

无线传感器网络覆盖问题的研究进展*

王伟, 林锋[†], 周激流
(四川大学 计算机学院, 成都 610064)

摘要: 分析了无线传感器网络的网络特征以及影响网络覆盖的重要因素, 总结和评估了近年来提出的覆盖机制, 同时对该领域尚存问题以及发展趋势进行了讨论。

关键词: 无线传感器网络; 移动传感器网络; 网络覆盖; 能量有效性; 事件监测

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)01-0032-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.01.008

Research progress on coverage problem in wireless sensor networks

WANG Wei, LIN Feng[†], ZHOU Ji-liu
(School of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: This paper analyzed the characteristics of wireless sensor networks and the factors affecting network coverage firstly, and then reviewed the proposed coverage schemes in recent years. Finally, concluded the existing and emerging problems in network coverage.

Key words: wireless sensor networks; mobile sensor networks; network coverage; energy efficiency; event detection

无线传感器网络是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点组成, 通过无线通信方式形成的一个多跳自组织网络。覆盖问题反映了传感器网络节点对指定监控区域的监控程度, 是衡量无线传感器网络服务质量的一项基本指标。例如, 在用做森林防火的传感器网络中, 覆盖问题关心的是如何在最短的时间内监测到火源^[1]。

无线传感器网络规模大, 且节点能量、通信能力以及计算能力有限, 因此在研究无线传感器网络的覆盖问题时, 需要考虑五个方面: a) 节点的部署方式。节点的部署方式可以分为随机部署和计划部署。当传感器的工作环境物理不可达时, 节点只能通过随机播洒的方式来部署, 此种方式称为随机部署。相反, 当传感器可以被精确部署到工作区域中指定位置时, 称为计划部署。b) 节点的感知范围和通信范围。在传感器网络中, 网络覆盖由节点的感知范围决定, 而网络的连通性则由节点的通信范围决定, 于是不同的感知范围和通信范围会对节点的部署产生较大影响。Woehrle 等人^[2]用改进的多目标进化算法对传感器网络连通性和覆盖的关系进行了折中研究。c) 能量有效性。无线传感器网络能量有限, 这就要求可以通过控制节点的工作状态, 使冗余节点休眠, 以此来最大化网络的生存时间。d) 算法特征。覆盖控制算法分为集中式算法和分布式算法。集中式算法是指由拥有网络全局信息的管理者对网络中所有节点统一地进行控制, 这要求管理者有较强的计算、存储和通信能力; 分布式算法则是指网络中的节点根据自身拥有的局部信息来进行局部计算和控制。e) 传感器节点的移动性。在一些传感器网络中, 节点具有移动能力, 而节点的移动将会导致网络拓扑的变化, 因此势必会对网络的覆盖产生较大的影响。

针对不同的应用场景, 研究者已经提出了大量的覆盖机

制。本文根据节点的移动性, 将覆盖问题分为静止覆盖和移动覆盖。表 1 中对本文涉及的覆盖机制进行了总结。

表 1 无线传感器网络覆盖机制总结

覆盖机制	移动节点	覆盖对象	部署方式	算法特征
RKC&DRKC ^[3]	N	区域覆盖	随机部署	集中式/分布式
Coverage area management ^[4]	N	区域覆盖	随机部署	集中式
Diamond pattern 等 ^[6-8]	N	区域覆盖	计划部署	集中式
OGDC ^[9]	N	区域覆盖	随机部署	分布式
Beacon-based control ^[11]	N	区域覆盖	随机部署	分布式
Weak barrier coverage ^[12]	N	栅栏覆盖	随机部署/计划部署	集中式
LBCP ^[13]	N	栅栏覆盖	随机部署	分布式
Divide-and-conquer ^[14]	N	栅栏覆盖	随机部署	分布式
Virtual force driven movement ^[16]	Y	区域覆盖	随机部署	分布式
Dbarrier ^[17]	Y	栅栏覆盖	随机部署	分布式/集中式
Reactive movement ^[18,19]	Y	事件监测	随机部署	分布式
Utility-driven sampling ^[20]	Y	事件监测	随机部署	分布式
BELP ^[21]	Y	事件监测	随机部署	集中式
Csweep & Dsweep ^[22]	Y	事件监测	随机部署/计划部署	分布式/集中式

1 静止覆盖

在较早的覆盖问题研究中, 静止覆盖受到了相当广泛的关注。在静止覆盖中, 研究者通常关心的是能量有效性、网络连通性、最优部署模型等问题, 并相应地提出了许多解决方案。根据覆盖对象的不同, 静止覆盖可分为区域覆盖和栅栏覆盖。

1.1 区域覆盖

区域覆盖(图 1)往往出现在气候监测、森林防火等应用场景中。可以这样定义区域覆盖: 给定一个区域, 要求在任意时刻传感器网络可监控到该区域的所有子区域。而 K-区域覆盖

收稿日期: 2009-04-28; 修回日期: 2009-06-03 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60773168)

作者简介: 王伟(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络; 林锋(1975-), 男(通信作者), 讲师, 主要研究方向为无线传感器网络(linfeng@scu.edu.cn); 周激流(1963-), 男, 教授, 主要研究方向为分布式系统、计算机智能识别。

是指要求该区域的所有子区域被至少 K 个传感器监控到。

1) 集中式覆盖 RKD (randomized K -coverage)^[3] 是一种集中式节点状态控制算法,它将监控区域看做点的集合 X ,通过算法的多次迭代,找出与 X 的一些子集都有交集的集合,这个集合就是一组可以保证区域覆盖的节点。

Coverage area management: 在文献[4]中,研究者将覆盖问题作为 MANNA 管理框架^[5] 的一项服务,使管理者可以根据全局拓扑信息,对节点状态进行控制,以保证用尽可能少的节点来达到区域覆盖。

显然,文献[3,4]的优点在于集中控制可以更为有效地获知网络拓扑,方便集中统一配置管理。但是为了管理节点的工作状态,需要将管理者的决策结果发送给节点。而当网络中节点数量增大时,通信负载和延迟可能会急剧增长,故可能不适用于规模较大的传感器网络。

Deterministic deployment pattern: 考虑到传感器节点可以计划部署的情况,Bai 等人^[6-8] 研究了区域覆盖,同时保证 K -连通(K -连通:网络中任意两个节点有 K 条以上连接路径)的最优部署模型。设 R_s 为节点感知半径, R_c 为通信半径。研究者首先提出了一种基于带状的部署模型^[6],使 R_c/R_s 为任意值时,传感器网络可以达到区域覆盖和 1-连通(或 2-连通),并同时证明了该部署模型是渐进最优的。为了达到区域覆盖和 4-连通,研究者提出了一种“钻石”部署模型^[7],证明了当 $R_c/R_s \leq \sqrt{2}$ 时,该部署模型的渐进最优性。文献[8]中,研究者提出了保证区域覆盖和 3-连通以及 5-连通的部署模型,证明了当 $R_c/R_s \geq 1$ 时,该部署模型的最优性,并推测当 R_c/R_s 为任意值时,该部署模型是全局最优的。

尽管研究者提出的计划部署模型可以达到最优或渐进最优,但是考虑到无线传感器网络大多数的应用场景都难以保证精确部署传感器节点,因此应用范围相对有限。

2) 分布式随机覆盖 在节点随机部署的区域覆盖中,采用较多的是分布式控制算法。其基本思想是:节点根据收集到的邻居信息,判断自身的覆盖范围是否已经被激活的邻居所覆盖,以此决定自身工作状态。Zhang 等人^[9] 提出了一个区域覆盖的充分条件:区域中至少两个传感器节点的感知范围有相交,且所有交点(包括感知范围和区域边界的交点)被其他节点覆盖到时,这个区域就是全覆盖的。而 Huang 则指出:如果区域中所有传感器的感知范围圆的圆周都被 K -覆盖,那么这个区域就是 K -覆盖的^[10]。

OGDC (optimal geographical density control)^[9] 算法首先随机激活网络中部分节点成为 start node,这些激活节点广播激活消息(包含自身位置信息)到其他节点,收到消息的节点则可以根据自身当前状态以及收到的邻居消息来决定下一刻的状态。该算法一定程度上解决了随机部署的大规模传感器网络中的能量有效性问题,但是算法需要地理位置信息的支持,这对传感器节点来说是一笔较大的成本耗费。

Beacon-based control: 为了解除地理位置信息的限制,Jiang 等人^[11] 提出了一种基于信标的分布式控制算法,即节点通信使用两种信标,传输范围分别为 $\alpha \cdot 3R_s$ 和 $\sqrt{3}R_s$ (其中 $\alpha \leq 1$; R_s 为传感器的感知范围),节点可以根据这两种信标的接收情况来判断邻居距离,并决定自身状态。

算法中激活节点周期性地发送信标,这样使得非激活节点可以及时接替失效节点的监测任务,因此算法具有较强的容错

性。但是信标的周期性发送,需要消耗节点相对较多的能量,因此算法可能并不能较好地保证能量有效性。

DRKC: 文献[3]在 RKC 的基础上,将算法中两个全局变量本地化,提出了 DRKC 分布式控制算法。较其他分布式控制算法,DRKC 不需要地理位置信息,通信量也较小,但是算法迭代过程较为复杂,且对网络同步要求较为严格,因此对节点能力要求也比较高。

1.2 栅栏覆盖

栅栏覆盖往往出现在边境入侵监测应用场景中。给定一个狭长区域,假如所有可能横越该狭长区域的路径都被至少一个传感器覆盖,那么这个区域就是被栅栏覆盖的(图 2)。同理,当要求有至少 K 个传感器来覆盖横越路线时,称之为 K -栅栏覆盖。

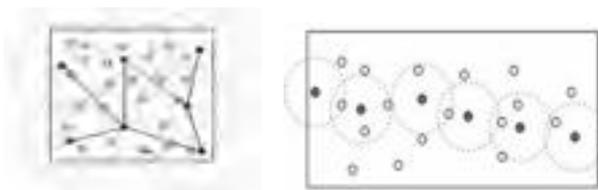


图1 区域覆盖
实心点表示选中的传感器,周围虚线圆表示其覆盖范围

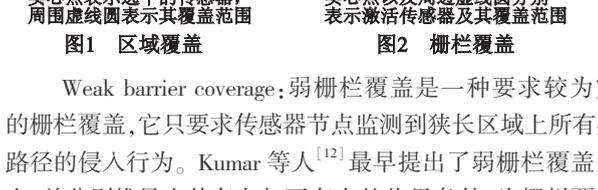


图2 栅栏覆盖
实心点以及周边虚线圆分别表示激活传感器及其覆盖范围

Weak barrier coverage: 弱栅栏覆盖是一种要求较为宽松的栅栏覆盖,它只要求传感器节点监测到狭长区域上所有叠合路径的侵入行为。Kumar 等人^[12] 最早提出了弱栅栏覆盖的概念,并分别推导出其存在与不存在的临界条件,为栅栏覆盖问题提供了很好的判断依据。

L -local K -barrier coverage: 在一些场景中,尽管可能存在栅栏覆盖缺口,但是该覆盖缺口穿越路线可能很长,有时甚至跨越整个带状区域的长度,而入侵者很难发现,一般也不会选择这样的入侵路径(图 3)。文献[13]中据此提出了 L -局部栅栏覆盖的概念,即只要该带状区域所有长度为 L 的部分被 K -栅栏覆盖,那么这个带状区域就是 L -局部 K -栅栏覆盖的。研究者提出并证明了 L -局部 K -栅栏覆盖的条件,并依据此条件设计了本地算法 Localized barrier coverage protocol。所有传感器节点只与周围一段距离的节点通信,依据收集到的信息来决定自身状态。

算法将栅栏覆盖要求放宽到长度为 L 的区域内,使得节点可以根据局部信息来判定栅栏覆盖,从而将算法本地化,可以适用于规模较大的传感器网络。但是在要求苛刻的应用场景中,由于仍然可能存在穿越路径,LBCP 算法并不适用。

Strong barrier coverage: 强栅栏覆盖保证了区域内不存在任何侵入路径。Liu 等人^[14] 指出强栅栏覆盖与区域长宽比有直接关系:随着区域长宽比的增大,穿越路径的存在可能性趋近为 1。研究者提出了 Divide-and-conquer 栅栏构建算法:首先将带状区域分割成两种间隔出现的竖直的小区域,即 vertical strip 和 strip segment。每个区域选取一个节点收集区域信息来构建区域连通图,找出区域内所有水平栅栏,在 vertical strip 中还要找出竖直栅栏。最后将这些小区域合并,构建出强覆盖栅栏。由于栅栏构建的通信只在小区域内进行,该算法为分布式控制算法。

可以看出,Divide-and-conquer 算法将栅栏构建局限在小区域内,较集中算法有效地减少了通信负载和延迟。同时,由于竖直栅栏的存在,很好地保证了构建出的强栅栏的完整性。不

过,区域划分需要传感器的 GPS 功能支持,可以考虑对其进行改进。

2 移动覆盖

2.1 区域覆盖

节点的移动对区域覆盖有较大影响,因为在静止传感器网络中长期得不到覆盖的区域会被移动节点所覆盖,而另外一些区域会因为节点的移动而失去覆盖。Liu 等人^[15]研究了节点移动对区域覆盖的影响,证明移动节点可以提高一定时间间隔内区域的覆盖率。

Virtual force driven movement: 为了提供区域覆盖,且同时满足每个节点有 K 个邻居的要求,文献[16]提出了一种虚拟作用力驱动的节点移动控制算法。假设节点间存在两种虚拟的向量作用力 F_{cover} 和 F_{degree} ,前者使节点间相互排斥以保证区域覆盖的最大化,而后者使节点相互吸引以保证节点邻居数限制。某一时刻节点 j 对 i 施加的作用力为 $F_{cover}(i,j) + F_{degree}(i,j)$ 。其中:

$$F_{cover}(i,j) = \left(\frac{-K_{cover}}{\Delta X_{ij}^2} \right) \left(\frac{X_i - X_j}{\Delta X_{ij}} \right) \quad (1)$$

$$F_{degree}(i,j) = \begin{cases} \frac{K_{degree}}{(\Delta X_{ij} - R_c)^2} \frac{X_i - X_j}{\Delta X_{ij}} & i \text{ 和 } j \text{ 为临界连接} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中: K_{cover} 和 K_{degree} 为力常量; X_i 和 X_j 分别为节点 i 与 j 的位置; ΔX_{ij} 为节点 i 和 j 的距离。某一时刻节点 i 所受作用力为其所有邻居节点对它施加的作用力之和。即有

$$F_i = \sum_{j \in J} F(i,j) \quad (3)$$

其中: J 为 i 节点邻居集合。节点 i 就依据 F_i 来决定自身移动。

由于算法中节点每段移动都需要重新计算虚拟作用力,而这又需要与所有邻近节点进行通信,当网络中节点数目较多时,通信负载以及收敛延迟可能会成为算法的一个瓶颈。因此,该算法可能不适用于规模较大的传感器网络。

2.2 栅栏覆盖

考虑到节点随机部署后可移动,Shen 等人^[17]提出了一种名为 Dbarrier 的分布式节点移动控制算法,使得节点可移动最短的距离来达到栅栏覆盖。算法迭代指定次数,每次迭代节点计算施加在自身的虚拟作用力,根据这个作用力来校正自身位置。这里算法每迭代一次,节点并不是真的从物理上移动,而只是存储下次移动的位置,为此节点需收集两跳以内邻居信息,这样才可保证节点根据邻居节点新位置来重新计算作用力。

尽管也是通过虚拟作用力来驱动节点移动,但是 Dbarrier 算法中节点的虚拟移动有效避免了物理移动产生的过多能量消耗。而相对的,对虚拟位置的存储却增加了节点的存储开销,同时也增加了计算的复杂性,因此对节点能力要求也较高。

2.3 事件监测

不同于区域覆盖及栅栏覆盖,在事件监测(图4)中,研究者更多关心的是监测到指定事件的几率大小。显然,在所有可能发生事件的区域都部署下节点,监测到事件的概率必然为1。但是这要求过多的节点且不能适应拓扑的动态变化,而且由于事件随机出现,节点能量可能很大程度浪费在无用监听上,这些都会耗费较大成本,于是有必要研究移动节点对网络中事件覆盖的影响。

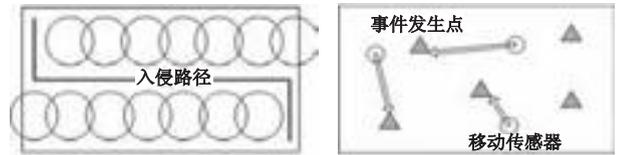


图3 栅栏覆盖中可能存在的入侵路径

图4 事件监测

Reactive movement: 为了避免不必要的节点移动,研究者提出了一种反应式移动策略^[18,19]。传感器网络由静止节点和移动节点构成,事件随机出现在网络中的观察点上。节点围绕观察点构成簇,移动节点可能隶属于多个簇。节点采用以下能量衰减模型:

$$\omega_d = \begin{cases} \frac{\omega}{(d/d_0)^k} & d > d_0 \\ \omega & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中: ω 为处于监测目标发送的信号能量; d 为节点距离目标的距离; K 为常量。假设时钟同步,在第一个监测阶段,所有节点静止并取样相同时间,然后判断取样到的能量值是否超过阈值 λ_1 ,以此来决策是否监测到目标事件,并将决策结果发送给簇头。簇头节点根据收集到的决策信息作出系统决策,如果作出肯定决策,便开始第二个监测阶段,移动节点开始按一定移动策略向观察点移动。每隔 T 时刻,节点将取样到的总能量值与阈值 λ_2 比较,如果大于后者,作出肯定决策并报告簇头,该节点停止监测。第二阶段结束后,如果取样到的总能量值未超过阈值,节点作出否定决策并报告簇头。

反应式移动策略不仅减少了不必要移动带来的能量消耗,而且提高了事件的监测率。但是,这是以提高通信量和算法复杂度为代价的,于是就对网络质量以及节点计算能力提出了较高的要求。

Utility-driven sampling: 文献[20]中提出的效用驱动移动决策算法定义了一个参数化的取样效用函数来度量事件的取样质量,并以此来决策节点的移动。在算法初始阶段,所有节点随机移动。监测到事件后,节点开始定期广播 DIS 包,其中包含自身位置及监测到的数据。随着 DIS 包的交换,节点维护一张邻居表,表中节点与自身监测到同一事件。随后,监测到同一事件的节点在虚力的作用下散开,同时节点开始在两跳范围以内构成群。每个群选举群头,群头收集群中所有节点侦测的事件,当发现该群对某一事件的覆盖不完全时,便广播“招募”信息来吸收节点。收到消息的节点计算效用信息后,决定是否加入该群。

算法以群为单位对事件进行监测,可以有效减少不必要的节点移动。但是由于“招募”消息在网络中传播,而距群较远的节点(对消息响应的可能性很小)收到消息后也会进行计算和决策,增加了不必要的通信和计算。

BELP&Sweep coverage: 文献[21]提出了 bound event loss probability (BELP) 问题,即通过控制节点的移动,将事件的丢失率限制到一定范围。为了限制事件的丢失率,需要保证每个事件发生点(POI)的覆盖间隔最多为 $T_{critical}$ (由事件丢失率推出),Cheng 等人^[22]将这种时间限制的覆盖问题称为 sweep coverage。

Bisnik 等人^[21]以监测到事件的时间段以及可能性为指标,分别对最小速度 BELP 和最少节点 BELP 问题进行了研究,提出了多项式时间的近似算法,由管理者对节点的移动进行集中控制。

针对 sweep coverage 问题,文献[22]提出了 Dsweep 分布式

移动控制算法。该算法由 Epidemic exchange 和 Next-POI 两部分组成,前者用于节点交换和更新 POI 的覆盖信息,后者则使节点决策向距离自身最近的覆盖时间要求最为紧迫的 POI 移动。实验表明 Dsweep 算法从性能和效用方面均远远超过了节点随机移动的算法。算法存在的问题是:由于节点通过 Next-POI 决策后,总是倾向距自身较近的 POI 移动,部分 POI 可能因此长期得不到节点的覆盖,从而降低了对事件的监测率。

3 结束语

覆盖问题是无线传感器网络中一个比较重要的问题,它不仅涉及到网络的服务质量,而且会对网络中其他问题的研究产生影响。无线传感器网络资源有限,拓扑动态性强,在研究覆盖问题时,需要考虑这些特点。研究者针对不同的应用场景,已对无线传感器网络的覆盖问题进行了相当多的研究工作。本文对近年来提出的一些覆盖机制进行了总结,可以看出,由于对应用场景的针对性较强,这些覆盖机制都或多或少在能量有效性、计算复杂度、通信开销以及工程实现方面存在不足。而随着新的传感器网络模型的出现,网络可能会具有更多不同的应用要求和规模,节点的通信、计算和感知能力也会更为多样化。未来 WSN 覆盖问题的研究工作将会集中在以下几个方面:a)尽管现有的覆盖机制已经对能量有效性进行了相当多的研究,但是能量有限始终是 WSN 面临的一个主要问题。保证能量有效性,从而最大化网络生存时间仍是覆盖问题研究的一个重点,而且它也是评估覆盖机制的一个重要指标。b)为了更好地适应普适计算的需求,移动节点开始被引入到无线传感器网络中。目前移动覆盖机制尤其是事件监测机制的研究工作仍处在起步阶段,如何通过设计更为完善的节点移动控制机制,从而进一步提高事件监测率,将成为覆盖问题的一个研究热点。c)网络管理是无线传感器网络的一项热门研究课题,覆盖信息是网络中的重点管理对象之一。将覆盖机制与不同的网络管理模型相结合,将成为下一步覆盖机制研究的趋势。

参考文献:

- [1] MEGUERDICHIAN S, KOUSHANFAR F, POTKONJAK M, *et al.* Coverage problems in wireless Ad hoc sensor networks[C]//Proc of the 20th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington DC: IEEE Computer Society, 2001: 1380-1387.
- [2] WOEHRLE M, BROCKHOFF D, HOHM T, *et al.* Investigating coverage and connectivity trade-offs in wireless sensor networks: the benefits of MOEAs, TIK Report 294[R]. Zurich: Computer Engineering and Networks Lab, ETH Zurich, 2008.
- [3] HEFEEDA M, BAGHERI M. Efficient K -coverage algorithms for wireless sensor networks[D]. Vancouver: Simon Fraser University, 2006.
- [4] SIQUEIRA I G, RUIZ L B, LOUREIRO A A F, *et al.* Coverage area management for wireless sensor networks[J]. *International Journal of Network Management*, 2007, 17(1): 17-31.
- [5] RUIZ L B, NOGUEIRA J M, LOUREIRO A A F. MANNA: a management architecture for wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(2): 116-125.
- [6] BAI Xiao-le, KUMAR S, XUAN Dong, *et al.* Deploying wireless sensors to achieve both coverage and connectivity[C]//Proc of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: Association for Computing Machinery, 2006: 131-142.
- [7] BAI Xiao-le, YUN Zi-qiu, XUAN Dong, *et al.* Deploying four-connectivity and full-coverage wireless sensor networks[C]//Proc of the 27th Conference on Computer Communications. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 296-300.
- [8] BAI Xi-qiu, XUAN Dong, YUN Zi-qiu, *et al.* Complete optimal deployment patterns for full-coverage and K -connectivity ($K \leq 6$) wireless sensor networks[C]//Proc of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: Association for Computing Machinery, 2008: 401-410.
- [9] ZHANG Hong-hai, HOU J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. *Journal on Wireless Ad hoc and Sensor Networks*, 2005, 1(1-2): 89-123.
- [10] HUANG Chi-fu, TSENG Y C. The coverage problem in a wireless sensor network[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2005, 10(4): 519-528.
- [11] JIANG J R, SUNG T M. Maintaining connected coverage for wireless sensor networks[C]//Proc of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 297-302.
- [12] KUMAR S, LAI T H, ARORA A. Barrier coverage with wireless sensors[C]//Proc of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: Association for Computing Machinery, 2005: 284-298.
- [13] CHEN Ai, KUMAR A, LAI T H. Designing localized algorithms for barrier coverage[C]//Proc of the 13th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: Association for Computing Machinery, 2007: 63-74.
- [14] LIU Ben-yuan, DOUSSE O, WANG Jie, *et al.* Strong barrier coverage of wireless sensor networks[C]//Proc of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: Association for Computing Machinery, 2008: 411-420.
- [15] LIU Ben-yuan, BRASS P, DOUSSE O, *et al.* Mobility improves coverage of sensor networks[C]//Proc of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: Association for Computing Machinery, 2005: 300-308.
- [16] PODURI S, SUKHATME G S. Constrained coverage for mobile sensor networks[C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington DC: IEEE Computer Society, 2004: 165-171.
- [17] SHEN Chang-xiang, CHENG Wei-fang, LIAO Xiang-ke, *et al.* Barrier coverage with mobile sensors[C]//Proc of International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 99-104.
- [18] XING Guo-liang, WANG Jian-ping, SHEN Ke, *et al.* Mobility-assisted spatio-temporal detection in wireless sensor networks[C]//Proc of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 103-110.
- [19] TAN Rui, XING Guo-liang, WANG Jian-ping, *et al.* Collaborative target detection in wireless sensor networks with reactive mobility[C]//Proc of the 16th International Workshop on Quality of Service. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 150-159.
- [20] YANG Yu, RITTLE L J. Utility-driven spatio-temporal sampling using mobile sensors[C]//Proc of the 27th Conference on Computer Communications. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 2225-2233.
- [21] BISNIK M, ABOUZEID A A, ISLER A A. Stochastic event capture using mobile sensors subject to a quality metric[J]. *IEEE Trans on Robotics*, 2007, 23(4): 676-692.
- [22] CHENG Wei-fang, LI Mo, LIU Ke-bin, *et al.* Sweep coverage with mobile sensors[C]//Proc of IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 1-9.