 2006: 1-8.
- [37] Lambrou T P, Panayiotou C G, Felici S, et al. Exploiting mobility for efficient coverage in sparse wireless sensor networks [J]. *Wireless Personal Communications* 2010, 54(1): 187-201.
- [38] Liu Xiao-yang, Wu Kai-liang, Zhu Yan-min, et al. Mobility increases the surface coverage of distributed sensor networks [J]. *Computer Networks*, 2013, 57(11): 2348-2363.
- [39] He Shi-bo, Chen Ji-ming, Li Xu, et al. Cost-effective barrier coverage by mobile sensor networks [C]. 2012 Proceedings IEEE Conference on Computer Communications, IEEE, 2012: 819-827.

附中文参考文献:

- [1] 王文华, 王田, 吴群, 等. 传感网中时延受限的移动式数据收集方法综述 [J]. *计算机研究与发展* 2016, 53(11): 1-19.
- [4] 李文锋, 符修文. 无线传感器网络抗毁性 [J]. *计算机学报*, 2015, 38(3): 625-647.
- [7] 王换招, 孟凡治, 李增智. 高效节能的无线传感器网络覆盖保持协议 [J]. *软件学报*, 2010, 21(12): 3124-3137.
- [10] 王田, 彭臻, 陈永红, 等. 异构无线传感器网络对移动目标的连续跟踪 [J]. *小型微型计算机系统*, 2015, 36(3): 503-507.
- [12] 王良民, 李菲, 秦颖. 基于移动节点的无线传感器网络覆盖洞修复方法 [J]. *通信学报*, 2011, 32(4): 1-8.
- [13] 杨凯, 刘全, 张书奎, 等. 利用移动内点来修复传感器网络空洞的算法 [J]. *通信学报*, 2012, 33(9): 116-124.
- [22] 公维宾, 常义林, 沈中, 等. 传感器网络中基于最小覆盖重叠的移动部署 [J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(13): 3604-3609.
- [23] 刘丽萍, 李桂丹, 王智, 等. 无线传感器网络多重覆盖算法 [J]. *天津大学学报*, 2009, 42(4): 309-315.