

有向传感器网络覆盖控制算法*

陶丹^{1,2+}, 马华东²

¹(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

²(北京邮电大学 计算机学院 智能通信软件与多媒体北京市重点实验室, 北京 100876)

Coverage Control Algorithms for Directional Sensor Networks

TAO Dan^{1,2+}, MA Hua-Dong²

¹(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

²(Beijing Key Laboratory of Intelligent Telecommunications Software and Multimedia, School of Computer Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

+ Corresponding author: E-mail: dtao@bjtu.edu.cn, http://eaie.bjtu.edu.cn

Tao D, Ma HD. Coverage control algorithms for directional sensor networks. Journal of Software, 2011, 22(10): 2317-2334. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4080.htm

Abstract: Coverage control is a fundamental problem for wireless sensor networks, which has been explored thoroughly in the networks based on an omni-directional sensing model. Recently, thanks to the introduction of image/video, infrared, ultrasound sensors, coverage control algorithms for directional sensor networks have drawn more attention and have become a focus. This paper starts from the concept and characteristics of directional sensing model, and then summarizes the current research progresses at home or abroad. The study also classifies and summarizes the basic coverage control theories and algorithms in the context of directional sensor networks. Finally, the paper points out the open research problems to be solved and the future trends.

Key words: directional sensor network; directional sensing model; image/video sensor network; coverage control; coverage optimization

摘要: 覆盖控制是传感器网络的基本问题之一, 基于全向感知模型的覆盖控制的研究已经积累了丰富的成果。近年来, 得益于图像/视频、红外、超声波等传感器的引入, 有向传感器网络覆盖控制问题得到广泛关注并发展成为研究热点。从有向感知模型及其特点入手, 综述了该领域国内外的研究进展, 着重分类讨论有向传感器网络覆盖控制的基本理论和算法。最后提出当前亟待解决的问题, 并对其未来的发展趋势进行展望。

关键词: 有向传感器网络; 有向感知模型; 视频传感器网络; 覆盖控制; 覆盖优化

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

传感器网络覆盖控制是在满足一定网络覆盖前提下, 通常以延长网络工作寿命为核心设计目标, 兼顾感

* 基金项目: 国家自然科学基金(60833009); 国家重点基础研究发展计划(973)(2011CB302701); 国家杰出青年科学基金(60925010); 高等学校博士点新教师类基金(20100009120004); 中央高校基本科研业务费(2011JBM011); 智能通信软件与多媒体北京市重点实验室开放课题

收稿时间: 2010-12-05; 定稿时间: 2011-06-20

知、监视、传感和通信等多种服务质量,通过网络传感器节点调度以及路由选择等手段,最终形成优化的网络结构.给定一个传感器网络,覆盖控制也可以一般性地总结为通过各个传感器节点协作而达到对监视区域的不同管理或感知效果^[1],它是整个环境监测任务得以有效开展的前提和基础.

目前,覆盖控制研究引起了研究学者的广泛关注,并针对不同监测需求研究出一系列行之有效的方法^[1-4].从当前可获取的资料来看,绝大多数覆盖控制研究是针对基于全向感知模型(omni-directional sensing model)的传统传感器网络展开的^[5],即网络中节点的感知范围是一个以节点为圆心、以其感知距离为半径的圆形区域.全向感知模型可以有效地刻画温度、湿度、光强等简单传感器节点对环境数据的感知能力,然而这种具有全方位感知能力的感知模型相对简单且理想化,不能很好地适用于实际传感器网络监测环境对感知模型多样化的需求.就日益广泛普遍使用的图像/视频传感器、麦克风、红外、超声波传感器而言,它们对环境数据的感知受“视域(field of view,简称 FoV)”的限制,具有方向特性,这是与传统传感器节点相区别的一个显著感知特征.实际上,有向感知模型也是传感器网络中的一种典型的感知模型^[6],具体来讲,节点的感知范围是一个以节点为圆心、半径为其感知距离的扇形区域.由基于有向感知模型的传感器节点所构成的网络称为有向传感器网络(directional sensor network,简称 DSN)^[7].在很多实际监测应用(尤其是针对复杂、敌对或人员不可达环境的监测)中,有向传感器网络情况不能预先确定,初始部署大都采用抛洒、投掷、喷射等随机部署策略,节点分布的随机性容易导致网络中节点分布不合理.同时,由于有向传感节点的感知角度受限,即使是分布在同一地理位置上的两个有向传感节点,也会因其感知方向的不同而导致对某一目标覆盖能力上存在很大差异.现有基于全向感知模型的覆盖控制理论成果不能直接应用于有向传感器网络,迫切需要设计出相适应的覆盖控制理论方法.

近年来,一些国内外学者开展了有向传感器网络覆盖控制方面的探索性研究,陆续在 IEEE 系列会议(如 INFOCOM, GLOBECOM, ICC, SECON 等)、ACM 传感器网络相关会议(MOBICOM, SENSYS 等)发表了一系列前沿的研究成果.自 2006 年起,多个国际知名学术期刊,如 IEEE Trans. on Computer, IEEE Trans. on Wireless Communication, IEEE Trans. on Vehicular Technology 以及国内一类学术刊物《软件学报》、《电子学报》等也陆续刊出了有向传感器网络覆盖控制方面的文章成果.来自美国伦斯勒理工学院^[8]、威斯康星大学^[9]、德克萨斯 A&M 大学^[10-13]、北卡罗来纳州立大学^[14]、纽约州立大学石溪分校^[15,16]、加拿大卡尔顿大学^[17-19]、宾夕法尼亚州立大学^[20,21]等高校的学者陆续开展了该领域的探索.我国学者也十分重视这个领域的前沿研究,北京邮电大学智能通信软件与多媒体北京市重点实验室^[7,22-27]率先提出有向传感器网络的概念并发表了一系列研究成果,上海交通大学^[28-30]、国防科学技术大学^[31-36]、北京交通大学^[37-39]、南京邮电大学^[40]、香港理工大学^[41,42]等纷纷开展相关的科研工作.目前,有向传感器网络覆盖控制理论研究还不够成熟,基础理论与实际应用之间存在着较大的差距.本文综述了近年来这一领域的国内外研究状况,针对有向传感器网络覆盖控制基本理论和典型算法进行了全面介绍和深入讨论,并指出当前亟待解决的问题和未来的发展趋势.

1 有向感知模型

设计合理的感知模型以充分刻画有向节点的方向性感知功能,是研究有向传感器网络覆盖控制算法的理论基础^[43].目前的有向感知模型主要分别从感知区域和感知能力两方面进行刻画.

1.1 感知区域

为便于抽象,有向传感节点的感知模型通常被定义在二维空间.Ma 等人^[6,7]设计了一种有向感知模型,如图 1(a)所示,利用扇形对有向传感节点的方向性感知能力进行抽象.有向感知模型由一个四元组表示,其中, $P(x,y)$, R, \vec{V}, α 分别表示有向传感节点的 2D 位置坐标、感知半径、感知方向(单位向量)和感知夹角.判别位于点 P_1 的目标是否被有向传感节点覆盖的简单方法是:若 $\|\overline{PP_1}\| \leq R$ 且 $\overline{PP_1} \cdot \vec{V} \geq \|\overline{PP_1}\| \cdot \cos \alpha$, 则点 P_1 被有向传感节点覆盖;否则,覆盖不成立.当 $\alpha = \pi$ 时,传统的全向感知模型是有向感知模型的一个特例.另外, Makhoul 等人^[44]和 Adriaens 等人^[9]也先后提出利用三角形和凸多边形来近似地刻画节点的有向感知能力,主要表征参数与前述类似.

监测应用需求对有向传感节点的感知能力提出了更高的要求,鉴于二维模型的空间局限性及与三维真实

场景之间的差异, Ma 等人^[27]设计了具有广泛应用意义的三维模型, 可以用一个五元组表示: 包括节点的 3D 位置坐标 $P(x,y,z)$ 、感知半径 R 、感知方向 $\vec{D} = (dx, dy, dz)$ (以固定三维空间定点任意旋转) 以及感知夹角 α 和 β , 如图 1(b) 所示。

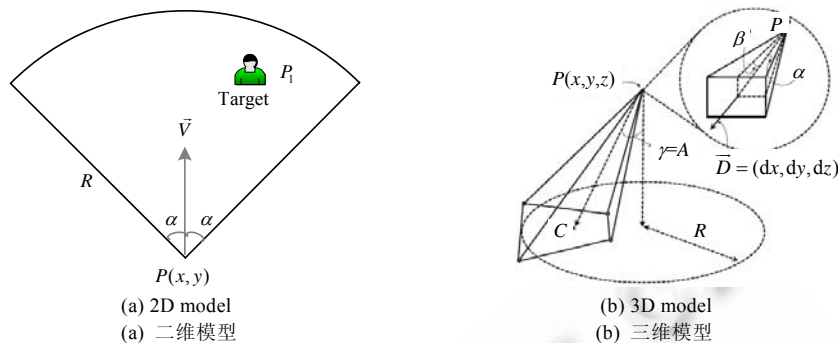


Fig.1 Classification by sensing space
图 1 按感知区域分类

考虑在一些附加硬件设备(如云台)的支持下, 有向传感节点可以调节切换到不同的感知方向, 且每个方向覆盖有限角度的感应范围。随着有向传感节点感知方向的不断调整(即绕定点旋转), 有向传感节点有能力覆盖到其传感距离内的所有圆形区域。在基本 2D 模型的基础上, Ai 等人^[8]和 Tao 等人^[23]通过引入时间参数 t , 分别定义具有不同调节能力的模型。两者的区别在于视域旋转角度调节步长的差异: (a) 步长固定为 2α , 调节前后感知范围彼此不重叠; (b) 步长随机变化, 调节前后感知范围可重叠。如图 2 所示。

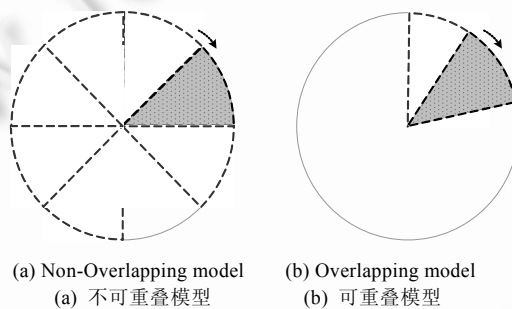


Fig.2 Two kinds of directional tunable sensing models
图 2 两种方向可调有向感知模型

表 1 对两种有向感知模型的特点及适用场景进行了归纳。在实际应用中, 我们可以根据具体的监测需求酌情选取适合的感知模型。

Table 1 Comparison between two kinds of directional tunable sensing models

表 1 两种方向可调有向感知模型对比

Classification	Feature	Scenario
Non-Overlapping model	Advantages: This model is simple. The calculation amount for adjusting directional sensor nodes' sensing orientations is small and can be set in advance. Based on this model, solution has a less computing complexity, and can get complete solution space using the exhaustion and greedy method. Disadvantages: This model cannot nicely reflect the real sensing ability of directional sensor nodes, which will cause insufficient precision of network coverage optimization.	This model is suitable for discrete target detection, and can be regarded as a special case of the overlapping model.
Overlapping model	Advantages: This model can meet the "glance" feature of directional sensor nodes, and accord with the actual operation requirements. Based on this model, the precision of network coverage optimization will be higher. Disadvantages: The calculation amount for adjusting directional sensor nodes' sensing orientations is large, solution has a higher computing complexity and cannot easily get complete solution space.	This model is suitable for high-precision area coverage, point coverage and barrier coverage.

Fusco 等人^[16]则开展了持续旋转感知模型的探索性研究,即有向传感节点在监测过程中以固定的角速率持续绕轴旋转,而不只是节点感知方向一次或多次调整旋转.此类感知模型刻画了一种更为复杂的节点感知情况.

1.2 感知能力

有向传感模型最初假设为布尔模型^[5],具体来说:只有落在节点感知区域内的点才能被该节点覆盖,目标被感知的概率均取值为 1;否则,均取值为 0.然而在实际应用中,目标被感知到的概率不是这么简单,而是由目标到节点间距离、节点物理特性等诸多因素决定的变量.由此产生概率感知模型,根据节点对目标监控区域内的不同目标点的监测贡献量来定义感知强度^[33,34].可见,布尔模型是概率模型在理想环境中的一种简化.

图 3 对现有研究成果所采用的有向感知模型进行了总结,图中数字代表采用相应模型的参考文献编号.

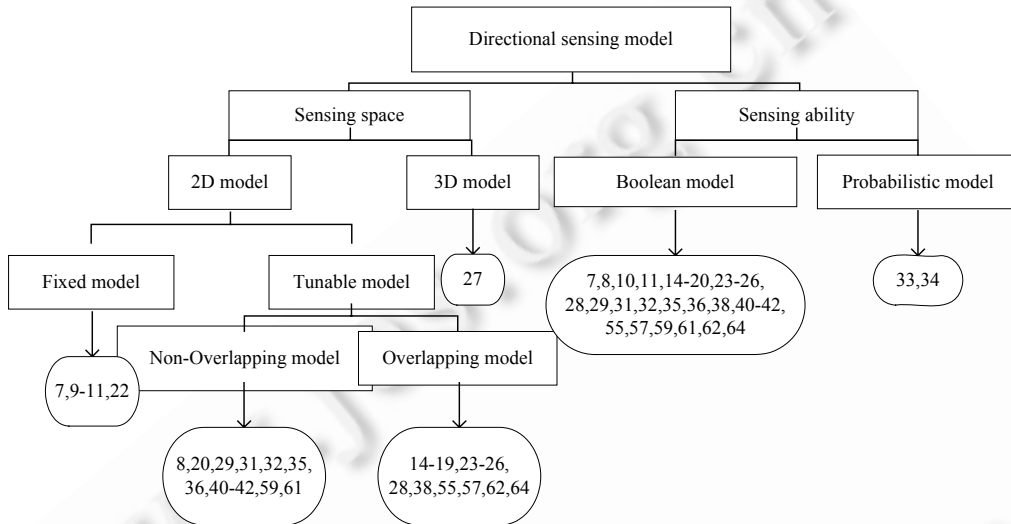


Fig.3 Classification of directional sensing model

图 3 有向感知模型分类

综上分类,我们可以总结有向传感节点的特性.有向传感节点包含属性(property)和行为(behavior)两方面特性^[45],如图 4 所示.属性包括定义有向传感节点的基本要素:感知半径、感知方向、感知夹角、视域以及通信半径等.行为则包括运动(motility)和移动(mobility)两种:运动是指有向节点在物理位置固定的前提下,其感知半径、感知方向和感知夹角具有灵活调节的能力;移动是指有向节点具有位置改变的能力.也正是有向传感节点所具有的这些属性和行为,赋予有向传感器网络覆盖控制理论及算法研究以全新的内涵和形式.

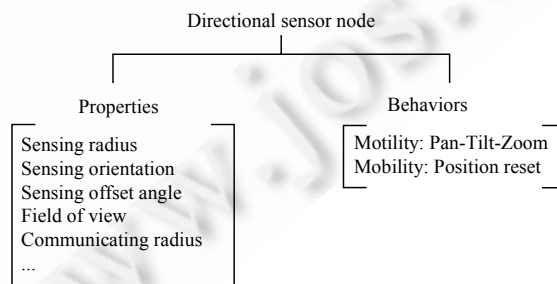


Fig.4 Features of a directional sensor node

图 4 有向传感节点特性

2 覆盖控制方法

为了使有向传感器网络有效地完成目标监测和信息获取任务,必须保证有向传感节点的部署能够有效地覆盖被监测的区域或目标.作为网络应用的基础,节点部署的优劣直接影响着网络监测信息结果的准确性和精确性.目前,有向传感器网络的节点部署策略主要包括随机部署(random deployment)和计划部署(planned deployment)两种^[5]:(1) 随机部署策略被认为是易于实现和价格低廉的,对于预先未知或人为不可达的监测区域,采用这种方式也是最为合理的.目前,绝大多数研究都基于此类部署方式.监测区域中节点呈随机分布,如均匀分布、泊松分布;(2) 计划部署是遵循预先需求有计划地部署传感器节点,在监测现象的高发区或者关键区域增加节点的部署密度,通常针对特定的用途,例如目标 K 覆盖、边境/公路沿线的监测任务.最为经典的艺术馆走廊问题(art gallery problem),要求设计监控艺术馆走廊中任意点所需要的最少传感器节点的部署策略.相比于随机部署,计划部署有助于极大地降低网络中多节点间感知重叠区域,节约网络节点成本.

可见,节点部署策略将直接影响到网络覆盖控制算法的设计.目前,研究者就覆盖控制理论及算法开展了一系列探索性研究,通过合理选择节点部署策略,优化节点数目及布局,以最大限度地利用和整合有向传感器网络资源.通常采用以下 5 种方法优化控制有向传感器网络覆盖性能,图 5 说明了各种覆盖控制方法的基本思想:

- 图 5(a)为冗余部署情况下,用 6 个节点覆盖 3 个目标;
- 图 5(b)为通过节点运动方式,用 2 个节点覆盖 3 个目标;
- 图 5(c)为若新增右上角目标 1 个,则通过节点移动方式,用 2 个节点覆盖 4 个目标;
- 图 5(d)为若新增右上角目标 1 个,则通过添加新节点方式,用 4 个节点覆盖 4 个目标;
- 图 5(e)为混合策略下,静态+动态节点、PTZ 摄像头+广角摄像头等组合模式.

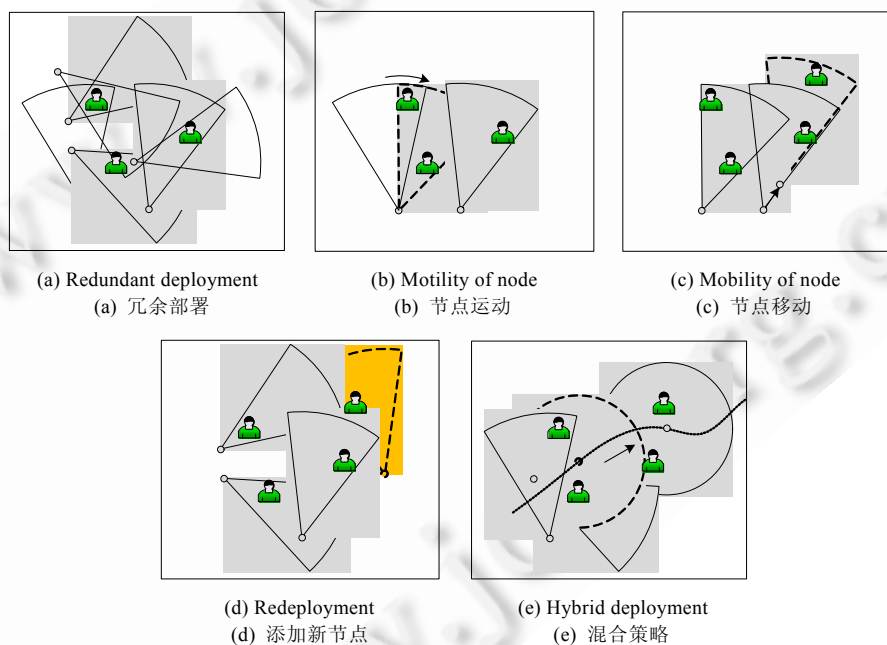


Fig.5 Coverage control methods of directional sensor networks

图 5 有向传感器网络覆盖控制方法图示

2.1 冗余部署

由于传感器网络通常工作在复杂的环境下,因此大都采用随机冗余部署方式.冗余部署是以牺牲整个网络节点成本为代价来获得理想的网络覆盖性能.然而,大规模随机冗余投放方式很难一次性地将数目众多的节点

放置在适合的位置,很容易造成网络覆盖的不均衡(比如局部区域节点分布过密或过疏),进而形成感知重叠区和盲区^[24].覆盖控制增强通常通过切换节点工作状态(活跃/休眠)^[38,40,46]以利用最少活跃节点维持满足需求的网络覆盖性能,进而延长网络工作寿命.这种覆盖增强方法的优点是简单,易于实现,缺点是网络部署成本相对较高.

2.2 节点运动

充分考虑到有向传感节点感知属性的可调节特性,大部分现有研究成果基于二维空间感知模型开展此类覆盖控制算法的研究.考虑在一些附加硬件设备(如云台)的支持下,通过调整有向节点的感知方向获得网络覆盖质量的改善^[8,15,23,24,29],以合理优化网络中有向节点布局,降低相邻多个节点间的感知冗余.文献[27]率先探讨了基于三维空间的感知模型,通过动态调节 PTZ 摄像头的推拉摇移,实现监测区域覆盖性能的增强.部分研究成果通过改变有向传感节点的感知半径 R 和感知夹角 α (综合表现为有向节点视域 FoV 改变)来增强对目标点的监测^[18,19].

2.3 节点移动

引入节点移动是解决传感器网络覆盖完整性及连通性,均衡网络能耗的一种有效方法.即使是冗余部署或节点运动方式,网络中个别节点也会因能量耗尽或外界破坏而失效,进而破坏网络覆盖连通性并形成网络覆盖空洞,最终导致网络无法正常地完成监测任务.在这种情况下,最直接的方法是短距离范围内移动覆盖空洞附近的节点对盲区进行修补性覆盖.在传统传感器网络领域,已提出了利用节点移动改善网络覆盖性能的算法^[47-49],但利用有向传感节点移动的研究成果并不多见,仅在文献[50]中有所涉及.节点移动方法虽然可以显著地改善网络覆盖性能,但其缺点在于网络能耗代价大且节点移动需要外界设备辅助.实验结果表明,节点移动 1m 消耗的能量是传输 1KBytes 所消耗能量的约 30 倍^[45].

2.4 添加新节点

节点移动方法通常只能在有限的范围内实现,因为现实场景下节点移动距离过长很容易造成节点的能量耗尽或者意外死亡^[23].这时,也可以通过额外部署新节点的方式增强网络覆盖性能.考虑到随机部署大多采用的是飞机抛洒或者人为部署方式,添加新节点势必要启动新一轮的部署行为,带来二次部署代价.另外,二次部署也会引起非覆盖空洞区域内更多冗余节点的出现,增加网络节点成本.特别地,需要额外设计相应的算法以实现所需添加新节点数目及其相应的部署位置等信息的预先估算.

2.5 混合策略

通常,网络初始部署的节点是静态分布的,这一特性确保传感器网络的稳定性和健壮性.相对地,移动节点则能很好地适应网络拓扑结构的动态变化,灵活地实现区域中热点目标的跟踪监测.越来越多的研究工作混合使用这两种部署策略,构成混合型传感器网络(hybrid sensor network)^[51].混合策略通过在监测区域中部署异构节点来实现全方位多粒度覆盖,具体表现在节点感知属性、能量、移动能力等方面存在着差异.在以图像/视频传感器网络为基础的监控系统中常采用混合策略,例如在目标区域中混合部署静态低成本摄像头和动态高性能摄像头^[52]、PTZ 摄像头和广角摄像头^[53]等异构传感器节点联合开展监测.

3 覆盖控制算法设计要素

传感器网络覆盖控制算法的应用,有助于网络资源的优化、节点能量的控制、感知质量的提高和工作寿命的延长,但另一方面也会带来网络相关传输、管理、存储和计算等代价的提高^[3].有别于传统传感器网络,有向传感器网络覆盖控制理论及算法是一个全新的研究领域,需要综合权衡以下设计要素:

(1) 模型准确性

与覆盖控制问题直接相关的是传感器节点感知模型.设计合理的感知模型以刻画节点的感知能力和感知特性,是研究有向传感器网络覆盖控制理论及算法的模型基础.目前,有向传感节点感知模型多为二维空间的布

尔模型.真实监测场景使得有向节点感知模型变得复杂,甚至于对场景三维空间的立体覆盖及不规则表面覆盖等.感知模型对节点真实感知能力刻画的准确性将直接影响到覆盖控制算法的实用性和有效性.

(2) 覆盖完整性

对监测区域、目标及兴趣点的实施全力覆盖是对以传感器网络为基础的监控系统的基本要求,也是评价传感器网络所能提供 QoS 的重要指标之一.由于有向传感器网络中节点对环境感知能力的有向性,节点感知范围不再是简单规则的圆形区域,使得传统以选择休眠或唤醒节点来重新调整传感节点的布局保证覆盖性能的调度算法不再适用,同时给利用节点运动和移动的覆盖控制方法带来了不小的挑战.如何基于相对不规则的有向感知模型实现不同应用场景的覆盖完整性需求,成为首要需要考虑的问题.

(3) 能量有效性

实际应用的环境条件复杂且大多不允许对节点更换或补充电池能量,如何减少节点的能量消耗、延长整体网络的工作寿命,仍是有向传感器网络的重要性能指标之一.现有的基于有向感知模型设计的覆盖控制算法通常节点分组轮流工作(即寻找最小节点集)、休眠冗余节点等方法降低整体网络的能量消耗.对于有向传感器网络最具代表性的图像/视频传感系统,为确保实现对大信息量、大数据量多媒体信息的有效采集、传输和处理,设计能量有效的覆盖控制算法具有至关重要的现实意义.

(4) 通信连通性

通信连通性直接决定了有向传感器网络感知、监视、传感、通信等各种服务质量.在有向传感器网络中,覆盖性和连通性的关联不比传统传感器网络中的紧密.例如,两个具有相同覆盖区域的图像/视频节点可能相隔较远,不同于传统的标量传感节点仅捕获邻近区域的数据,它们是通过动态调整节点通信区域半径和角度以来实现通信能力的补偿.可见,在满足网络覆盖完整性的同时兼顾通信连通性,不失为一种灵活的选择^[39].

(5) 网络动态性

网络动态性包含两方面含义:网络本身和网络的监测目标.传感器网络多应用于移动目标的监控,由此而产生的移动目标监测、网络动态覆盖等问题,这就需要网络的覆盖控制算法考虑节点可能的工作状态切换、物理位置移动、感知能力变化、新节点加入/旧节点失效,以及网络多节点间协作的整体动态特性.节点的物理运动和移动通常会比其他活动消耗更多的网络能量^[54],因此,在设计此类覆盖控制算法及协议时要权衡网络动态性与能量消耗之间的关系.

(6) 网络异构性

通常,有向传感器网络中部署了多种感知能力异构的传感器节点联合实施场景监测.网络中节点性能的异构保证了监测任务的灵活性和多样性,在达到同样甚至更高监测能力的情况下,降低了网络设备的总体造价^[5].相比之下,在异构网络环境下研究覆盖控制算法的难度相当大,需要兼顾传感器网络中的诸多异构特性,比如,各类节点间传感模型的不同、各类监测数据信息含量的不同、各类节点间资源/能力的差异等.

(7) 算法复杂性

覆盖控制算法实现方式的多种多样直接导致相应的算法复杂性也存在较大差别,算法复杂性同时也受到监测需求、网络资源(采集、传输、处理)等综合因素的影响.衡量有向传感器网络覆盖控制算法是否优化的一项重要标准就是其算法复杂度,对节点有向感知区域的近似和计算、动态调整等的引入,势必会造成算法复杂度(包括时间、通信以及实现复杂度等)的大幅度增加,这就需要综合设计集中式、分布式或混合式算法.

(8) 算法精确性

由于受实际部署条件差异、网络资源有限和覆盖目标特性等多方面的影响,使得覆盖控制在很多情况下是一个 NP 完全问题,只能达到近似优化覆盖,势必会造成覆盖控制算法执行结果产生误差,甚至不能保证算法的有效执行及获得全解空间^[3].如何减小误差、提高算法的精确性,依旧是有向传感器网络覆盖控制算法设计中的一个重要因素.

(9) 算法可扩展性

保证传感器网络的可扩展性是覆盖控制的另一项关键需求.由众多冗余节点所构成的有向传感器网络,具

有规模大、拓扑动态变化等显著特点,额外部署新节点、节点能量及工作状态的改变、外界环境因素干扰等都会对网络拓扑产生很大影响.没有网络可扩展性保证,网络的性能会随着网络规模的增加而显著降低.这就要求覆盖控制算法具有很好的扩展性,以灵活地适应不同的传感器网络规模及监测应用需求.

4 典型覆盖控制理论及算法

本节针对有向传感器网络中典型的覆盖控制理论及算法进行分类和总结.作为一种监测应用密切相关技术,有向传感器网络中覆盖控制问题已不仅仅是单纯的覆盖含义,更与能量节约、目标探知、路径规划等具体应用紧密关联.按照有向传感器网络的监测应用类型,本文将有向传感器网络覆盖控制问题的理论研究分为 4 大类:区域覆盖(area coverage)、目标(点)覆盖(target/point coverage)、栅栏覆盖(barrier coverage)和连通覆盖(connectivity coverage),并逐一归纳相关的研究成果.

4.1 区域覆盖

区域覆盖是最为常见的一种覆盖问题,主要用于对某个区域实施监测.有向传感器网络覆盖控制理论研究也是从区域覆盖开始.理想情况下,即要求目标区域内的每一点至少被一个传感器节点覆盖;其现实意义在于实现监测目标区域的最大化覆盖.

Tao 等人^[23]利用图论和计算几何方法,设计了一种集中式区域覆盖优化算法.汇聚节点需要了解网络全局拓扑信息,并负责计算覆盖优化策略.为节约节点能量,网络中所有节点并发地进行感知方向的一次性重置.通过定义“邻接点”概念将网络分而治之为若干个传感连通子图(sensing connected sub-graph,简称 SCSG).随后,为每个 SCSG 由外(层)到内(层)建立多层凸壳集,并调整节点感知方向,使之与凸壳边线夹角平分线相重叠,实现两凸包夹层区域的覆盖.算法复杂度为 $O(n^2)$, n 为节点总数.集中式方法的优势在于:将能量受限网络中网络覆盖增强问题集中在资源丰富的汇聚节点上处理,有效避免了网络节点间实时交换数据能量的消耗问题.但这种集中式方法也存在明显的局限性:(1) 必须获取网络全局拓扑信息;(2) 对于节点的失效、退出或新节点的加入都很敏感,需要重新计算调整方案,不是很适用于大规模拓扑结构频繁变化的网络;(3) 未能充分考虑到多节点间的覆盖关联,对有向传感器网络覆盖性能的改善相对有限.

鉴于此,研究人员大都倾向于设计分布式算法,即在各节点上独立计算的分布式决策过程,利用节点本身及其与邻居节点间的交互数据.在文献[23]研究的基础上,Kandath 等人^[55]提出了一种简化的分布式 Face-Away 算法,节点首先确定小于感知半径 R 范围内的所有节点(而不是 $2R$),并依次建立两点间连线,确定连线所构成的最大角度平分线作为调整后的感知方向(即找到感知半径 R 范围内节点密度最小的方向).该方法的优点在于兼顾了节点密度分布的影响,简化了覆盖优化方案的计算复杂度.以上利用图论和计算几何方法从纯粹的图形角度解决区域覆盖优化问题,总体来看计算量偏大,而且优化精确性不高.

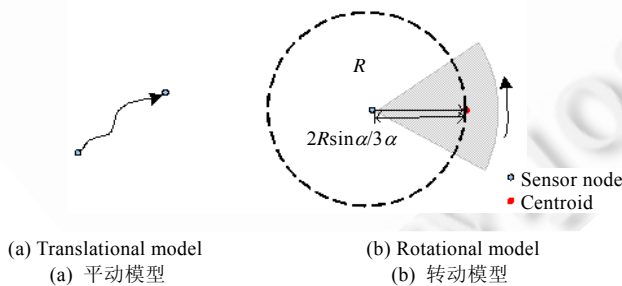


Fig.6 Moving models of sensor node

图 6 传感器节点的运动模型

传感器节点感知方向的转动,如图 6 所示.质心点所受合力是其受到相邻多个质心点排斥力的矢量和,众多质心点在虚拟斥力作用下作扩散运动,受到运动学和动力学的双重约束而趋于平衡,降低冗余覆盖的同时逐渐实现整个区域的充分高效覆盖.Zhao 等人^[57]开展了延续性探讨,假设节点受到邻近节点的斥力作用,同时受到来自区域

虚拟势场(virtual potential field)的概念最初应用于机器人的路径规划和障碍躲避^[56],Tao 等人^[24]尝试将这个概念引入到有向传感器网络的覆盖控制中来.基于传感器节点位置不变、感知方向可调的假设,通过引入“质心(centroid)”的概念,一个均匀扇形感知区域的质心点位于其感知方向上且与圆心距离为 $2R \sin \alpha / 3$,将有向传感器网络区域覆盖增强问题转化为质心均匀分布问题,以质心点作圆周运动代替传感器

中为被覆盖区域(利用“虚拟负质心”近似替代)的引力作用,有向传感节点在虚拟斥力和引力的共同作用下进行调整,使得节点更快地避开密集区域调整到覆盖盲区.

Cheng 等人^[31,36]研究“最大有向区域覆盖(maximum directional area coverage,简称 MDAC)”问题,并证明 MDAC 是一个 NP-完全问题.他们提出一种分布式贪心算法 DGreedy,通过局部选择覆盖区域最大的方向来获得 MDAC 问题的一个次优解.在此基础上,利用局部迭代计算的可能覆盖贡献比例来反映网络拓扑信息,提出一种增强的 PGreedy 算法使得覆盖区域最大,并证明了算法可在有限时间内终止.由于 PGreedy 算法具有快速的收敛性,其额外开销也较小.TeSCAN 等人^[14]考虑区域中存在障碍物的情况,设计一种仅利用节点局部信息(邻居节点及障碍物)的分布式算法,通过调节节点感知方向避让障碍物的同时,最小化相邻节点的非覆盖区域以及共同覆盖区域,最终实现有向传感节点的区域高效覆盖.与集中式算法相比,这种可扩展的分布式算法更加适合拓扑动态变化的大尺度有向传感器网络,获得较高的覆盖优化精确性,且具有良好的鲁棒性.

能量是传感器网络设计中首要关注的问题之一.目前,针对区域覆盖问题提出了一些能量有效的覆盖控制策略,即在不影响网络覆盖性能的情况下,休眠部分冗余节点以实现网络整体资源的优化利用.Pescaru 等人^[46]提出动态评价体系,依据剩余能量及相邻节点间覆盖重叠面积,某节点可能被判定为冗余节点进入休眠状态.当某工作节点能量即将耗尽时,它优先唤醒覆盖重叠面积比自己更高的节点参与监测;如果没有满足条件的节点,则会通过查找覆盖重叠列表(overlap table)唤醒“最合适”的节点参与监测任务.基于计算几何中的 Voronoi 图** (简称 V 图),Li 等人^[40]设计了一种贪心近似算法,解决如何利用最少数目活跃节点实现网络区域覆盖最大化问题.算法的基本思想是:引入一个可获得全局拓扑信息的移动辅助节点,让其沿着 V 图的边(即覆盖最薄弱区域)移动,若发现其当前未被任何活跃节点所覆盖,则启动唤醒机制,让距离 V 图边欧氏距离最短的一个休眠节点进入活跃状态,并调整该节点的感知方向,使得其感知扇形区域可以覆盖到移动辅助节点,进而增强网络区域覆盖性能.

传感器网络通常被布设在真实的三维空间场景中,Ma 等人^[27]开展了空间覆盖研究方面的研究,提出在三维感知模型设计的基础上基于虚拟力分析的区域覆盖增强算法.考虑到质心点受到合力作用后进行调整,很难建立优化目标与调整参数之间的关系,无法实现最优化区域覆盖,文献[27]进一步提出基于模拟退火(simulated annealing,简称 SA)的 SA-ACE 算法实现全局覆盖优化,通过建立能量函数,在优化算法实现过程中对优化质量和运行时间(即迭代次数)这两方面的性能进行折衷,以获得在现有节点布局空间内的区域覆盖最优解.

4.2 目标(点)覆盖

目标(点)覆盖是对监测区域内的有限个离散目标(点)进行监测,研究目的在于保证每个目标(点)至少被一个节点所覆盖.当大规模密集型节点随机部署时,可通过覆盖每个传感器位置来近似给定区域内所有点的覆盖,此时,区域覆盖问题也可用目标(点)覆盖近似表示.可见,目标(点)覆盖控制方法与区域覆盖方法相类似,不同点在于:目标(点)覆盖只需要邻居节点集合信息;而区域覆盖还需要几何/方向等方面的数据^[58].

Ai 等人^[8]率先基于不可重叠的感知模型,研究离散目标的最少节点最大覆盖(maximum coverage with minimum sensors,简称 MCMS)问题.即,通过重新确定节点感知方向,利用最少数目的有向传感节点实现最多的目标覆盖,如图 7 所示.首先证明 MCMS 问题可以归结为经典的 MAX_COVER 问题,因而也是一个 NP 完全问题.Ai 等人分别设计整数线性规划方法(integer

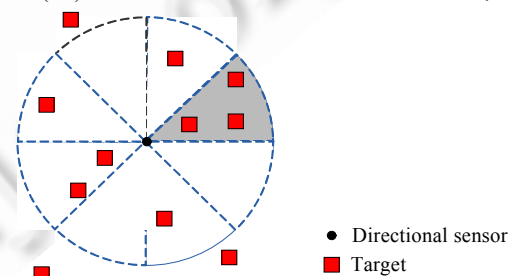


Fig.7 Target coverage using centralized greedy algorithm

图 7 集中式贪心算法实现目标覆盖

** Voronoi 图和 Delaunay 三角网多用于求解点集或其他几何对象与距离有关的问题,具有可将平面区域离散为简单几何单纯体的良好性质,因此,在传感器网络覆盖问题,尤其是在栅栏覆盖问题研究中被广泛采用.本文第 4.3 节将予以详细介绍和说明.

linear programming,简称 ILP)、集中式和分布式两种贪心算法来解决 MCMS 问题.虽然 ILP 方法可以找到节点感知方向的最优取值,但 ILP 方法不适用于大规模传感器网络情况.考虑到利用线性规划松弛算法对设计分布式算法效果不够突出,他们提出多项式时间的启发贪心式算法以近似求解 MCMS 问题.集中式贪心算法的基本思想是:在每一轮中,优先选择当前未被激活节点中所能覆盖目标数目最大的节点及其相应的感知方向.在图 7 所示的图例中,阴影扇形区域是节点当前的感知区域,其所能覆盖的目标数目最大($=3$),因此节点的感知方向被如此设定.当所有目标均被覆盖或者所有节点均被激活时,算法终止.在分布式贪心算法中,每个节点都有唯一变量标识——优先级(priority).节点会判定其两倍感知半径内所有邻居节点的优先级大小,具有最高优先级的节点最先确定感知方向.虽然分布式算法优化性能略逊于集中式算法,但其具有计算复杂度低、通信量少等优势.随后,Osais 等人^[17,18]和 Wang 等人^[30]分别设计了 ILP 方法和基于优先级的遗传算法.与文献[8]不同,其目标是寻求最少节点实现对区域中所有目标的覆盖.

Cai 等人^[29,42]开展了有向多覆盖集(multiple directional cover sets,简称 MDCS)问题的研究,即找到若干个感知不相交的覆盖集,使得该覆盖集中有向传感节点对区域中目标实现完全覆盖,通过多覆盖集轮流工作的方式延长网络工作时间.他们证明,MDCS 问题是 NP 完全问题,并基于混合整数规划方法提出了渐进的集中式启发式算法.算法包括冲突感知方向消除及感知方向选择等步骤,以针对性地解决一个节点在同一覆盖集中有两种或两种以上感知方向备选的情况.Cai 等人设计了在感知方向选择环节考虑节点剩余能量因素的 Prog-Resd 算法.在文献[42]的基础上,Wen 等人^[32,35]提出了改进的贪心算法(EGA)和公平的方向优化算法(EDO),只需要直接邻居的目标信息就可以优化节点方向.具体来说,EGA 算法选择覆盖最多数量的未被覆盖目标的方向作为工作方向,贪心算法具有思想直观、计算复杂度低的优点,其不足是有可能忽略临界目标.EDO 算法使用效用值来评价每个方向对网络覆盖质量的贡献大小,影响效用值的因素包括每个方向上的目标数、目标的覆盖度和邻居节点的方向决策,并且总是选择效用值最大的方向作为工作方向.相对于 EGA 算法,EDO 算法更公平地分配感知资源,改善临界目标的覆盖度,提高网络覆盖资源的利用率.EDO 算法一次执行就可以优化所有节点的方向.此外,Wen 等人还设计了邻居节点调度协议(NSS).NSS 不必找出所有覆盖集和预先分配工作时间,通过局部覆盖集判断当前节点是否为冗余节点,并在考虑节点剩余的能量时决定节点是否可以转为睡眠.覆盖集轮流工作,使网络生存期达到最大化.与文献[42]中为每个覆盖集预先分配工作时间,同时允许同一节点在不同的覆盖集中工作在不同的感知方向的解决方案相比,由于 NSS 协议通过覆盖集多次轮流工作方式每个覆盖集分配合适的工作时间,因而动态调整节点方向将增加计算和方向调整的能量开销.Wang 等人^[28]将效能(utility)的概念引入到传感器网络工作寿命问题中,通过构建权重效能图,研究如何选择和调度节点子集,在确保实现各节点子集以相当效能覆盖所有目标节点的同时,网络具有最长工作寿命.该算法为集中式算法,在假设节点和目标信息已知的情况下,在 sink 节点集中运行.针对冗余节点判定及状态改变,Chen 等人^[59]设计了一种基于权重的集中式贪心算法,定义两类权重值:目标权重和方向权重,通过计算并比较权重值大小来优化节点的感知方向,进而保证监测区域中离散目标的最大化覆盖.

考虑到个别监测应用需要节点具有高可靠性,对热点区域及目标的覆盖服务质量具有较高的要求,此时需要区域中每个目标点至少被 k 个不同传感节点同时覆盖,此类问题也称为 k 覆盖.在有向传感器网络中, k 覆盖问题也引起了研究学者们的关注.Liu 等人^[26]率先提出有向 k 覆盖(directional k -coverage,简称 DKC)的概念,基于概率论方法设计数学模型,预测网络 DKC 性能与随机部署的有向节点数目(或密度)之间的函数关系.Wu 等人^[33]则基于概率模型研究最小 k 覆盖集(minimal k -coverage set,简称 MKS)问题.Fusco 等人^[15]设计了一种简单的贪心算法,通过选取最少数目的有向节点并调节其初始感知方向,获得给定区域及目标点的 k 覆盖.得出如下结论:最多使用 $M \log(k|C|)$ 个节点即可实现至少半数以上目标点的 k 覆盖.其中, $|C|$ 表示一个节点所覆盖的最大目标点数目, M 表示实现所有点 k 覆盖所需要的最少节点数目.

基于全新的持续旋转感知模型,Fusco 等人^[16]尝试从问题描述和理论证明等方面对全新感知模型衍生出来的目标覆盖问题进行研究;设计近似算法解决如何在现有可能存在覆盖空洞的区域内,通过额外放置最少数目的有向节点并确定其初始感知方向,使得区域内各点未被监测的概率为 0.另外,Liu 等人^[12,13]创新性地研究目标

定位覆盖问题.针对有向传感器网络建立定位感知模型(包括节点视域二维映射模型、测量值的误差模型)的要求,提出了目标定位覆盖(L-coverage)的概念,推导出定位覆盖率与节点密度的关系.

4.3 栅栏覆盖

栅栏覆盖主要研究如何分配网络时空资源,来保证当任意移动目标穿越监控区域时都能被监测到.栅栏覆盖可以广泛应用于边界保护和移动目标监控等任务.

4.3.1 按照目标运动轨迹分类

栅栏覆盖分为强栅栏覆盖(strong barrier coverage)和弱栅栏覆盖(weak barrier coverage)两类^[60],如图 8 所示.强栅栏覆盖满足目标以任意轨迹从出发位置(entrance side)运动至目的位置(destination side),总能被网络中至少一个有向传感节点监测到;而弱栅栏覆盖则限定目标仅沿直线轨迹从出发位置运动至目的位置,确保每条直线轨迹总能被网络中至少一个传感器节点监测到.

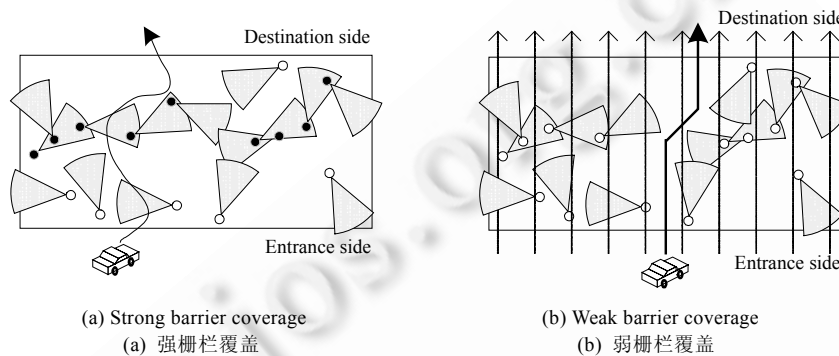


Fig.8 Classification of barrier coverage

图 8 栅栏覆盖分类

有向节点感知区域的不规则性给栅栏覆盖控制算法设计带来了不小的挑战,更具有现实应用意义的强栅栏覆盖问题率先引起学者们的探讨和研究.Zhang 等人^[61]研究强栅栏覆盖问题,找到满足栅栏覆盖条件的最大路径数目.他们基于不可重叠感知模型,假定每个节点的感知方向只有 q 个取值,当节点总数为 n 时,构造有向覆盖图 G 包含 $O(nq)$ 个顶点、 $O(n^2q^2)$ 条边,即用顶点表示所有节点所有可能的感知扇形.一旦计算发现两个扇形之间存在重叠,就将覆盖图 G 中相应两个顶点之间建立连线(将该边权重赋值为 1).再利用 Ford-Fulkerson 算法寻找网络最大流,分别基于最短路径、最少冲突两个目标函数选择确定多条互不共享同一节点的栅栏路径.该方法是近似优化的,优点在于以算法计算复杂度为代价获得全解空间.缺点也显而易见,即节点感知模型相对简单,随着每个节点感知方向取值 q 的不断增加,算法复杂度的增长将相当惊人.文献[61]也设计了分布式的解决方案,选择包含邻居节点数相对较多的节点作为簇头,并由簇头构建局部有向覆盖图,找到局部互不共享同一节点的栅栏路径以最终构成完整的全局栅栏路径.仿真实验验证,由于缺少全局节点分布数据,分布式方法较之两种集中式方法所能找到的独立栅栏路径条数要少. Shih 等人^[62]设计了一种分布式的 CoBRA 算法以获得有向感知网络的强栅栏覆盖.覆盖控制算法分为 3 个阶段:(1) 在初始阶段,每个节点根据与相邻节点的物理位置关系,建立两个邻居节点间的“栅栏线”(如图 9 所示)并存于表中;(2) 在候选节点选择阶段,相邻节点间互通 BREQ 和 BREP 消息,通告各自的“栅栏线”信息,实现栅栏路径的延续构建;(3) 在检测阶段,找到包含节点数目最少的一条路径作为栅栏路径.

上述栅栏覆盖控制方法均面向网络所具备的路径覆盖性能的静态评估,仅是为后续通过节点布局优化获得良好的网络路径覆盖提供评估依据,未能广泛扩展到对移动目标的动态覆盖优化.Fusco 等人^[16]基于动态的持续旋转感知模型,探索有向传感器网络中弱栅栏覆盖问题.他们的基本解决思路在于:采用有限离散的方法去解决一个无限连续的 NP 问题,设计贪心优化算法解决如下问题:其一,针对现有网络资源,如何确定有向传感节

点的初始感知方向以获得对所有入侵者的最大监测概率;其二,对给定网络资源,如何部署最少数目的有向传感节点并确定其初始感知方向,以使得所有入侵者都被监测到.

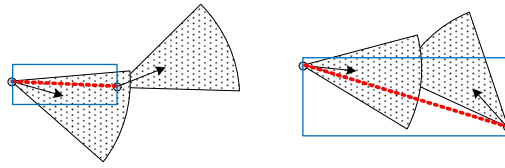


Fig.9 Example of barrier line between two neighboring directional sensors

图9 有向邻居节点间形成栅栏线示意图

4.3.2 按照目标穿越模型分类

栅栏覆盖又可以分为“最坏与最佳情况覆盖”和“暴露穿越”两种类型.最坏与最佳情况覆盖算法考虑如何对穿越网络的目标或其在路径上各点进行感应与追踪.在传统的传感器网络中,Meguerdichian 等人^[63]采用计算几何中的 Voronoi 图(简称 V 图)与 Delaunay 三角网(D 三角网)来实现“最大突破路径(maximal breach path)”和“最大支撑路径(maximal support path)”的定义和构造,分别使得路径上的点到周围最近传感器的最小距离最大化以及最大距离最小化.显然,这两种路径分别代表了传感器网络最坏(不被检测概率最大)和最佳(被检测概率最大)的覆盖情况.

在有向传感器网络中,目前积累的研究成果大多基于 V 图和 D 三角网开展最坏情况覆盖研究.Adriaens 等人^[9]基于凸多边形(三角形)感知模型,采用最佳多项式时间算法检测网络中由三角形边以及交线所构成的最大突破路径,基于 FOV-Voronoi 图提出了寻找最大突破路径的集中式算法,以找到有向传感器网络中“最坏情况覆盖”.由于设计方案中多个凸多边形感知区域交点及交线的计算量较大,仅适用于节点规模较小的情况.为简化计算量,Tao 等人^[37]采用质心替代节点扇形感知区域构造 Voronoi 图来完成最大突破路径的构造和查找,并设计简单易行的修补策略,以改善整个网络监视能力.综上,利用 V 图的划分,可快速搜索出传感器网络中的覆盖漏洞,在仅考虑邻近传感器节点影响的宽松覆盖要求下,可以论证出利用 V 图生成的最大突破路径逼近于理想情况.但由于 V 图的划分仅仅是一种粗略的轨迹线段的集合,会造成该方法对网络拓扑情况相当敏感,这将在一定程度上限制其应用范围.

Liu 等人^[10,11]提出利用渗透理论(percolation theory)解决传感器网络中暴露路径(exposure path)问题,将暴露路径问题映射为基于扇形区域的渗透模型研究,并推导当满足暴露路径覆盖时节点密度需要满足的上下临界条件.另外,Tao 等人^[25]基于虚拟力(virtual force,简称 VF)方法研究有向传感器网络的路径覆盖优化.通过引入“质心”和“运动轨迹点”的概念,将待解决问题转化为质心点-运动轨迹点、质心点-质心点间虚拟力作用问题.该方法既保证了路径的充分覆盖,也使得相邻有向节点间覆盖重叠区域尽可能地小.该方法假设采用雷达波/声波传感器获得移动目标的实时位置信息,并采用线性拟合算法实现目标运动轨迹的提前预测,实时性和精确性方面需求较高,实现难度较大.而且,采用传统虚拟力方法可能出现局部极小而导致覆盖增强失败的情况.由此,Xiao 等人^[64]设计了一种改进的势场函数,通过将相邻有向传感节点对路径轨迹点的共同覆盖率引入到斥力计算中,有效引导节点的主感知方向调整,从而达到路径的高效覆盖.

4.4 连通覆盖

作为传感器网络覆盖控制理论中的重要问题之一,连通覆盖问题所要解决的是如何同时满足网络一定的传感覆盖和通信连通性需求.因为虽然传感器网络节点几何上覆盖某个区域,但部分节点处于睡眠状态或故障状态,使得无法确保节点监测范围对该几何区域的完全覆盖.连通覆盖即研究如何选择(最少)活跃节点,实现对所有监控目标的覆盖并保持活跃节点的通信连通.目前,在有向传感器网络领域,主要通过设计活跃节点集轮换机制予以实现.

在传统传感器网络中,Zhang 等人^[65]证明了当节点的通信半径 R_c 至少两倍于其感知半径 R_s ($R_c > 2R_s$) 时,如果

活动节点能够覆盖整个监测区域,则该节点集合也是连通的.基于此,Ma 等人^[7]研究冗余有向节点分组交替工作的节能策略,根据统一概率模型估算,满足网络覆盖需求的节点数目,以此为依据,判定是否达到分组规模,对未达到规模的分组继续寻找一定数量的有向节点进行补足.该方法单纯地以分组节点规模作为分组规则,而对网络区域覆盖质量兼顾有限.Han 等人^[66]较早基于有向感知模型的覆盖控制问题引入连通约束,研究如何利用最少数目的有向节点构建通信连通性网络,并实现对离散目标点及整个区域的覆盖.他们证明,连通点覆盖部署 (connected point-coverage deployment,简称 CPD)问题是 NP 难问题,并提出几种近似优化算法:第 1 种算法的近似比率为 $\log|P|+1$ (P 表示目标集);第 2 种算法仅适用于 FoV(即 2α)不小于 $\pi/3$ 的情况,近似比率为 9.针对连通区域覆盖部署(connected region-coverage deployment,简称 CRD)问题,Han 等人分别设计了两种有效的部署模型:disk-based 和 pattern-based,以确保节点部署密度,并分析其性能边界情况.

为了改善网络覆盖质量以及数据传输容错率,Wu 等人^[34]研究有向传感器网络中基于概率感知模型的最小连通 k 覆盖集(minimal connected k -coverage set,简称 MCKS)问题,并指出该问题是 NP 难问题;设计了基于 0-1 整数规划和最小生成树的集中式近似算法以及基于覆盖效益探测的分布式近似算法.其中,分布式近似算法只考虑覆盖度要求,建立了覆盖效益(coverage benefit)的概念,以度量按某个感知方向激活节点后对任务要求的覆盖度 k 的贡献值.网络中的节点根据覆盖效益推选出最佳感知方向,而始终不能获取最佳感知方向的节点被关闭.他们还进一步分析了算法的时间复杂度、性能比和通信复杂度.

对于连通覆盖问题,既要满足一定的覆盖率,又要保证网络连通性,使节点收集的数据可以通过多跳的方式转发到汇聚 sink 节点.在分布式解决方案中,与邻居节点建立通信连接与传感器节点的通信半径密切相关.因此,解决连通覆盖问题要同时考虑节点的感知能力和通信能力.类似于节点的有向传感能力,节点可以采用有向天线模式与其他节点通信,即通过将传输能力集中在一定角度范围,以此提高网络通信质量,降低通信冲突和信号衰减^[67].Ma 等人^[7]最先基于有向通信模型研究有向传感器网络中的覆盖完整性和通信连通性问题,利用图论方法实现全网节点通信连通性检测,并通过部署额外节点的方式修补实现全网节点的 100%单向通信连通.有别于传统通信模型,其通信能力并非全向的,而是基于有向天线的(如图 10 所示).

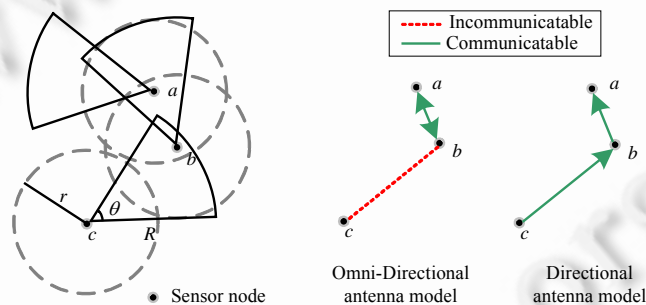


Fig.10 Directional communication model

图 10 有向通信模型

Tao 等人^[39]在此基础上研究了全网节点 100%单向通信连通性的修补问题.

根据文献[68]中定义的通信能耗模型(如图 11 所示),在能耗保持不变的情况下,每个节点的通信半径正比于其通信覆盖区域的面积,表现为通信区域夹角 θ 越小,其对应的通信半径 R 越长.假定网络中节点具有全向和有向通信的切换能力,解决思路在于:在检测到网络连通空洞的情况下,通过动态增长个别桥接节点通信半径的方法,以较少的能耗实现全网节点通信连通能力的补偿.

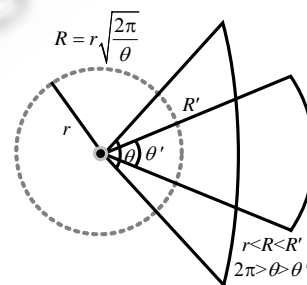


Fig.11 Communication power consumption model

图 11 通信能耗模型

5 有向传感器网络覆盖控制有待解决的问题

5.1 实用模型

在现有的 DSN 覆盖控制研究中,所使用的感知模型多为简单且理想化的二维布尔感知模型.基于理想模型假设的研究与真实应用存在差距,直接导致“实验室”结果产品无法直接应用于大规模实用系统.对于真实的图像/视频传感节点而言,其感知能力不仅会因能量减弱而引起监测结果准确性的变化,还会因感知范围内的障碍物遮挡造成明显的感知差异^[14,21].面向 3D 物理场景监测的多媒体传感器网络监测,需要进一步设计出更为完善的三维空间感知模型.另外,从目标物理位置与目标成像之间几何关系入手,设计面向目标跟踪、定位等特定监测需求的感知模型^[12,13]并进一步设计出有效的覆盖控制算法与协议,将会是一个很有意义的研究课题.

5.2 空间覆盖

传感器网络日益应用于真实三维场景监测,基于三维感知模型的覆盖控制问题也将成为今后研究的一个热点问题.目前,该方面的积累成果比较少见,也局限于对二维投影平面的最大化覆盖优化研究^[27,69].综合考虑有向传感器网络的空间覆盖,设计对场景三维空间的立体覆盖及不规则表面覆盖(例如山体、丘陵)的理论和方法,将会是 DSN 覆盖控制领域很有意义也很实用的研究课题.特别地,考虑到目标全方位监测需求,Wang 等人^[21]探索性地提出全视域覆盖(full view coverage)问题研究,即设计节点部署及覆盖控制策略,以确保 DSN 为每个目标提供 360°全方位的覆盖监测,这也势必会给探讨 DSN 覆盖控制理论及算法研究带来新的启示.

5.3 动态覆盖

目前,有向传感器网络覆盖控制算法和协议大都假定传感节点是静态的.所提出的改善网络覆盖性能的方法,绝大多数是通过优化调整有向节点感知方向的方式实现的.这类算法设计的出发点大都基于节约网络能量消耗,而兼顾响应延迟、通信连通性等要素设计满足不同监测需求的覆盖控制算法,将是未来相关研究一个重要内容.对于战场、救援等复杂应用场景,如何通过引入移动节点建立静态节点与移动节点、多个移动节点之间的协作感知,以及对热点区域或移动目标的持续性跟踪覆盖,仍将是今后关注的一个研究问题.

5.4 异构覆盖

目前,有向传感器网络覆盖控制研究绝大多数是针对节点及网络同构的假设基础开展的,从节点及网络异构性出发研究覆盖控制理论及设计的方法并不多见.利用异构的有向传感节点构成监视网络对场景实施监控的应用,日益引起研究学者们的关注.例如,将 PTZ 摄像头、广角摄像机等高端视频采集设备引入网络中来,通过低端视频节点或红外节点对其进行唤醒,实现感兴趣区域及目标的协同覆盖监测^[53].可见,相对于同构网络而言,异构网络是一种更实用的网络模型,其覆盖控制算法也更为复杂.

6 结束语

作为体现传感器网络服务质量的主要指标之一,覆盖控制理论及方法的研究近年来得到国内外研究学者的广泛关注.节点具有的方向性感知能力赋予有向传感器网络覆盖控制问题研究以新的内涵,并给研究工作带来一定的技术挑战.本文总结了有向传感器网络覆盖控制领域积累的国内外新近的研究成果,并指出当前亟待解决的问题和进一步的研究方向,期望本文的介绍能够推动同行学者对这一领域的关注与研究.

致谢 在此,向曾经对本文提出宝贵建议的审稿专家以及美国伊利诺伊理工大学李向阳教授、北京邮电大学刘亮老师表示衷心的感谢.

References:

- [1] Cardei M, Wu J. Coverage in wireless sensor networks. In: Ilyas M, Magboub I, eds. Handbook of Sensor Networks, Chapter 19. CRC Press, 2004.

- [2] Huang CF, Tseng YC. A survey of solutions to the coverage problems in wireless sensor networks. *Journal of Internet Technology*, 2005,6(1):1–8.
- [3] Ren Y, Zhang SD, Zhang HK. Theories and algorithms of coverage control for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2006, 17(3):422–433 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm> [doi: 10.1360/jos170422]
- [4] Li XY, Wan PJ, Frieder O. Coverage in wireless ad hoc sensor networks. *IEEE Trans. on Computers*, 2003,52(6):753–763. [doi: 10.1109/TC.2003.1204831]
- [5] Ma HD, Tao D. Multimedia sensor network and its research progresses. *Journal of Software*, 2006,17(9):2013–2028 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm> [doi: 10.1360/jos172013]
- [6] Ma HD, Liu YH. Correlation based video processing in video sensor networks. In: *Proc. of the 2005 Int'l Conf. on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*. New York: IEEE Press, 2005. 987–992. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1549547> [doi: 10.1109/WIRELES.2005.1549547]
- [7] Ma HD, Liu YH. On coverage problems of directional sensor networks. In: Jia XH, Wu J, He YX, eds. *Proc. of the Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks*. LNCS 3794, 2005. 721–731. <http://www.springerlink.com/content/78334q4ppq2204078/fulltext.pdf> [doi: 10.1007/11599463_70]
- [8] Ai J, Abouzeid AA. Coverage by directional sensors in randomly deployed wireless sensor networks. *Journal of Combinatorial Optimization*, 2006,11(1):21–41. [doi: 10.1007/s10878-006-5975-x]
- [9] Adriaens J, Megerian S, Potkonjak M. Optimal worst-case coverage of directional field-of-view sensor networks. In: *Proc. of the 3rd Annual IEEE Conf. on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Network*. New York: IEEE Press, 2006. 336–345.
- [10] Liu L, Ma HD, Zhang X. Percolation-Theory based density derivations of wireless sensor network nodes for preventing exposure paths. In: *Proc. of the 42nd Annual Conf. on Information Sciences and Systems*. 2008. 836–841. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4555640/45558476/04558636.pdf> [doi: 10.1109/CISS.2008.4558636]
- [11] Liu L, Zhang X, Ma HD. Exposure-Path prevention in directional sensor networks using sector model based percolation. In: *Proc. of the IEEE ICC 2009*. New York: IEEE Press, 2009. 2707–2711. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05199019> [doi: 10.1109/ICC.2009.5199019]
- [12] Liu L, Zhang X, Ma HD. Localization-Oriented coverage in wireless camera sensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2011,10(2):484–494. [doi: 10.1109/TWC.2010.01.080956]
- [13] Liu L, Zhang X, Ma HD. Optimal node selection for target localization in wireless camera sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2010,59(7):3562–3576. [doi: 10.1109/TVT.2009.2031454]
- [14] Tezcan N, Wang WY. Self-Orienting wireless multimedia sensor networks for maximizing multimedia coverage. In: *Proc. of the 2008 IEEE Int'l Conf. on Communications*. New York: IEEE Communications Society, 2008. 2206–2210. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4533035/4533036/04533457.pdf> [doi: 10.1109/ICC.2008.421]
- [15] Fusco G, Gupta H. Selection and orientation of directional sensors for coverage maximization. In: *Proc. of the 6th Annual IEEE Conf. on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*. New York: IEEE Press, 2009. 1–9. <http://www.cs.sunysb.edu/~fusco/sodsem.pdf> [doi: 10.1109/SAHCN.2009.5168968]
- [16] Fusco G, Gupta H. Placement and orientation of rotating directional sensors. In: *Proc. of the 7th Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*. New York: IEEE Press, 2010. 1–9. <http://www.cs.sunysb.edu/~fusco/pords.pdf> [doi: 10.1109/SECON.2010.5508238]
- [17] Osais Y, St-Hilaire M, Yu FR. The minimum cost sensor placement problem for directional wireless sensor networks. In: *Proc. of the 68th IEEE Vehicular Technology Conf.* New York: IEEE Press, 2008. 1–5. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04657121> [doi: 10.1109/VETEFC.2008.289]
- [18] Osais Y, St-Hilaire M, Yu FR. On sensor placement for directional wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE ICC 2009*. New York: IEEE Press, 2009. 1–5. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05199248> [doi: 10.1109/ICC.2009.5199248]
- [19] Osais Y, St-Hilaire M, Yu FR. Directional sensor placement with optimal sensing range, field of view and orientation. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Wireless and Mobile Computing*. New York: IEEE Press, 2008. 19–24. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4654205> [doi: 10.1109/WiMob.2008.88]
- [20] Wang Y, Cao GH. Minimizing service delay in directional sensor networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2011*. New York: IEEE Press, 2011. 1790–1798. <http://mc.manuscriptcentral.com/infocom11>.pdf [doi: 10.1109/INFOCOM.2011.5934978]
- [21] Wang Y, Cao GH. On full-view coverage in camera sensor networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2011*. New York: IEEE Press, 2011. 1781–1789. <http://mc.manuscriptcentral.com/infocom11-camera>.pdf [doi: 10.1109/INFOCOM.2011.5934977]
- [22] Ma HD, Liu YH. Some problems of directional sensor networks. *International Journal of Sensor Networks*, 2007,2(1-2):44–52. [doi: 10.1504/IJSNET.2007.012981]

- [23] Tao D, Ma HD, Liu L. Coverage-Enhancing algorithm for directional sensor networks. In: Stojmenovic I, Cao JN, eds. Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks. Lncs 4325, Berlin: Springer-Verlag, 2006. 256–267. [doi: 10.1007/11943952_22]
- [24] Tao D, Ma HD, Liu L. A virtual potential field based coverage-enhancing algorithm for directional sensor networks. Journal of Software, 2007,18(5):1152–1163 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm> [doi: 10.1360/jos181152]
- [25] Tao D, Ma HD, Liu L. Study on path coverage enhancement algorithm for video sensor networks. Acta Electronica Sinica, 2008,36(7):1291–1296 (in Chinese with English abstract).
- [26] Liu L, Ma HD, Zhang X. On directional k -coverage analysis of randomly deployed camera sensor networks. In: Proc. of the IEEE ICC 2008. New York: IEEE Press, 2008. 2707–2711. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4533035/4533036/04533547.pdf> [doi: 10.1109/ICC.2008.511]
- [27] Ma HD, Zhang X, Ming AL. A coverage-enhancing method for 3D directional sensor networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2009. New York: IEEE Press, 2009. 2791–2795. <http://www.di.unito.it/~matteo/109/DATA09/02-11-04.PDF> [doi: 10.1109/INFOCOM.2009.5062233]
- [28] Wang J, Niu CY, Shen RM. A utility-based maximum lifetime algorithm for directional sensor network. In: Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2007. 2424–2427. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4339774/4339775/04340379.pdf>
- [29] Cai YL, Lou W, Li ML, Li XY. Energy efficient target-oriented scheduling in directional sensor networks. IEEE Trans. on Computers, 2009,58(9):1259–1274. [doi: 10.1109/TC.2009.40]
- [30] Wang J, Niu CY, Shen RM. Priority-Based target coverage in directional sensor networks using a genetic algorithm. Computers & Mathematics with Applications, 2009,57(11-12):1915–1922. [doi: 10.1016/j.camwa.2008.10.019]
- [31] Cheng WF, Li SS, Liao XK, Shen CX, Chen HT. Maximal coverage scheduling in randomly deployed directional sensor networks. In: Proc. of the IEEE Parallel Processing Workshops. New York: IEEE Press, 2007. 68–73. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4346426> [doi: 10.1109/ICPPW.2007.51]
- [32] Wen J, Fang L, Jiang J, Dou WH. Coverage optimizing and node scheduling in directional wireless sensor networks. In: Proc. of the 4th Int'l Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2008. 1–4. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4678892> [doi: 10.1109/WiCom.2008.984]
- [33] Wu YA, Yin JP, Li M, Zhu E, Zheng X. Efficient algorithms for probabilistic k -coverage in directional sensor networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing. 2008. 587–592. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04762053> [doi: 10.1109/ISSNIP.2008.4762053]
- [34] Wu YA, Yin JP, Li M, Zhu E, Cai ZP. Algorithms for the minimal connected k -coverage set problem under probabilistic sensing models in directional sensor networks. Computer Engineering & Science, 2008,30(12):19–22, 48 (in Chinese with English abstract).
- [35] Wen J, Jiang J, Dou WH. Equitable direction optimizing and node scheduling for coverage in directional sensor networks. Journal of Software, 2009,20(3):644–659 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3207.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03207]
- [36] Cheng WF, Liao XK, Shen CX. Maximal coverage scheduling in wireless directional sensor networks. Journal of Software, 2009, 20(4):975–984 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3240.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03240]
- [37] Tao D, Sun Y, Chen HJ. Worst-Case coverage detection and repair algorithm for video sensor networks. Acta Electronica Sinica, 2009,37(10):2284–2290 (in Chinese with English abstract).
- [38] Tao D, Chen HJ, Sun Y. A coverage-preserving density control algorithm for directional sensor networks. Journal of Internet Technology, 2009,10(1):37–42.
- [39] Tao D, Sun Y, Chen HJ. Connectivity checking and bridging for wireless sensor networks with directional antennas. Journal of Internet Technology, 2010,11(1):115–121.
- [40] Li J, Wang RC, Huang HP, Sun LJ. Voronoi based area coverage optimization for directional sensor networks. In: Proc. of the Int'l Symp. on Electronic Commerce and Security. 2009. 488–493. [doi: 10.1109/ISECS.2009.116]
- [41] Cai YL, Lou W, Li ML. Cover set problem in directional sensor networks. In: Proc. of the Future Generation Communication and Networking. 2007. 274–278. <http://www4.comp.polyu.edu.hk/~csweilou/Publications/fgcn2007.pdf> [doi: 10.1109/FGCN.2007.94]

- [42] Cai YL, Lou W, Li ML, Li XY. Target-Oriented scheduling in directional sensor network. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2007. New York: IEEE Press, 2007. 1550–1558. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4215764> [doi: 10.1109/INFOCOM.2007.182]
- [43] Tao D. Research on coverage control and cooperative processing method for video sensor networks [Ph.D. Thesis]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [44] Makhoul A, Saadi R, Pham C. Adaptive scheduling of wireless video sensor nodes for surveillance applications. In: Proc. of the 4th ACM Int'l Workshop on Performance Monitoring, Measurement, and Evaluation of Heterogeneous Wireless and Wired Networks. New York: ACM Press, 2009. 54–60. <http://web.univ-pau.fr/~cpham/Paper/Slide-pm2hw2n09.pdf> [doi: 10.1145/1641913.1641921]
- [45] Amac GM, Gokhan YA. On coverage issues in directional sensor networks: A survey. In: Proc. of the Ad Hoc Networks. 2011. 1238–1255. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870511000461> [doi: 10.1016/j.adhoc.2011.02.003]
- [46] Pescaru D, Istin C, Curia D, Doboli A. Energy saving strategy for video-based wireless sensor networks under field coverage preservation. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Automation, Quality and Testing, Robotics. New York: IEEE Press, 2008. 289–294. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04588754> [doi: 10.1109/AQTR.2008.4588754]
- [47] Wang GL, Cao GH, Berman P, La Porta TF. Bidding protocols for deploying mobile sensors. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2007,6(5):563–576. [doi: 10.1109/TMC.2007.1022]
- [48] Chellappan S, Gu WJ, Bai XL, Xuan D, Ma B, Zhang KZ. Deploying wireless sensor networks under limited mobility constraints. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2007,6(10):1142–1157. [doi: 10.1109/TMC.2007.1032]
- [49] Heo N, Varshney PK. Energy-Efficient deployment of intelligent mobile sensor networks. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2005,35(1):78–92. [doi: 10.1109/TSMCA.2004.838486]
- [50] Liang CK, He MC, Tsai CH. Movement assisted sensor deployment in directional sensor networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks. 2010. 226–230. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5714505> [doi: 10.1109/MSN.2010.42]
- [51] Wang W, Srinivasan V, Chua KC. Trade-Offs between mobility and density for coverage in wireless sensor networks. In: Proc. of the MobiCom. New York: ACM Press, 2007. 39–50. <http://www.bell-labs.com/user/vikramsr/Papers/p39-wang-mobicom07.pdf> [doi: 10.1145/1287853.1287860]
- [52] Kansal A, Kaiser W, Pottie G, Srivastava M, Sukhatme G. Reconfiguration methods for mobile sensor networks. ACM Trans. on Sensor Networks, 2007,3(4):22–47. [doi: 10.1145/1281492.1281497]
- [53] Kulkarni P, Ganesan D, Shenoy P, Lu QF. SensEye: A multi-tier camera sensor network. In: Proc. of the 13th Annual ACM Int'l Conf. on Multimedia 2005. New York: ACM Press, 2005. 229–238.
- [54] Dantu K, Rahimi M, Shah H, Babel S, Dhariwal A, Sukhatme GS. Robomote: Enabling mobility in sensor networks. In: Proc. of the IEEE/ACM Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks. New York: IEEE/ACM Press, 2005. 404–409. http://cres.usc.edu/pubdb_html/files_upload/431.pdf
- [55] Kandath C, Chellappan S. Angular mobility assisted coverage in directional sensor networks. In: Proc. of the 2009 Int'l Conf. on Network-Based Information Systems. 2009. 376–379. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5349932> [doi: 10.1109/NBiS.2009.69]
- [56] Howard A, Mataric MJ, Sukhatme GS. Mobile sensor network deployment using potential fields: A distributed scalable solution to the area coverage problem. In: Proc. of the 6th Int'l Symp. on Distributed Autonomous Robotics Systems. 2002. 299–308. http://www-robotics.usc.edu/~ahoward/pubs/howard_dars02a.pdf
- [57] Zhao J, Zeng JC. A virtual potential field based coverage algorithm for directional networks. In: Proc. of the 2009 Chinese Control and Decision Conf. 2009. 4590–4595 (in Chinese with English abstract).
- [58] Cui XX, Li MX. Research on coverage optimization mechanism in wireless sensor networks. ZTE Communications, 2005,11(4): 62–65 (in Chinese with English abstract).
- [59] Chen UR, Chiou BS, Chen JM, Lin W. An adjustable target coverage method in directional sensor networks. In: Proc. of the 2008 IEEE Asia-Pacific Services Computing Conf. New York: IEEE Press, 2008. 174–180. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04780672> [doi: 10.1109/APSCC.2008.37]
- [60] Liu BY, Dousse O, Wang J, Saipulla A. Strong barrier coverage of wireless sensor networks. In: Proc. of the ACM MobiHoc. New York: ACM Press, 2008. 411–419. <http://www.cs.uml.edu/~asaipull/hoc86689-liu.pdf> [doi: 10.1145/1374618.1374673]
- [61] Zhang L, Tang J, Zhang WY. Strong barrier coverage with directional sensors. In: Proc. of the IEEE GLOBECOM. New York: IEEE Press, 2009. 1–6. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05425893> [doi: 10.1109/GLOCOM.2009.5425893]

- [62] Shih KP, Chou CM, Liu IH, Li CC. On barrier coverage in wireless camera sensor networks. In: Proc. of the 24th IEEE Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications. New York: IEEE Press, 2010. 873–879. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05474774> [doi: 10.1109/AINA.2010.77]
- [63] Megerian S, Koushanfar F, Potkonjak M, Srivastava MB. Worst and best-case coverage in sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2005,4(1):84–92. [doi: 10.1109/TMC.2005.15(410)%204]
- [64] Xiao F, Wang RC, Ye XG, Sun LJ. A path coverage-enhancing algorithm for directional sensor network based on improved potential field. Journal of Computer Research and Development, 2009,46(12):2126–2133 (in Chinese with English abstract).
- [65] Zhang HH, Hou JC. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. In: Proc. of the NSF Int'l Workshop on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks. 2004. 89–124. <http://personal.stevens.edu/~yguo1/EE631/ZhangMaintianSensingCoverage.pdf>
- [66] Han XF, Cao X, Lloyd EL, Shen CC. Deploying directional sensor networks with guaranteed connectivity and coverage. In: Proc. of the 5th Annual IEEE Communications Society Conf. on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. New York: IEEE Press, 2008. 153–160. http://www.eecis.udel.edu/~elloyd/papers.d/SECON_conf.pdf [doi: 10.1109/SAHCN.2008.28]
- [67] Yu ZM, Teng J, Bai XB, Xuan D, Jia WJ. Connected coverage in wireless networks with directional antennas. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2011. New York: IEEE Press, 2011. 2264–2272. http://www.cse.ohio-state.edu/~xuan/papers/11_infocom_ytbxj.pdf [doi: 10.1109/INFOCOM.2011.5935042]
- [68] Kranakis E, Krizanc D, Williams E. Directional versus omnidirectional antennas for energy consumption and k -connectivity of networks of sensors. In: Proc. of the 8th Int'l Conf. on Principles of Distributed Systems. LNCS 3544, Springer-Verlag, 2004. 357–368. <http://people.scs.carleton.ca/~kranakis/Papers/opodis-04.pdf>
- [69] Soro S, Heinzelman WB. On the coverage problem in video-based wireless sensor networks. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Broadband Networks. 2005. 932–939. http://www.ece.rochester.edu/research/wcng/papers/conference/soro_basnets05.pdf [doi: 10.1109/ICBN.2005.1589704]

附中文参考文献:

- [3] 任彦,张思东,张宏科.无线传感器网络中覆盖控制理论与算法.软件学报,2006,17(3):422–433. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm> [doi: 10.1360/jos170422]
- [5] 马华东,陶丹.多媒体传感器网络及其研究进展.软件学报,2006,17(9):2013–2028. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm> [doi: 10.1360/jos172013]
- [24] 陶丹,马华东,刘亮.基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法.软件学报,2007,18(5):1152–1163. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm> [doi: 10.1360/jos181152]
- [25] 陶丹,马华东,刘亮.视频传感器网络中路径覆盖增强算法研究.电子学报,2008,36(7):1291–1296.
- [34] 伍勇安,殷建平,李敏,祝恩,蔡志平.有向传感器网络中基于概率感知模型的最小连通 k 覆盖集算法.计算机工程与科学,2008,30(12):19–22,48.
- [35] 温俊,蒋杰,窦文华.公平的有向传感器网络方向优化和节点调度算法.软件学报,2009,20(3):644–659. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3207.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03207]
- [36] 程卫芳,廖湘科,沈昌祥.有向传感器网络最大覆盖调度算法.软件学报,2009,20(4):975–984. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3240.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03240]
- [37] 陶丹,孙岩,陈后金.视频传感器网络中最坏情况覆盖检测与修补算法.电子学报,2009,37(10):2284–2290.
- [43] 陶丹.视频传感器网络覆盖控制及协作处理方法研究[博士学位论文].北京:北京邮电大学,2007.
- [57] 赵静,曾建潮.基于虚拟势场的有向网络覆盖算法.见:2009中国控制与决策会议论文集.2009.4590–4595.
- [58] 崔逊学,黎明曦.无线传感器网络的覆盖优化机制研究.中兴通讯技术,2005,11(4):62–65.
- [64] 肖甫,王汝传,叶晓国,孙力娟.基于改进势场的有向传感器网络路径覆盖增强算法.计算机研究与发展,2009,46(12):2126–2133.



陶丹(1978—),女,山东平度人,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络,多媒体系统.



马华东(1964—),男,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为多媒体系统与网络,物联网,传感网.