

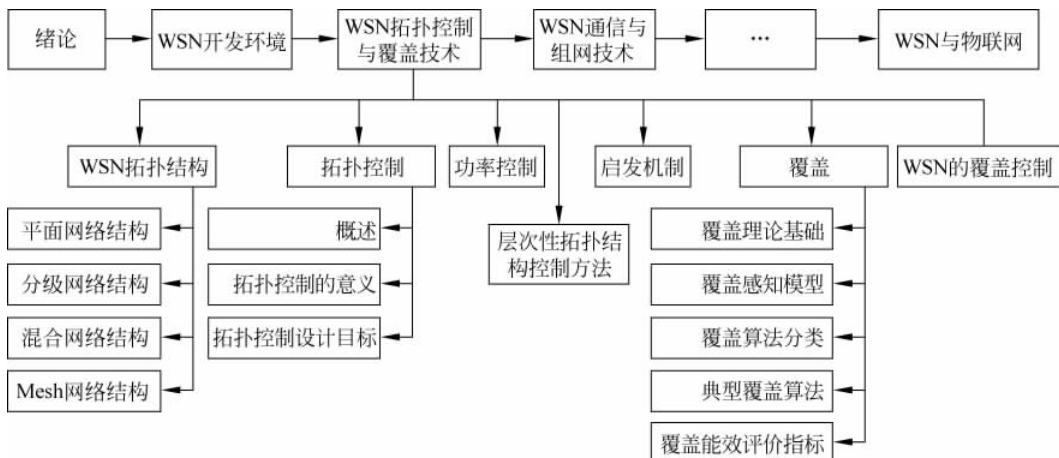
第3章

WSN拓扑控制与覆盖技术

学习目标

- 掌握 WSN 拓扑结构的分类。
- 掌握 WSN 平面网络结构。
- 掌握 WSN 分级网络结构。
- 掌握 WSN 混合网络结构。
- 掌握 Mesh 网络结构。
- 了解 WSN 拓扑控制的意义。
- 了解 WSN 拓扑控制设计目标。
- 了解 WSN 功率控制。
- 掌握层次性拓扑结构控制方法。
- 了解启发机制。
- 了解覆盖理论基础。
- 了解覆盖感知模型。
- 了解覆盖算法分类。
- 了解典型覆盖算法。
- 了解覆盖能效评价指标。
- 了解覆盖控制的基本思想。

学习导航



3.1 WSN 拓扑结构

无线传感器网络的网络拓扑结构是组织无线传感器节点的组网技术,有多种形态和组网方式。

按照其组网形态和方式分,有集中式、分布式和混合式。无线传感器网络的集中式结构类似移动通信的蜂窝结构,集中管理;无线传感器网络的分布式结构,类似 AdHoc 网络结构,可自组织网络接入连接,分布管理;无线传感器网络的混合式结构包括集中式和分布式结构的组合。

按照节点功能及结构层次分,无线传感器网络通常可分为平面网络结构、分级网络结构、混合网络结构,以及 Mesh 网络结构。

无线传感器网络的网状式结构,类似 Mesh 网络结构,网状分布连接和管理。无线传感器节点经多跳转发,通过基站或汇聚节点或网关接入网络,在网络的任管理节点对感应信息进行管理、分类和处理,再把感应信息送给用户使用。

3.1.1 平面网络结构

如图 3-1 所示,平面网络结构是无线传感器网络中最简单的一种拓扑结构,具有以下特点:

(1) 所有节点为对等结构,具有完全一致的功能特性,也就是说每个节点均包含相同的 MAC、路由、管理和安全等协议。

(2) 这种网络拓扑结构简单,易维护,具有较好的健壮性,事实上就是一种 AdHoc 网络结构形式。

(3) 由于没有中心管理节点,故采用自组织协同算法形成网络,其组网算法比较复杂。

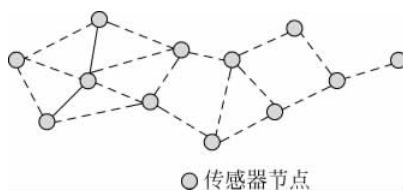


图 3-1 无线传感器网络平面网络结构

3.1.2 分级网络结构

如图 3-2 所示,分级网络结构(也叫层次网络结构)是无线传感器网络中平面网络结构的一种扩展拓扑结构,具有以下特点:

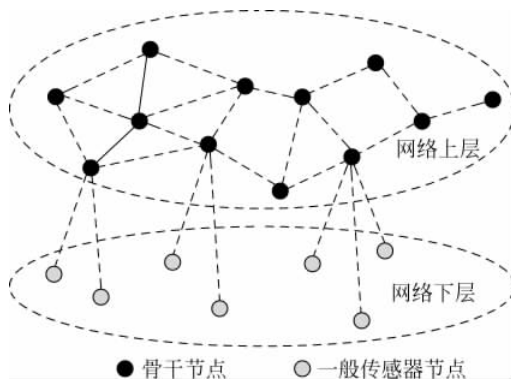


图 3-2 无线传感器网络分级网络结构

(1) 网络分为上层和下层两个部分：上层为中心骨干节点，下层为一般传感器节点。

(2) 通常网络可能存在一个或多个骨干节点，骨干节点之间或一般传感器节点之间采用的是平面网络结构；具有汇聚功能的骨干节点和一般传感器节点之间采用的是分级网络结构。

(3) 所有骨干节点为对等结构，骨干节点和一般传感器节点有不同的功能特性，也就是说每个骨干节点均包含相同的 MAC、路由、管理和安全等功能协议，而一般传感器节点可能没有路由、管理及汇聚处理等功能。

(4) 这种分级网络通常以簇的形式存在，按功能分为簇首(具有汇聚功能的骨干节点：Clusterhead)和成员节点(一般传感器节点：Members)。

(5) 这种网络拓扑结构扩展性好，便于集中管理，可以降低系统建设成本，提高网络覆盖率和可靠性，但是集中管理开销大，硬件成本高，一般传感器节点之间可能不能够直接通信。

3.1.3 混合网络结构

如图 3-3 所示，混合网络结构是无线传感器网络中平面网络结构和分级网络结构的一种混合拓扑结构，具有以下特点：

(1) 网络骨干节点之间及一般传感器节点之间都采用平面网络结构，而网络骨干节点和一般传感器节点之间采用分级网络结构。

(2) 这种网络拓扑结构和分级网络结构不同的是一般传感器节点之间可以直接通信，可不需要通过汇聚骨干节点来转发数据。

(3) 这种结构同分级网络结构相比，支持的功能更加强大，但所需的硬件成本更高。

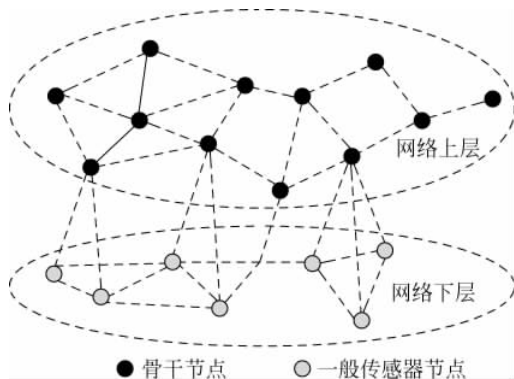


图 3-3 无线传感器网络混合网络结构

3.1.4 Mesh 网络结构

Mesh 网络结构是一种新型的无线传感器网络结构，较前面的传统无线网络拓扑结构具有一些结构和技术上的不同。

从结构来看，Mesh 网络是规则分布的网络，不同于完全连接的网络结构，如图 3-4 所示。

(1) 通常只允许和节点最近的邻居通信，如图 3-5 所示，网络内部的节点一般都是相同的。

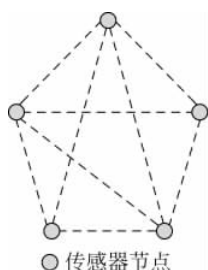


图 3-4 完全连接的网络结构

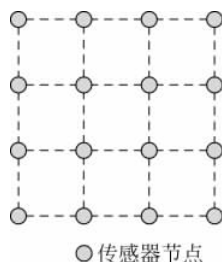


图 3-5 无线传感器 Mesh 网络结构

(2) Mesh 网络是构建大规模无线传感器网络的一个很好的结构模型,特别是那些分布在一个地理区域的传感器网络,如人员或车辆安全监控系统。尽管这里反映通信拓扑的是规则结构,然而节点实际的地理分布不必是规则的 Mesh 结构形态。由于通常 Mesh 网络结构节点之间存在多条路由路径,网络对于单点或单个链路故障具有较强的容错能力和鲁棒性。

(3) Mesh 网络结构最大的优点就是尽管所有节点都是对等的地位,且具有相同的计算和通信传输功能,但某个节点可被指定为簇首节点,而且可执行额外的功能。一旦簇首节点失效,另外一个节点可以立刻补充并接管原簇首那些额外执行的功能。

不同的网络结构对路由和 MAC 的性能影响较大,例如,一个 $n \times m$ 的二维 Mesh 网络结构的无线传感器网络拥有 nm 条连接链路,每个源节点到目的节点都有多条连接路径。对于完全连接的分布式网络的路由表随着节点数的增加而成指数增加,且路由设计复杂度是个 NP-hard 问题。通过限制允许通信的邻居节点数目和通信路径,可以获得一个具有多项式复杂度的再生流拓扑结构,基于这种结构的流线型协议本质上就是分级的网络结构。如图 3-6 所示,采用分级网络结构技术可使 Mesh 网络路由设计要简单得多,由于一些数据处理可以在每个分级的层次里面完成,因而比较适合于无线传感器网络的分布式信号处理和决策。

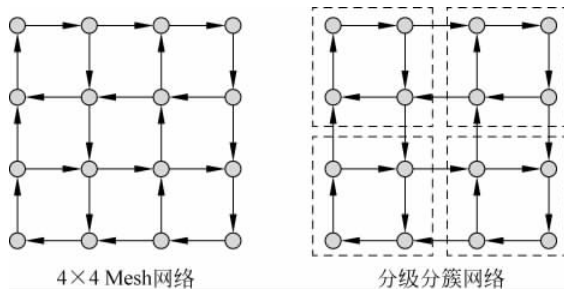


图 3-6 采用分级网络结构技术的 Mesh 网络结构

从技术上来看,基于 Mesh 网络结构的无线传感器具有以下特点。

(1) 由无线节点构成网络:这种类型的网络节点由一个传感器或执行器构成且连接到一个双向无线收发器上。数据和控制信号是通过无线通信的方式在网络上传输的,节点可以方便地通过电池来供电。

(2) 节点按照 Mesh 拓扑结构部署,网内每个节点至少可以和一个其他节点通信,这种方式可以实现比传统的集线式或星型拓扑更好的网络连接性。除此之外,Mesh 网络结构

还具有以下特征：自我形成，即当节点打开电源时，可以自动加入网络；自愈功能，当节点离开网络时，其余节点可以自动重新路由它们的消息或信号到网络外部的节点，以确保存在一条更加可靠的通信路径。

(3) 支持多跳路由：来自一个节点的数据在其到达一个主机网关或控制器之前，可以通过多个其余节点转发。在不牺牲当前信道容量的情况下，扩展无线传感器网络的覆盖范围是无线传感器网络设计和部署的一个重要目标之一。通过 Mesh 方式的网络连接，只需短距离的通信链路，经受较少的干扰，因而可以为网络提供较高的吞吐量及较高的频谱复用效率。

(4) 功耗限制和移动性取决于节点类型及应用的特点：通常基站或汇聚节点移动性较低，感应节点可能移动性较高。基站通常不受电源限制，而感应节点通常由电池供电。

(5) 存在多种网络接入方式，可以通过星型、Mesh 等节点方式和其他网络集成。

在无线传感器网络实际应用中，通常根据应用需求来灵活地选择合适的网络拓扑结构。

3.2 拓扑控制

3.2.1 概述

拓扑控制技术是无线传感器网络中的基本问题。动态变化的拓扑结构是无线传感器网络最大的特点之一，因此拓扑控制策略在无线传感器网络中有着重要的意义，它为路由协议、MAC 协议、数据融合、时间同步和目标定位等很多方面奠定了基础。目前，在网络协议分层中没有明确的层次对应拓扑控制机制，但大多数的拓扑控制算法是部署于介质访问控制层(MAC)和路由层(Routing)之间的，它为路由层提供足够的路由更新信息，反之，路由表的变化也反作用于拓扑控制机制，MAC 层可以提供给拓扑控制算法邻居发现等消息，如图 3-7 所示。



图 3-7 拓扑控制与网络分层关系示意图

无线传感器网络的拓扑控制问题，是在网络相关资源普遍受限的情况下，对于固定或具有移动特征的无线传感器网络通过控制传感器节点与无线通信链路组成网络的拓扑属性来减少网络能量消耗与无线干扰，并有效改善整体网络的连通性、吞吐量与传播延时等性能指标。给定一个传感器网络，无线传感器网络拓扑控制也可以一般性地总结为：在全网协作式地进行各个传感器节点功率控制（传输半径调节），从而达到网络能量消耗与无线干扰的减少。

3.2.2 拓扑控制的意义

对于自组织的无线传感器网络而言，拓扑控制对网络性能影响非常大。良好的逻辑拓扑结构能够提高路由协议和 MAC 协议的效率，为数据融合、时间同步和目标定位等很多方面奠定基础，有利于节省节点的能量来延长整个网络的生存时间。所以，拓扑控制是传感器网络中的一个基本问题，同时也是研究的核心问题之一，因而对它的研究具有十分重要的意义，主要表现在以下 5 个方面：

(1) 网络寿命,传感器节点一般采用电池供电,能耗是网络设计中需要考虑的最主要的因素之一,而拓扑控制的一个重要目标就是保证网络连通性和覆盖率的条件下,尽量降低网络能耗,延长网络生存周期。

(2) 减少节点通信负载,提高通信效率,传感器节点分布密度一般较大,拓扑控制技术中的功率控制技术可以选择节点的发射功率,合理调节节点的通信范围,使得节点在连通性和网络通信范围之间取得一个平衡点。

(3) 辅助路由协议,在无线传感器网络中,只有活动的节点才能进行数据转发,而拓扑控制可以确定由哪些节点作为转发节点,同时确定节点之间的邻居关系。

(4) 数据融合策略选择,无线传感器网络中,为了减少通信负载通常选择一些节点对周围节点的数据进行融合再进行转发,而拓扑控制中就如何合理高效地选择融合节点进行研究。

(5) 节点冗余,由于传感器节点本身所固有的脆弱性不能保证节点一直持续正常工作,所以在设计时需要采用冗余技术对网络进行拓扑控制以保证网络的覆盖率和连通度。

3.2.3 拓扑控制设计目标

拓扑控制研究的问题是在保证一定的网络连通质量和覆盖质量的前提下,一般以延长网络的生命期为主要目标,通过功率控制和骨干网节点选择,剔除节点之间不必要的通信链路,兼顾通信干扰、网络延迟、负载均衡、简单性、可靠性、可扩展性等其他性能,形成一个数据转发的优化网络拓扑结构。传感器网络用来感知客观物理世界,获取物理世界的信息。客观世界的物理量多种多样,不可穷尽,不同的传感器网络应用关心不同的物理量,不同的应用背景对传感器网络的要求不同,其硬件平台、软件系统和网络协议必然会有很大差别。不同的应用对底层网络的拓扑控制设计目标的要求也不尽相同。拓扑控制中一般要考虑的设计目标有以下几个方面。

1. 覆盖

覆盖是对传感器网络服务质量的量度,即在保证一定的服务质量条件下,使得网络覆盖范围最大化,提供可靠的区域监测和目标跟踪服务。WSN 覆盖问题根据传感器节点是否具有移动能力可分为静态网络覆盖和动态网络覆盖。静态网络覆盖又分为区域覆盖(Area Coverage)、点覆盖(Point Coverage)和栅栏覆盖(Barrier Coverage)。区域覆盖研究对目标区域的覆盖(监测)问题;点覆盖研究的是对一些离散的目标点的覆盖问题;栅栏覆盖研究运动物体穿越网络部署区域被发现、检测的概率问题。目前,区域覆盖是目前研究最多的领域。Voronoi 图是常用的覆盖分析工具。对于动态网络,可以利用节点的移动能力,在初始随机部署后,根据网络覆盖的要求实现节点的重部署。虚拟势场方法是一种重要的部署方法。

2. 连通

传感器网络一般是大规模的,所以传感器节点感知到的数据一般要以多跳的方式传送到汇聚节点,这就要求拓扑控制必须保证网络的连通性。拓扑控制一般要保证网络是连通的,有些应用可能要求网络配置要达到指定的连通度;有时也讨论渐近意义上的连通,即当部署的区域趋于无穷大时,网络连通的可能性趋于 1。

3. 网络生命期

一般将网络生命期定义为直到死亡节点的百分比低于某个阈值时的持续时间;也可以

通过对网络的服务质量的量度来定义网络的生命期,我们可以认为网络只有在满足一定的覆盖质量、连通质量、某个或某些其他服务质量时才是存活的。最大限度地延长网络的生命期是一个十分复杂的问题,它一直是拓扑控制研究的主要目标。

4. 吞吐能力

设目标区域是一个凸区域,每个节点的吞吐率为 $\lambda b/s$,在理想情况下,则有下列的关系式:

$$\lambda \leq \frac{16AW}{\pi\Delta^2 L} \cdot \frac{1}{nr} \quad (3-1)$$

式中, A 为目标区域的面积; W 为节点的最高传输速率; Δ 为大于 0 的常数; L 为源节点到目的节点的平均距离; n 为节点数; r 为理想球状无线电发射模型的发射半径。

由式(3-1)可知,通过功率控制减小发射半径和通过睡眠调度减小工作网络的规模,可以在节省能量的同时,在一定程度上提高网络的吞吐能力。

5. 干扰和竞争

减小通信干扰、减少层的竞争和延长网络的生命期基本上是一致的。对于功率控制,网络无线信道竞争区域的大小与节点的发射半径 r 成正比,所以减小 r 就可以减少竞争;对于睡眠调度,可以使尽可能多的节点处于睡眠状态,减小干扰和减少竞争。

6. 网络延迟

功率控制和网络延迟之间的大致关系是:当网络负载较低时,高发射功率减少了源节点到目的节点的跳数,所以降低了端到端的延迟;当网络负载较高时,节点对信道的竞争是激烈的,低发射功率由于缓解了竞争而减小了网络延迟。

7. 拓扑性质

对于网络拓扑的优劣,很难给出定量的量度。因此,在设计拓扑控制策略时,往往只是使网络具有一些良好的拓扑性质,除了覆盖性、连通性之外,对称性、平面性、稀疏性、节点度的有界性、有限伸展性等,都是希望具有的性质。除此之外,拓扑控制还要考虑负载均衡、简单性、可靠性、可扩展性等其他方面的性质。

3.3 功率控制

传感器网络中节点发射功率的控制也称功率分配问题。节点通过设置或动态调整节点的发射功率,在保证网络拓扑结构连通、双向连通或者多连通的基础上,使得网络中节点的能量消耗最小,延长整个网络的生存时间。当传感器节点部署在二维或三维空间中时,传感器网络的功率控制是一个非常复杂的问题。因此,试图寻找功率控制问题的最优解是不现实的,应该从实际出发,寻找功率控制问题的实用解。针对这一问题,当前已经提出了一些解决方案,其基本思想都是通过降低发射功率来延长网络的生命期的。

1. 基于节点度的功率控制

基于节点度的算法是传感器网络拓扑控制中功率控制方面的问题。一个节点的度数是指所有距离该节点一跳的邻居节点的数目。基于节点度算法的核心思想是给定节点度的上限和下限需求,动态调整节点的发射功率,使得节点的度数落在上限和下限之间。基于节点度的算法利用局部信息来调整相邻节点间的连通性,从而保证整个网络的连通性,同时保证

节点间的链路具有一定的冗余性和可扩展性。本地平均算法(Local Mean Algorithm, LMA)和本地邻居平均算法(Local Mean of Neighbors Algorithm, LMN)是两种周期性动态调整节点发射功率的算法,它们之间的区别在于计算节点度的策略不同。

2. 基于方向的功率控制

微软亚洲研究院的 Wattenhofer 和康奈尔大学的 Li 等人提出了一种能够保证网络连通性的基于方向的 CBTC(Cone-Based Distributed Topology Control)算法。其基本思想是:节点 u 选择最小功率 $P_{u,p}$,使得在任何以 u 为中心且角度为 p 的锥形区域内至少有一个邻居;而且,当 $p \leq 5\pi/6$ 时,可以保证网络的连通性。麻省理工学院的 Bahramgiri 等人又将其推广到三维空间,提出了容错的 CBTC。基于方向的功率控制算法需要可靠的方向信息,因而需要很好地解决到达角度问题,节点需要配备多个有向天线,因此对传感器节点提出了较高的要求。

3. 基于邻近图的功率控制

伊利诺伊大学的 Li 和 Hou 提出的 DRNG(Directed Relative Neighborhood Graph)和 DLMST(Directed Local Minimum Spanning Tree)是两个具有代表性的基于临近图理论的功率控制算法。基于临近图的功率控制算法的基本思想是:设所有节点都使用最大发射功率发射时形成的拓扑图 G ,按照一定的邻居判别条件 q 求出该图的临近图 G' ,最后 G' 中的每个节点以自己所临近的最远通信节点来确定发射功率。这是一种解决功率分配问题的近似解法,考虑到无线传感器网络中两个节点形成的边是有向的,为了避免形成单向边,一般运用基于临近图的功率控制算法形成网络拓扑以后,还需要进行节点之间边的增删,以使最后得到的网络拓扑是双向连通的。在无线传感器网络中,基于临近图功率控制算法的作用是使节点确定自己的邻居集合,调整适当的发射功率,从而在建立起一个连通网络的同时使得能量消耗最低。经典的临近图模型有 RNG(Relative Neighborhood Graph)、GG(Gabriel Graph)、DG(Delaunay Graph)、YG(Yao Graph)和 MST(Minimum Spanning Tree)等。DRNG 是基于有向 RNG 的,DLMST 是基于有向局部 MST、DRNG 和 DLMST 的。能够保证网络的连通性,在平均功率和节点度等方面具有较好的性能。基于临近图的功率控制一般需要精确的位置信息。

DRNG 算法和 DLSS 算法着重考虑了网络的连通性,充分利用了邻居图理论,是无线传感器网络中的经典算法,以原始网络拓扑双向连通为前提,保证优化后的拓扑也是双向连通的。

此外,微软亚洲研究院的 Wattenhofer 等人提出的 XTC 算法对传感器节点没有太高的要求,对部署环境也没有过强的假设,提供了一个面向简单、使用的研究方向。XTC 代表了功率控制的发展趋势,下面将详细加以介绍。

4. XTC 算法

XTC 算法的基本思想是用接收信号的强度作为 RNG 中的距离量度,XTC 算法可分为以下三步:

(1) 邻居排序,节点 u 对其所有的邻居计算一个反映链路质量的全序 $\prec_u$ 。在 $\prec_u$ 中,如果节点 w 在节点 v 的前面,则记为 $w \prec_u v$,节点 u 与 $\prec_u$ 中出现越早的节点之间的链路,其质量越好。

(2) 信息交换,节点 u 向其邻居广播自己的 $\prec_u$,同时接收邻居节点建立的 $\prec_u$;

(3) 链路选择, 节点 u 按顺序遍历 $\langle u$, 先考虑好邻居, 再考虑坏邻居, 对于 u 的邻居 v , 如果节点 u 没有更好的邻居 w , 使得 $w < u^v$, 那么 u 就和 v 建立一条通信链路。

XTC 算法不需要位置信息, 对传感器节点没有太高的要求, 适用于异构网络, 也适用于三维网络。与大多数其他算法相比, XTC 算法更简单、更实用。但是, XTC 算法与实用化要求仍然有一定的距离, XTC 算法并没有考虑到通信链路质量的变化。

3.4 层次性拓扑结构控制方法

在传感器网络中, 传感器节点的无线通信模块在空闲状态时的能量消耗与在首发状态时相当, 所以只有关闭节点的通信模块, 才能大幅度地降低无线通信模块的能量开销。考虑依据一定的机制选择某些节点作为骨干网节点, 打开通信模块, 并关闭非骨干节点的通信模块, 由骨干节点构建一个联通网络来负责数据的路由转发。这样既保证了原有覆盖范围内的数据通信, 也在很大程度上节省了节点能量。在这种拓扑管理机制下, 网络中的节点可以划分为骨干网节点和普通节点两类, 骨干网节点对周围的普通节点进行管辖。这类算法将整个网络划分为相连的区域, 一般又称为分簇算法。骨干网节点是簇头节点, 普通节点是簇内节点。由于簇头节点需要协调簇内节点的工作, 负责数据的融合和转发, 能量消耗相对较大, 所以分簇算法通常采用周期性地选择簇头节点的做法以均衡网络中节点的能量消耗。

层次型拓扑结构具有很多优点, 例如, 由簇头节点担负数据融合的任务, 减少了数据通信量; 分簇式的拓扑结构有利于分布式算法的应用, 适合大规模部署的网络; 由于大部分节点在相当长的时间内关闭通信模块, 所以显著地延长了整个网络的生存时间等。

1. LEACH 算法

LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)算法是一种自适应分簇拓扑算法, 它的执行过程是周期性的, 每轮循环分为簇的建立阶段和稳定的数据通信阶段。在簇的建立阶段, 相邻节点动态地形成簇, 随机产生簇头; 在数据通信阶段, 簇内节点把数据发送给簇头, 簇头进行数据融合并把结果发送给汇聚节点。由于簇头需要完成数据融合、汇聚节点通信等工作, 所以能量消耗大。LEACH 算法能够保证各节点等概率地担任簇头, 使得网络中的节点相对均衡地消耗能量。

LEACH 算法选举簇头的过程如下: 节点产生 $0 \sim 1$ 的随机数, 如果这个数小于阈值 $T(n)$, 则发布自己是簇头的消息; 在每轮循环中, 如果节点已经当选过簇头, 则把 $T(n)$ 设置为 0, 这样该节点不会再次当选为簇头; 对于未当选过簇头的节点, 则将以 $T(n)$ 的概率当选; 随着当选过簇头的节点数目的增加, 剩余节点当选簇头的阈值 $T(n)$ 随之增大, 节点产生小于 $T(n)$ 的随机数的概率也随之增大, 所以节点当选簇头的概率增大。当只剩下一个节点未当选时, $T(n)=1$, 表示这个节点一定当选。 $T(n)$ 可表示为

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \left(r \bmod \frac{1}{p} \right)}, & n \in G \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-2)$$

式中 p 为期望的簇头在所有节点中所占的百分比; r 为选举轮数, $r \bmod (1/p)$ 代表这一轮循环中当选过簇头节点的个数; G 为这一轮循环中未当选过簇头的节点集合。

节点当选簇头以后,发布消息告知其他节点自己是新簇头。非簇头节点根据自己与簇头之间的距离来选择加入哪个簇,并告知该簇头。当簇头接收到所有的加入信息后,就产生一个 TDMA 定时消息,并且通知该簇中所有节点。为了避免附近簇的信号干扰,簇头可以决定本簇中所有节点所用的 CDMA 编码。这个用于当前阶段的 CDMA 编码连同 TDMA 定时一起发送。当簇内节点收到这个消息后,它们就会在各自的时间槽内发送数据。经过一段时间的数据传输,簇头节点收齐簇内节点发送的数据后,运行数据融合算法来处理数据,并将结果直接发送给汇聚节点。

经过一轮选举过程,可以看到如图 3-8 所示的簇的分布,整个网络覆盖区域被划分为 5 个簇,图中黑色节点代表簇头。可以明显地看出经 LEACH 算法选举出的簇头的分布并不均匀,这是需要改进的方面。

2. GAT 算法

GAT 算法是一种依据节点的地理位置进行分簇,并对簇内的节点选择性地地进行休眠的路由算法。其核心思想是:在各数据源到数据目的地之间存在有效通路的前提下,尽量减少参与数据传输的节点数,从而减少用于数据包侦听和接收的能量开销。

它将无线传感器网络划分成若干个单元格(簇),各单元格内任意一个节点都可以被选为代表,代替本单元格内所有其他节点完成数据包向相邻单元格的转发。被选中的节点成为本单元格的簇头节点;其他节点都进行休眠,不发送、接收和侦听数据包。

GAT 算法通常分为虚拟单元格的划分和虚拟单元格中簇头节点的选择两个阶段。

(1) 虚拟单元格的划分。节点根据其位置信息和通信半径将网络区域划分为若干虚拟单元格,并保证相邻单元格中的任意两个节点都可以直接通信,假设节点已知整个监测区域的位置信息和本身的位置信息,节点可以通过计算得知自己属于哪个单元格。

(2) 虚拟单元格中的簇头节点的选择。节点周期性进入睡眠和工作状态,从睡眠状态唤醒后与本单元内其他节点进行信息交换,以此确定自己是否需要成为簇头节点,每个节点处于发现、活动以及睡眠三种状态。在网络初始化时,所有节点均处于发现状态,每个节点通过发送广播消息通告自己的位置和 ID 等信息,然后每个节点将自身定时器设置为某个区间内的随机值 T_d ,一旦定时器超时,节点发送消息声明其进入活动状态,成为簇头。节点如果在定时器超时前收到来自同一单元格内其他节点成为簇头的声明,则说明自己在这次簇头竞争中失败,从而进入睡眠状态。成为簇头的节点设置定时器 T_a 来设置自己处于活动状态的时间。在 T_a 超时前,簇头节点定期广播自己处于活动状态的信息,以抑制其他处于发现状态的节点进入活动状态;当 T_a 超时后,簇头节点重新回到发现状态,处于活动状态的节点如果发现本单元格出现了更适合成为簇头的节点,会自动进入睡眠状态。

由于节点处于侦听状态时也会消耗很多能量,所以让节点处于睡眠状态成为传感器拓扑控制算法中常见的方法,GAT 算法的优点是在节点密集型分布的网络中休眠了部分节点,节省了网络总能耗。但 GAT 算法没有考虑移动节点的存在,实际应用环境中,簇头节

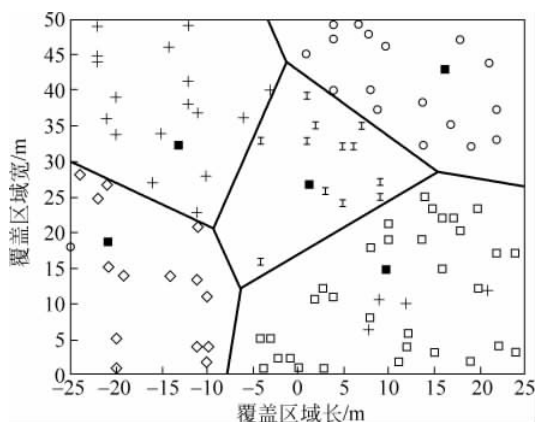


图 3-8 簇的分布

点很容易从一个单元格移动至另一个单元格,从而造成某些单元格内没有节点转发数据包,最终造成大量丢包和重复发包,导致总能耗的增加。

3.5 启发机制

传感器网络通常是面向应用的事件驱动的网络,骨干网节点在没有检测到事件时不必一直保持在活动状态。在传感器网络的拓扑控制算法中,除了传统的功率控制和层次型拓扑控制两个方面之外,也提出了启发式的节点唤醒和休眠机制。该机制能够使节点在没有事件发生时设置通信模块为睡眠状态,而在有事件发生时及时自动醒来并唤醒邻居节点,形成数据转发的拓扑结构。这种机制的引入,使得无线通信模块大部分时间都处于关闭状态,只有传感器模块处于工作状态。由于无线通信模块消耗的能量远大于传感器模块,所以这进一步节省了能量开销。这种机制重点在于解决节点在睡眠状态和活动状态之间的转换问题,不能够独立作为一种拓扑结构控制机制,需要与其他拓扑控制算法结合使用。

1. STEM 算法

STEM(Sparse Topology and Energy Management)算法是一种低占空比的节点唤醒机制。该算法采用双信道,即监听信道和数据通信信道。具体地讲,STEM 算法又分为 STEM-B(STEM-BEACON)算法和 STEM-T(STEM-TONE)算法。

在 STEM-B 算法中,当一个节点想给另外一个节点发送数据时,它作为主动节点先发送一串唤醒包。目标节点在收到唤醒包后,发送应答信号并自动进入数据接收状态。主动节点接收到应答信号后,进入数据发送阶段。

在 STEM-T 算法中,节点周期性地进入侦听阶段,探测是否有邻居节点要发送数据;当一个节点想与某个邻居节点进行通信时,它就发送一连串的唤醒包,发送唤醒包的时间长度必须大于侦听的时间间隔,可以确保邻居节点能够收到唤醒包,紧接着节点就直接发送数据包。所以 STEM-T 比 STEM-B 更简单实用。

STEM 算法适用于类似环境监测或者突发事件监测等应用,经实验证明,节点唤醒速度可以满足应用的需要。但是在 STEM 算法中,节点的睡眠周期、部署密度以及网络的传输延迟之间有着密切的关系,要针对具体的应用要求进行调整。

2. ASCENT 算法

ASCENT(Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies)算法着重于均衡网络中骨干节点的数量,并保证数据通路的畅通。当节点在接收数据时发现丢包严重,就向数据源方向的邻居节点发出求助消息;节点探测到周围的通信节点丢包率很高或者收到邻居节点发出的帮助请求时,它就主动由休眠状态变为活动状态,帮助邻居节点转发数据包。

运行 ASCENT 算法的网络包括触发、建立和稳定三个主要阶段。触发阶段如图 3-9(a)所示,在汇聚节点与数据源节点不能正常通信时,汇聚节点向它的邻居节点发出求助信息;建立阶段如图 3-9(b)所示,当节点收到邻居节点的求助消息时,通过一定的算法决定自己是否成为活动节点,如果成为活动节点,就向邻居节点发送通告消息,同时这个消息是邻居节点判断自身是否成为活动节点的因素之一;稳定阶段如图 3-9(c)所示,数据源节点和汇聚节点间的通信恢复正常,网络中活动节点个数保持稳定,从而达到稳定状态。

ASCENT 算法使得网络可以随具体应用要求而动态地改变拓扑结构,并且节点只根据

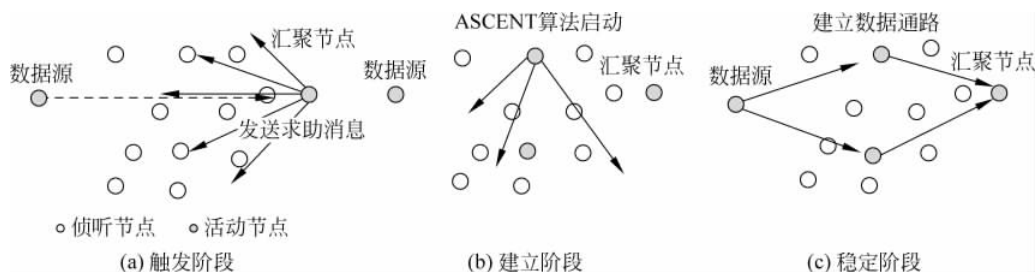


图 3-9 ASCENT 算法的三个阶段

本地的信息进行计算,不依赖于无线通信模块、节点的地理分布和路由协议等。但 ASCENT 算法只是提出了网络中局部优化的一种机制,还需要对更大规模的节点分布进行改进,并加入负载平衡技术等。

3.6 覆盖

3.6.1 覆盖理论基础

覆盖问题是无线传感器网络配置首先面临的基本问题,因为传感器节点可能任意分布在配置区域,它反映了一个无线传感器网络某区域被监测和跟踪的状况。随着无线传感器网络应用的普及,更多的研究工作深入到其网络配置的基本理论方面,其中覆盖问题就是无线传感器网络设计和规划需要面临的一个基本问题之一。随着深入研究的角度不同,覆盖问题也表述成不同的理论模型,甚至在计算几何里面就能找到与覆盖相关的解决方案。尽管这些办法并不能直接应用到无线传感器网络中,但是研究这些问题有助于建立读者对无线传感器网络覆盖问题相关的理论背景。

在现有的研究成果当中,很多都是致力于解决传感器网络的部署和监测及覆盖与连接的关系等方面问题的。另外,也有一些研究致力于特定的应用需求,但其核心思想都是与覆盖问题有关的。例如,减少传感器节点的有效工作时间,那些共享感应区域和任务的传感器节点可以关掉电源以节省能量,从而可以延长网络的寿命。为此,必须确定关闭哪些传感器节点及如何调度分配节点的工作时间,以至于当关掉节点时网络不存在覆盖的盲点。

无线传感器网络覆盖相关的两个计算几何问题。第一个就是艺术馆问题(Art Gallery Problem)。假设艺术馆的业主想在馆内放置照相机,以便能够预防小偷盗窃。关于实现这个想法存在两个问题需要回答:首先就是到底需要多少台相机;其次,这些相机应当放置在哪些地方才能保证馆内每个点至少被一台相机监视到。假定相机可以有 360° 的视角而且可以极大速度旋转,相机可以监视任何位置,视线不受影响。问题优化要实现的目标就是所需相机的数目应该最小化,在这个问题当中,艺术馆通常建模成一个二维平面的简单多边形。一个简单的解决办法就是将多边形分成不重叠的三角形,每个三角形里面放置一个相机。通过三角测量法将多边形分成若干个三角形,这样可以实现任何一个多边形都可被 $\lfloor n/3 \rfloor$ 个相机所监视到,这里 n 表示多边形所包含的三角形的数目。这也是最糟糕情

况下的最佳结果。如图 3-10 所示是将一个简单多边形用三角测量法拆分的例子,放置两个监视相机足以覆盖整个艺术馆。尽管这个问题在二维平面可以得到最优解,然而扩展到三维空间,这个问题就变成了 NP-hard 问题了。

另外一个与无线传感器网络覆盖相关的几何问题是圆覆盖问题,即在一个平面上最多需要排列多少个相同大小的圆,才能够使其完全覆盖整个平面。换个角度说,也就是给定了圆的数目,如何使得圆的半径最小。A. Heppes 和 J. B. M. Melissen 实现了矩形平面的圆最优覆盖问题,分为最多用 5 个圆和 7 个圆来完成两种情况的覆盖。图 3-11 给出了一个 7 个圆最优覆盖的例子。

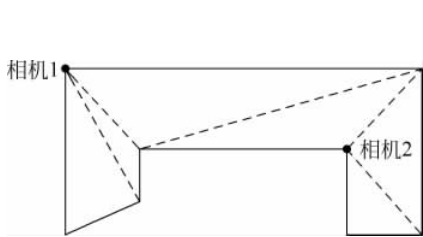


图 3-10 多边形的三角测量法及监视相机的位置配置

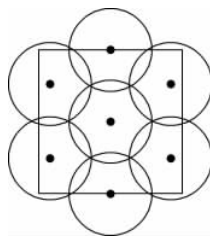


图 3-11 用 7 个圆实现最优覆盖的样例

无线传感器网络的覆盖问题在本质上和上面的几何计算问题是一致的:需要知道是否某个特定的区域被充分覆盖和完全处于监视之下。就成本而言,配置的传感器节点的数量是非常重要的。尽管计算几何研究的结果为理解传感器网络覆盖问题提供了一个理论背景,但仅仅是计算几何问题的求解办法是不能直接应用于无线传感器网络的。主要有以下几个方面的原因:首先,所做的前提假设不同,例如,艺术馆问题的照相机可以看到无穷远处,除非中间有障碍物遮挡,事实上刚好相反,传感器节点存在最大的感应范围。其次,无线传感器网络通常没有固定的基础设施,并且其拓扑可能随时变化,因此,很多决策必须通过分布式方式来完成。然而,大多数几何问题都是通过集中式来解决的。

在典型的无线传感器网络应用当中,放置或配置一些传感器节点来监视一个区域或点集。一些应用中可以选择传感器配置场地,如定点部署和配置,这种方式称为确定性配置;而另外一些应用(如敌方区域或非常恶劣等人员不能到达的环境),只能通过随机部署(如空投撒播方式)足够多的传感器节点到监视区域,希望空投后未遭破坏的传感器足以监视目标区域,这种方式称为非确定性的配置或随机配置。如果可以选取部署场地,可采用确定性的传感器配置方法;否则,该配置就是随机配置。在上面两种配置情况下,都希望部署的传感器集合能够彼此通信,或者直接或者间接通过多跳方式通信。因此,除了要覆盖感应的区域或点集外,通常需要配置的传感器集合能够形成一个互联的网络。对于已经放置好的传感器,很容易地就能检测是否配置的传感器集合覆盖了目标区域或点集,而且也能判断是否该集合相互连通。就覆盖特性而言,需要知道各个传感器节点的感应范围。假设传感器能够感应距离 r 之内发生的事件,其中 r 为传感器的感应半径。就连接特性而言,需要知道传感器的通信半径,记为 c ,其连接覆盖的充分必要条件,满足定理 3.1。

定理 3.1 当传感器的密度(即单位区域的传感器数目)有限时, $c \geq r$ 是覆盖包含连接性的充分必要条件。

X. Wang 等人也证明了在 k 阶覆盖(每个点至少被 k 个传感器覆盖)和 k 阶连接性(配

置传感器的通信图是 k 阶连接的)情况下的一个类似的结论,满足定理 3.2。

定理 3.2 当 $c \geq 2r$ 时,一个凸区域的 k 阶覆盖必定包含了 k 阶连接性。

注意到 $k > 1$ 的 k 阶覆盖提供了一定的容错度,能够监视所有的点,只要不多于 $k-1$ 个传感器故障或失效。

当然,除了上面介绍的典型的无线传感器网络配置问题外,也可能出现其他形式的无线传感器配置问题。例如,不要求传感器节点间彼此通信。相反,每个传感器可直接和一个位于所有传感器通信半径范围内的基站通信。还有一种情况就是传感器是移动和自我配置的无线传感器。移动传感器集合可以部署到一个未知的和有潜在危险的环境中。根据初始的配置,这种传感器可以重新确定位置以便实现未知环境的最大覆盖。它们再将采集到的信息发给感应环境外面的一个基站。

3.6.2 覆盖感知模型

与覆盖问题直接相关的是传感器节点的感知模型。目前,无线传感器网络主要有两种基本感知模型。

1. 布尔感知模型

节点的感知范围是一个以节点为圆心,以感知距离为半径(由节点硬件特性决定)的圆形区域,只有落在该圆形区域内的点才能被该节点覆盖,其数学表达为

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & d(i,j) \leq r \\ 0, & d(i,j) > r \end{cases} \quad (3-3)$$

式中, p_{ij} 为节点 i 对监测区域内目标 j 的感知概率, $d(i,j)$ 为节点 i 与目标 j 之间的欧式距离, r 称为感知半径。这个模型也称为 0-1 感知模型,即当监控对象处在节点的感应区域内时,它被节点监控到的概率恒为 1;而当监控对象处在节点的感应区域之外时,它被监控到的概率恒为 0。

2. 概率感知模型

节点的圆形感知范围内,目标被感知到的概率并不是一个常量,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。

在节点 i 不存在邻居节点的前提下,节点 i 对监测区域内目标 j 的感知概率有以下三种定义形式:

$$p_{ij} = e^{-\alpha d(i,j)} \quad (3-4)$$

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & d(i,j) \leq r_1 \\ e^{-\alpha[d(i,j)-r_1]}, & r_1 < d(i,j) \leq r_2 \\ 0, & d(i,j) > r_2 \end{cases} \quad (3-5)$$

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{[1 + \alpha d(i,j)]^\beta}, & d(i,j) \leq r \\ 0, & d(i,j) > r \end{cases} \quad (3-6)$$

式中, $d(i,j)$ 为节点 i 与目标 j 之间的欧式距离, α 和 β 为与传感器物理特性有关的类型参数。通常 β 取值为 $[1,4]$ 的整数,而 α 是个可调参数。如果监测区域内有障碍物,将产生信号阻塞,从而降低节点探测效率。若障碍物出现在从节点 i 到目标 j 的视线上,即障碍物坐标满足连接 i,j 的线段方程,则令 p_{ij} 等于零。

从以上 3 种形式可以看出,任一点的覆盖概率是一个介于 0 和 1 之间的数,且当 i 恰好与 j 重合时, $d(i, j) = 0$, 节点的感知概率等于 1。如果节点存在邻居节点,由于邻居节点的感应区域与节点自身的感应区域存在交叠,所以如果节点 j 落在交叠区域内,则节点 j 的感知概率会受到邻居节点的影响。假设节点 i 存在 N 个邻居节点, $n_1, n_2, \dots, n_N$, 节点 i 及邻居节点的感知区域分别记为 $R(i), R(n_1), R(n_2), \dots, R(n_N)$, 则这些感知区域的重叠区域为

$$M = R(i) \cap R(n_1) \cap R(n_2) \cap \dots \cap R(n_N) \quad (3-7)$$

假设每个节点对目标的感知是独立的,根据概率计算公式, M 中任一节点 j 的感知概率有以下两种计算方式,分别为

$$G_j = \sum_{k=1}^M p_{kj} - \sum_{1 \leq i < k < j \leq N} p_{ij} p_{kj} + \sum_{1 \leq i < k < j \leq N} p_{ij} p_{kj} p_{lj} - \dots + (-1)^{N-1} p_{1j} p_{2j} p_{Nj} \quad (3-8)$$

或者

$$G_j = 1 - (1 - p_{ij}) \prod_{k=1}^N (1 - p_{n_k j}) \quad (3-9)$$

3.6.3 覆盖算法分类

1. 节点部署方式分类

按照无线传感器网络节点的不同配置方式(即节点是否需要知道自身位置信息),可以将无线传感器网络的覆盖算法分为确定性覆盖、随机覆盖两大类。下面逐一对这两类覆盖算法类型加以总结。

1) 确定性覆盖

确定性区域/点覆盖是指已知节点位置的无线传感器网络要完成目标区域或目标点的覆盖,与之相关的两个著名计算几何问题为艺术馆走廊监控问题(Art Gallery Problem)和圆周覆盖问题(Circle Covering Problem);基于网格的目标覆盖是指当地理环境情况预先确定时,使用二维(也可以是三维)的网格进行网络的建模,并选择在合适的格点配置传感器节点来完成区域/目标的覆盖;确定性网络路径/目标覆盖同样也是考虑传感器节点位置的已知情况,但这类问题特别考虑了如何对穿越网络的目标或其经过的路径上各点进行感应与追踪。

2) 随机覆盖

随机覆盖考虑在网络中传感器节点随机分布且预先不知道节点位置的条件下,网络完成对监测区域的覆盖任务;动态网络覆盖则是考虑一些特殊环境中部分传感器节点具备一定运动能力的情况,该类网络可以动态完成相关覆盖任务。

2. 覆盖目标分类

根据无线传感器网络不同的应用,覆盖需求通常不同。根据覆盖目标不同,目前覆盖算法可以分为面覆盖、点覆盖及栅栏覆盖。

1) 面覆盖

在面覆盖问题中,传感器节点随机撒布在指定的监测区域,每一个传感器节点的监测范围是以其自身为中心的圆形区域。面覆盖算法的目标是在大量冗余的节点中寻找能够覆盖同样区域大小并保证网络连通的节点集合。同时获取最长的网络生存周期及能量高效性也是面覆盖算法在设计时需要兼顾的目标。面覆盖问题又可以进一步分为单覆盖和多覆盖。

在单覆盖中,监测区域内的每个点都至少被一个传感器节点所覆盖;多覆盖中每个点需要被传感器节点覆盖多次,通常又称为 k 覆盖,即每个点至少被 k 个传感器节点所覆盖。

2) 点覆盖

与面覆盖算法的目标不同,点覆盖算法要覆盖的目标是一些离散的目标点。在点覆盖算法中,每一个目标点都要能够被至少一个传感器节点所覆盖。现有的算法,通常将传感器节点划分为若干个不相交的点集,每一个点集都能够覆盖所有的目标点。通过轮换调度的方式,使得当前只有一个点集中的节点处于活动状态,而其他点集中的节点均处于睡眠状态,通过这种方式能降低整个网络的能量消耗,延长网络寿命。

3) 栅栏覆盖

与无线传感器网络覆盖密切相关的特殊问题——栅栏覆盖,它考查了目标穿越网络时被检测或是没有被检测的情况,反映了给定的无线传感器网络所能提供的传感、监视能力。这类覆盖问题的目标是找出连接出发位置(记为 S)和离开位置(记为 D)的一条或多条路径,使得这样的路径能够在不同模型定义下提供对目标的不同传感/监视质量。根据目标穿越网络时所采用模型的不同,栅栏覆盖又可以具体分为“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”问题中,对于穿越网络的目标而言,最坏情况是指考查所有穿越路径中不被网络传感器节点检测的概率最小情况,对应的最佳情况是指考查所有穿越路径中被网络传感器节点发现的概率最大情况;与单纯考虑离传感器节点距离的“最坏与最佳情况覆盖”不同,“暴露穿越”同时考虑了“目标暴露”(Target Exposure)的时间因素和传感器节点对于目标的“感应强度”因素,这种覆盖模型更为符合实际环境中运动目标由于穿越网络区域的时间增加而“感应强度”累加值增大的情况。

3.6.4 典型覆盖算法

1. 基于网络的覆盖定位传感器配置算法

考虑传感器节点及目标点都采用网格形式配置,传感器节点采用布尔覆盖模型,并使用能量矢量来表示格点的覆盖。如图 3-12 所示,网络中的各格点都可至少被一个传感器节点所覆盖(即该点能量矢量中至少一位为 1),此时区域达到了完全覆盖。例如,格点位置 8 的能量矢量为(0,0,1,1,0,0)。在网络资源受限而无法达到格点完全识别时,就需要考虑如何提高定位精度的问题。而错误距离是衡量位置精度的一个最直接的标准,错误距离越小,则覆盖识别结果越优化。

基于网络的覆盖定位传感器配置算法设计了一种模拟退火算法来最小化距离错误。初始时刻假设每个格点都配置有传感器,若配置代价上限没有达到就循环执行以下过程:首先试图删除一个传感器节点,然后进行配置代价评价。如果评价不通过就将该节点移动到另外一个随机选择的位置,然后再进行配置代价评价。循环得到优化值后同时保存新的节点配置情况。最后,改进算法停止执行的

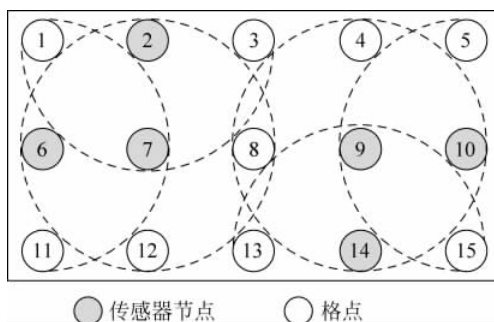


图 3-12 区域完全覆盖示意图

准则。在达到模拟退火算法的冷却温度时,优化覆盖识别的网络配置方案也同时达到。

2. 圆周覆盖

Huang 等将随机节点覆盖类型的圆周覆盖归纳为决策问题:目标区域中配置一组传感器节点,看看该区域能否满足 k 覆盖,即目标区域中每个点都至少被 k 个节点覆盖。考虑每个传感器节点覆盖区域的圆周重叠情况,进而根据邻居节点信息来确定是否一个给定传感器的圆周被完全覆盖,如图 3-13 所示。

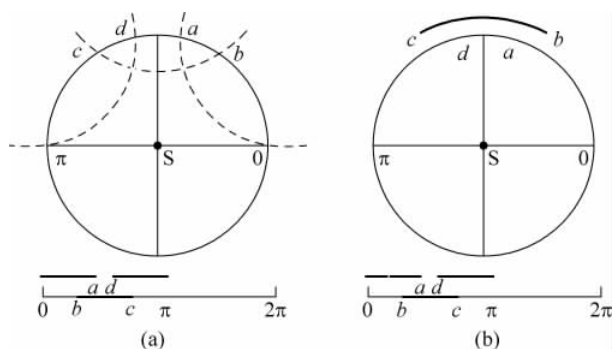


图 3-13 传感器节点 S 圆周的覆盖情况

该算法可以用分布式方式来实现:传感器 S 首先确定圆周被邻居节点覆盖的情况,如图 3-13(a)所示,三段圆周 $[0, a]$, $[b, c]$ 和 $[d, \pi]$ 分别被 S 的三个邻居节点所覆盖。再将结果按照升序顺序记录在 $[0, 2\pi]$ 区间,如图 3-13(b)所示。这样就可以得到传感器节点 S 的圆周覆盖情况: $[0, b]$ 段为 1, $[b, a]$ 段为 2, $[a, d]$ 段为 1, $[d, c]$ 段为 2, $[c, \pi]$ 段为 1。传感器节点圆周被充分覆盖等价于整个区域被充分覆盖。每个传感器节点收集本地信息来进行本节点圆周覆盖判断,并且该算法还可以进一步扩展到不规则的传感区域中使用。

在二维圆周覆盖问题基础上, Huang 进一步使用将三维覆盖映射为二维圆周覆盖,在不增加计算复杂性的前提下使用分布式方法解决了三维圆球体覆盖的问题。

3. 连通传感器覆盖

Gupta 等设计的算法通过选择连通的传感器节点路径来得到最大化的网络覆盖效果,该算法同时属于连通性覆盖中的连通路程覆盖及确定性面/点覆盖类型。当指令中心向网络发送一个监测区域查询消息时,连通传感器覆盖(Connected Sensor Cover)的目标是选择最小的连通传感器节点集合并充分覆盖网络区域。假设已选择的传感器节点集为 M , 剩余与 M 有相交传感区域的传感器节点称为候选节点。集中式算法初始节点随机选择构成 M 之后,在所有从初始节点集合出发到候选节点的路径中选择一条可以覆盖更多未覆盖子区域的路径。将该路径经过的节点加入 M , 算法继续执行直到网络查询区域可以完全被更新后的 M 所覆盖。如图 3-14 所示为该贪婪算法执行的方式。在图 3-14(a)中,贪婪算法会选择路径得到图 3-14(b),这是由于在所有备选路径中选择 C_3 和 C_4 组成的路径 P_2 可以覆盖更多未覆盖子区域。

连通传感器覆盖的分布式贪婪算法执行过程是:首先从 M 中最新加入的候选节点开始执行,在一定范围内广播候选路径查找消息(CPS);收到 CPS 消息的节点判断自身是否为候选节点,如果是,则单播方式返回发起者一个候选路径响应消息(CPR);发起者选择可

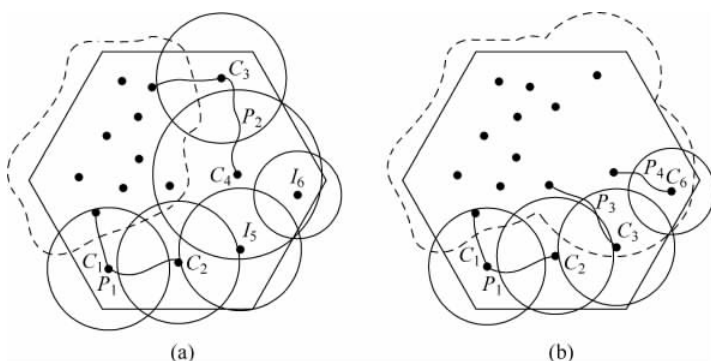


图 3-14 连通传感器覆盖的分布式贪婪算法

以最大化增加覆盖区域的候选路径；更新各参数，算法继续执行，直到网络查询区域可完全被更新后的 M 所覆盖。

4. 轮换活跃/休眠节点的 Self-Scheduling 覆盖协议

采用轮换“活跃”和“休眠”节点的 Self-Scheduling 覆盖协议可以有效延长网络生存时间，该协议同时属于确定性面/点覆盖和节能覆盖类型。协议采用节点轮换周期工作机制，每个周期由一个 Self-Scheduling 阶段和一个 Working 阶段组成。在 Self-Scheduling 阶段：各节点首先向传感半径内邻居节点广播通告消息，其中包括节点 ID 和位置（若传感半径不同则包括发送节点传感半径）。节点检查自身传感任务是否可由邻居节点完成，可替代的节点返回一条状态通告消息，之后进入“休眠状态”，需要继续工作的节点执行传感任务。在判断节点是否可以休眠时，如果邻居节点同时检查到自身的传感任务可由对方完成并同时进入“休眠状态”，就会出现如图 3-15 所示的“盲点”。

在图 3-15(a)中，节点 e 和 f 的整个传感区域都可以被相邻的邻居节点代替覆盖。节点 e 和 f 满足进入“休眠状态”条件之后，将关闭自身节点的传感单元进入“休眠状态”，但这时就出现了不能被检测的区域即网络中出现“盲点”，如图 3-15(b)所示。为了避免这种情况的发生，节点在 Self-Scheduling 阶段检查之前执行一个退避机制：每个节点在一个随机产生的时间之后再开始检查工作。此外，退避时间还可以根据周围节点密度计算，这样就可以有效地控制网络“活跃”节点的密度。为了进一步避免“盲点”的出现，每个节点在进入“休眠状态”之前还将等待一定的时间来监听邻居节点的状态更新。该协议是作为 LEACH 分簇协议的一个扩展来实现的，有关仿真结果证明：网络的平均生存时间较 LEACH 分簇协议延长了 1.7 倍。

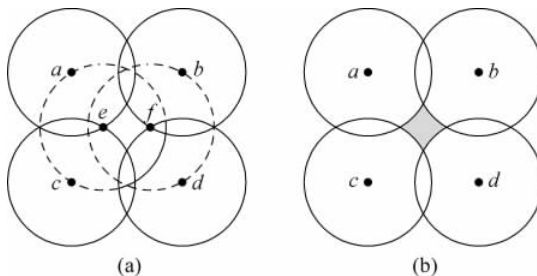


图 3-15 网络中出现的“盲点”

5. 最坏与最佳情况覆盖

最坏与最佳情况覆盖算法同时属于确定性网络路径/目标覆盖和栅栏覆盖类型,算法考虑如何对穿越网络的目标或其所在路径上的各点进行感应与追踪,体现了一种网络覆盖性质。Meguerdichian 等定义了“最大突破路径”(Maximal Breach Path)和“最大支撑路径”(Maximal Support Path),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及最大距离最小化。显然,这两种路径分别代表了无线传感器网络最坏(不被检测的概率最小)和最佳(被发现的概率最大)的覆盖情况。文中分别采用计算几何中的 Voronoi 图与 Delaunay 三角形来完成最大突破路径和最大支撑路径的构造和查找。其中,Voronoi 图是由所有 Delaunay 三角形边上的垂直平分线形成的,而 Delaunay 三角形的各顶点为网络的传感器节点,并满足子三角形外接圆中不含其他节点,由于 Voronoi 图中的线段具有到最近的传感器节点距离最大的性质,因此最大突破路径一定是由 Voronoi 图中的线段组成的,如图 3-16 所示。

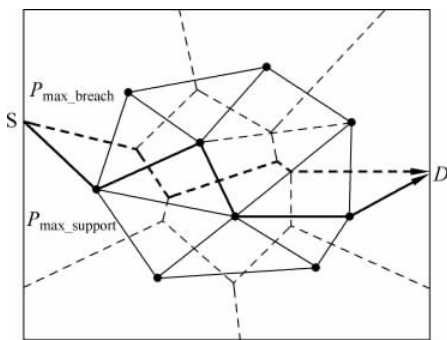


图 3-16 Voronoi 图和 Delaunay 三角形示意图

6. 暴露穿越覆盖

暴露穿越覆盖同时属于随机节点覆盖和栅栏覆盖类型。如前所述,“目标暴露”(Target Exposure)覆盖模型同时考虑时间因素和节点对于目标的“感应强度”因素,更为符合实际环境中运动目标由于穿越网络时间增加而“感应强度”累加值增大的情况。节点 S 的传感模型定义为

$$S(s, p) = \frac{\lambda}{[d(s, p)]^K} \quad (3-10)$$

式中, p 为目标点,正常数 λ 和 K 均为网络经验参数。最小暴露路径代表了无线传感器网络最坏的覆盖情况,而一个运动目标沿着路径 $p(t)$ 在时间间隔 $[t_1, t_2]$ 内经过网络监视区域的暴露路径被定义为

$$E(p(t), t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} I(F, p(t)) \left| \frac{dp(t)}{dt} \right| dt \quad (3-11)$$

式中, $I(F, p(t))$ 代表在传感区域 F 中沿着路径 $p(t)$ 运动时被相应传感器(有最近距离传感器和全部传感器两种)感应的效果。该算法提出了一种数值计算的近似方法来找到连续的最小暴露路径:首先,将传感器网络区域进行网格划分,并假设暴露路径只能由网格的边与对角线组成;然后,为每条线段赋予一定的暴露路径权重;最后,执行 Dijkstra 算法得到近似的最小暴露路径。

3.6.5 覆盖能效评价指标

假设无线传感器网络布置在二维平面空间内,由移动、固定两种无线传感器节点构成,各节点具有相同的测量范围、测量可靠度和通信半径。固定节点采用随机布置方式,通过全球定位系统获取自身位置信息,并在网络中发布共享。无线传感器网络的覆盖能效优化问

题即根据各节点的当前位置信息寻找各移动节点的最优位置,使网络具有更好的覆盖性能和较高的能效性。

对一个位置坐标为 (x, y) ,测量范围为 R 的节点而言,其可感知范围为以点 (x, y) 为圆心, R 为半径的圆,无线传感器网络的覆盖能效优化可以扩大无线传感器网络的有效测量区域面积,从而提高网络整体测量性能。节点通信范围通常都远大于其感知范围,且存储能量有限,因此提高覆盖能效性成为无线传感器网络测量的关键。无线传感器节点的通信能耗与测量和数据处理能耗相比高许多,通信能耗的优化对提高无线传感器网络能效性十分重要。

1. 无线传感器网络的覆盖指标

由于无线传感器网络中节点布置的固有冗余性,网络覆盖评价采用了可靠度的概念。对一定区域,若在 t 时刻处于 n 个节点测量范围内,该区域综合可靠度表示为

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - r_i(t)) \quad (3-12)$$

式中, $r_i(t)$ 表示第 i 个节点的测量可靠度。

待测区域中所有综合可靠度大于测量可靠性要求的区域称为有效测量区域。用解析方法计算随机布置无线传感器网络的有效测量区域非常复杂,因此采用数值计算方法,将待测区域网格化,单元格简化为点,计算各点的综合可靠度,统计满足测量可靠度要求的单元格面积,得到有效测量区域面积数值解。将有效测量区域面积占待测总面积的比例定义为覆盖指标 C 。

2. 无线传感器网络的能耗指标

无线信号在传播过程中随着传播距离增加而发生衰减,采用自由空间模型计算传播损耗如下:

$$L_p = \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 \quad (3-13)$$

式中, L_p 为路径损耗; D 为传播距离; λ 为信号波长。

针对无线信号传播过程,假设无线传感器网络通信能耗模型为:运行发送器或接收器的无线花费为 $E_{\text{elec}} = 50 \text{ nJ/b}$,发送放大器实现容许放大倍率的无线花费为 $E_{\text{amp}} = 100 \text{ pJ/b} \cdot \text{m}^{-2}$ 。二维空间内,坐标分别为 (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) 的无线传感器节点 i, j ,通信时信号传播距离计算如下:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3-14)$$

若节点 i 向节点 j 发送长度为 $k \text{ b}$ 的数据包,则节点 i 能耗为

$$E_{\text{Tx}}(k, d) = E_{\text{Tx-elec}}(k) + E_{\text{Tx-amp}}(k, d) = E_{\text{elec}}k + E_{\text{amp}}kd_{ij}^2 \quad (3-15)$$

节点 j 接收此数据包的能耗为

$$E_{\text{Rx}}(k) = E_{\text{Rx-elec}}(k) = E_{\text{elec}}k \quad (3-16)$$

节点 i 与节点 j ,进行一次数据包传输所消耗的总能量为

$$E_{ij}(k) = k(2E_{\text{elec}} + E_{\text{amp}}d_{ij}^2) \quad (3-17)$$

式(3-18)说明两节点相距较远时,直接传输数据会消耗较大能量,采用多跳通信则可节省能量。

移动目标跟踪是无线传感器网络的重要应用领域之一,针对移动目标跟踪的无线传感

器网络覆盖能效问题更具实用价值,也更富有挑战性。通常无线传感器节点对进入网络的移动目标进行测量,并将收集到的目标信息传达给位于网络中央的中心节点。为了尽可能降低通信耗能,各节点均需采用能耗最低的路径向中心节点传送数据。

3.7 传感器网络的覆盖控制

传感器网络的区域覆盖一直是研究的重点,这里主要介绍几种区域覆盖的控制算法。

1. 基于虚拟势场力的传感器网络区域覆盖控制

虚拟势场力是把网络中每一个移动节点看作一个虚拟的带电粒子,相邻节点之间存在排斥力和吸引力两种相互作用力。由于受势场斥力的作用,传感器节点迅速扩展开来;由于受势场引力的作用,传感器节点之间的距离不会无限扩大,两者共同作用,使网络最终达到平稳状态,此时整个无线传感器网络覆盖区域可以达到最大化。在自组织过程中,节点并不是真正移动的,而是先由簇首计算出虚拟路径,然后指导簇内节点进行一次移动,以节省能量。

在无线传感器网络布局优化过程中,各无线传感器节点根据其所受合力的大小和方向移动相应距离,直至达到受力平衡或可移动距离的上限。假设传感器节点 S_i 所受虚拟力为 F_i ,无线传感器节点 S_i 对节点 S_j 的力为 F_{ij} ; F_{iR} 和 F_{iA} ,分别为障碍物和热点区域对无线传感器节点 S_i 的作用力,则存在以下关系:

$$F_i = \sum_{j=1, j \neq i}^k F_{ij} + F_{iR} + F_{iA} \quad (3-18)$$

式中, F_{ij} 为无线传感器节点的相互作用力,既有引力,也有斥力。虚拟势场力算法采用距离阈值 d_{th} 。调整无线传感器节点间的相互作用力的属性,当 d_{ij} 大于 d_{th} 且小于节点的通信半径 c 时,两者间的作用力为引力;当 d_{ij} 小于 d_{th} 时,作用力为斥力。 F_{ij} 与 d_{ij} 的关系如式(3-20)所示:

$$F_{ij} = \begin{cases} 0 & d_{ij} \geq c \\ 0(k_A(d_{ij} - d_{th}), \alpha_{ij}) & c > d_{ij} > d_{th} \\ 0 & d_{ij} = d_{th} \\ \left(k_R\left(\frac{1}{d_{ij}} - \frac{1}{d_{th}}\right), \alpha_{ij} + \pi\right) & d_{ij} < d_{th} \end{cases} \quad (3-19)$$

式中, $\vec{F}_{ij}$ 为传感器节点 S_i 、 S_j 之间的虚拟势场力; k_A , k_R 分别为引力和斥力系数,主要用于调节虚拟势场力算法布局优化后无线传感器节点的疏密程度,它们都是正值,一般凭经验确定; α_{ij} 为节点 S_i 到 S_j 的方位角。

考虑到节点从受力至运动为一个加速过程,故节点受力后位移为

$$sx = \begin{cases} v_x \times \Delta t & v_x = v_{x\max} \\ v_x \times \Delta t + \frac{1}{2} \times a_x \times \Delta t^2 & v_x < v_{x\max} \end{cases} \quad (3-20)$$

$$sy = \begin{cases} v_y \times \Delta t & v_y = v_{y\max} \\ v_y \times \Delta t + \frac{1}{2} \times a_y \times \Delta t^2 & v_y < v_{y\max} \end{cases} \quad (3-21)$$

式中, v_x, v_y 为节点在 x 轴和 y 轴的移动速度; α_x, α_y 为节点在 x 轴和 y 轴的加速度; Δt 为时间步长。

根据式(3-21)、式(3-22)可得节点的迁移位置为

$$x_{\text{new}} = \begin{cases} x_{\text{old}} & |F_{xy}| \leq F_{\text{th}} \\ x_{\text{old}} + s_x & |F_{xy}| > F_{\text{th}} \end{cases} \quad (3-22)$$

$$y_{\text{new}} = \begin{cases} y_{\text{old}} & |F_{xy}| \leq F_{\text{th}} \\ y_{\text{old}} + s_y & |F_{xy}| > F_{\text{th}} \end{cases} \quad (3-23)$$

式中 F_{xy} 为作用于节点的虚拟力; F_{th} 为预定义的虚拟力阈值, 当虚拟力小于该值时, 则可认为它已达到稳定, 不需要移动。

图 3-17(a) 和图 3-17(b) 分别为利用虚拟力对 10 个和 70 个传感器节点进行覆盖控制的仿真图, 从仿真图可以看出, 节点很好地部署在监测区域中, 最大化地增大网络覆盖率。值得注意的是, 最终覆盖率除了受网络中节点数量的影响外, 还受到距离阈值 d_{th} 及虚拟引力和斥力系数的影响。当 d_{th} 过小或者虚拟引力系数过大时, 节点分布较密集, 网络覆盖率无法得到保证; 当 d_{th} 过大或者虚拟斥力系数过小时, 节点分布过疏, 连通度无法得到保证, 从而会形成探测盲区。因此需要采用优化算法进行系数优化, 在此不做讨论。

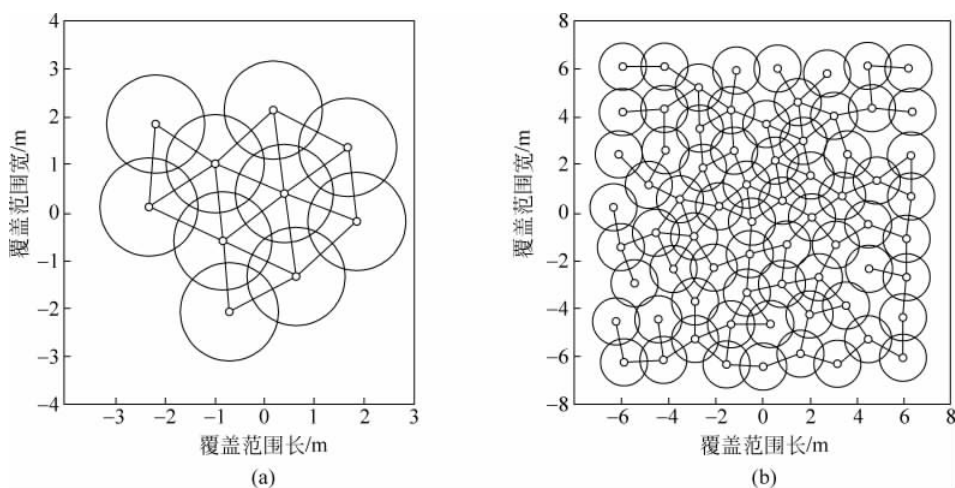


图 3-17 算法仿真

2. 基于市场竞争行为的无线传感器网络连接与覆盖算法

节点部署受环境影响或因节点部署不慎, 可能导致部分节点丧失行动能力, 而其传感与通信功能仍然保持正常。如果在自组织的时候不考虑这些节点, 显然会造成浪费; 如果考虑这些节点则只能采用带约束条件的虚拟力方法, 当移动节点靠近这些失去行动能力的节点时会受到排斥。因而, 此方法在某些特殊情况下, 不能达到令人满意的效果, 检测目标中可能出现不能覆盖的区域。图 3-18 展示了这样一个例子, 图中除位于右下角的一个传感器以外其余节点均失去了行动能力, 这个具有行动能力的传感器因为受到其他节点的排斥, 无法进入中间的未覆盖区域。

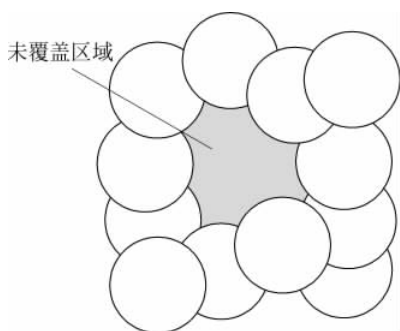


图 3-18 未覆盖区域

基于市场竞争行为的无线传感器网络连接与覆盖算法就是通过研究人类社会市场竞争行为提出的用于无线传感器网络连接与覆盖问题的控制算法。该方法把传感器网络中的节点类比为市场竞争中的经济主体,把目标监测区域类比为经济资源,把对传感器网络所做的优化配置类比为市场竞争行为对经济资源优化配置。将人类社会经济活动中通过市场竞争实现资源优化配置的方法应用到无线传感器网络的节点部署,降低节点的计算量、移动距离及信息复杂度,以提高无线传感器的行动效率,并间接达到

省电的目的。

网络采用簇结构,簇内任意两个节点均可以通过多跳的方式进行通信,而簇间不能通信。对于每一个独立的簇,其配置过程可分为以下三步。

1) 实现动静态的分离

静态传感器虽不能移动,但其用于感测与通信的能量高于移动传感器(移动会消耗能量)。在人类经济活动领域内,大型企业与小企业相比较,虽然具有规模优势,但是在竞争中缺乏灵活性。两者之间具有很好的类比性,因此,在算法中:把静态传感器定义为“大型企业”,把可移动传感器定义为“小型企业”,每一个传感器的有效覆盖面积定义为该企业所获取的“经济资源”。

2) 簇的内部调整

在资源有限的情况下,大型企业依靠其规模优势,总是能够优先占有部分资源,其不能占有的资源将在小型企业间通过竞争得到分配;而竞争失败的小企业能够利用其灵活性去寻找新的资源。同样的道理,可以在保证子网络不分裂的基础上,使用最少的动态传感器来补充静态传感器所不能覆盖的区域,从而将尽可能多的动态传感器解放出来,用于网络的扩张。

图 3-19(a)演示了这样一个过程, S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 、 S_6 表示静态传感器,它们的感测范围用黑色的圆表示, M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_5 、 M_6 表示可移动传感器,它们的感测范围用点线圆与虚线圆表示。 M_1 被优化配置到 M_1' ,其感测范围用灰色的圆表示。为保证网络不分裂

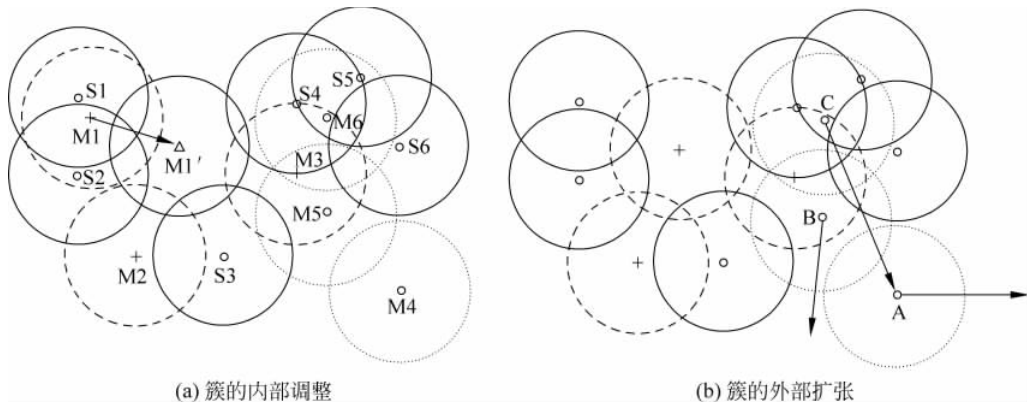


图 3-19 簇的自组织行为

裂, M_2 与 M_3 保持位置不变。 M_1' 、 M_2 、 M_3 和所有的静态传感器构成了一个“准静态传感器覆盖范围”, 构成“准静态传感器覆盖范围”的传感器将不再参与向外扩张。 M_4 、 M_5 、 M_6 则是被解放出来的可移动传感器, 它们将参与向外扩张。

3) 簇的向外扩张

参与向外扩张的传感器的感测范围与内部调整后形成的“准静态传感器覆盖范围”的相对位置关系必然处于以下三种类型中的一种:

(1) 完全在“准静态传感器覆盖范围”之外, 如图 3-19(a) 中的 M_4 所示。

(2) 部分在“准静态传感器覆盖范围”之内, 如图 3-19(a) 中的 M_5 所示。

(3) 完全在“准静态传感器覆盖范围”之内, 如图 3-19(a) 中的 M_6 所示。

独立子网络向外扩张, 如图 3-19(b) 所示, 在确保网络不分裂前提下, 对类型(1)传感器进行优化配置, 使网络有效覆盖面积最大, 并将类型(1)传感器原先所在位置发布给类型(3)传感器, 作为类型(3)传感器移动的指导信息。类型(3)传感器根据类型(1)传感器发布的指导信息, 按照整体能耗最省的原则规划到达类型(1)传感器原先所在位置的路径。若优化前, 网络中类型(3)传感器数目少于类型(1)传感器数目, 则优化结果为网络中只包含类型(1)传感器与类型(2)传感器, 此时在确保网络不分裂的前提下, 对类型(2)传感器进行优化调整, 则可使该子网络有效覆盖面积最大。若优化前网络中类型(3)传感器数目多于类型(1)传感器数目, 则优化结果为网络中只包含类型(3)传感器与类型(2)传感器, 此时在确保网络不分裂的前提下, 可以移动类型(2)传感器使其转变为类型(1), 采用上述方法即可实现子网络的配置。

在扩张过程中, 部分簇将因为距离的拉近而能够互相通信, 此时需要动态调整簇结构。一旦两个独立簇能够通信, 则立即中断原配置操作, 将两个簇合并为一个新簇, 并对其进行配置。

当配置结束后, 可令部分冗余节点进入休眠, 从而节省整个网络的能耗。如图 3-20(a) 所示, 把目标区域定为长 16m, 宽 14m 的二维平面矩形区域, 在这个区域中随机撒入 5 个半径为 1m 的静态节点, 同时在矩形中心区域撒入 57 个半径为 0.5m 的动态节点。在此基础上, 假定目标区域未被节点覆盖的空白点为所要争夺的资源, 运行算法, 得到了很好的布置效果, 如图 3-20(b) 所示。

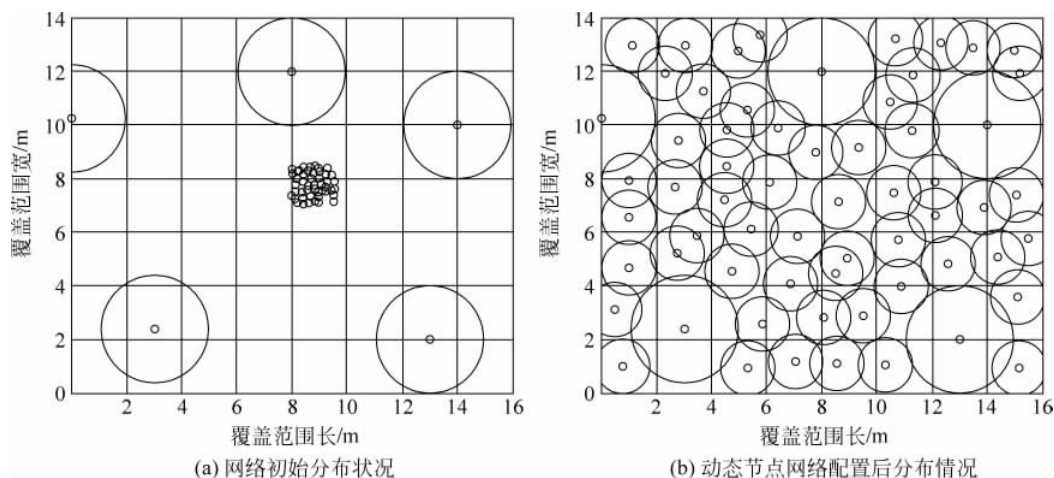


图 3-20 自组织前后覆盖率对比

为了进一步检验本算法的优劣,我们在动态节点布置基本稳定的时候,模拟节点能量耗尽或故障的情形,随机去掉6个动态节点,观察网络再组织能力,检验其鲁棒性、抗毁性和灵活性,结果如图3-21(a)所示。同时,全程绘制了WSN配置过程的网络覆盖率曲线,从覆盖率的角度定量分析算法的优劣,如图3-21(b)所示。从图3-21(a)可以看出,WSN在失去6个节点的情况下,本算法仍可以使网络尽可能地填补缺失节点的空白,并较好地完成任务。从图3-21(b)可以看出,本算法可以迅速优化网络配置,使覆盖率在较短的时间内上升至97%左右;当节点减少时,覆盖率骤然降低,但在算法的作用下,网络可以得到再配置,覆盖率可以重新上升到一个较高的程度。

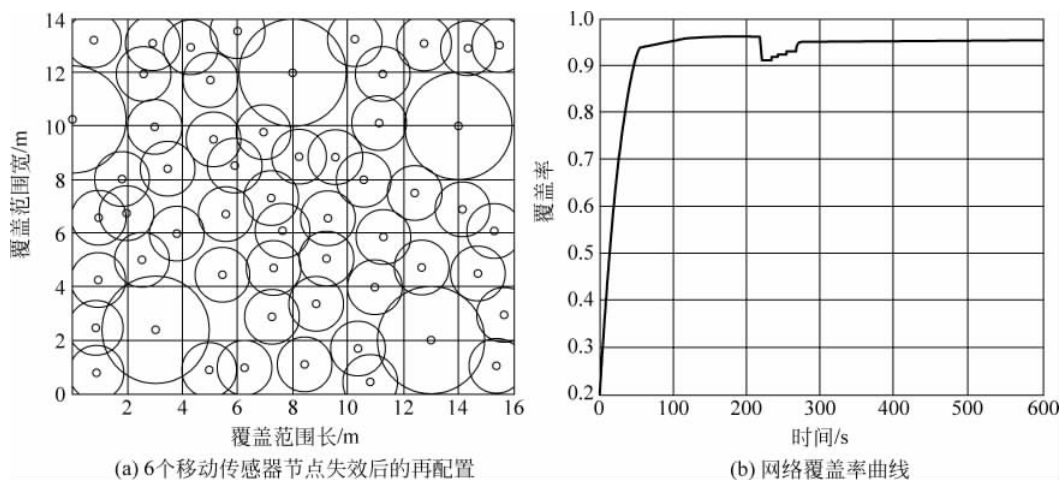


图 3-21 鲁棒性实验

总之,目前,传感器网络拓扑控制研究有了初步进展,研究人员一方面从 AdHoc 网络方面借鉴了宝贵的经验;另一方面针对传感器网络自身的特点,提出了形式多样、侧重点不同的拓扑控制算法。在功率控制方面提出了以邻居节点度为参考依据的 LMN、LMA 算法以及利用邻近图思想生成拓扑结构的 DRNG 算法和 DLSS 算法;在层次性拓扑控制方面提出了以 LEACH、TopDisc 和 GAT 等为代表的分簇算法。除了功率控制和层次性结构这两个传统的研究方向之外,逐渐引入了启发式的节点唤醒和休眠机制,在数据信息中捎带拓扑控制信息的机制等。

但是,大多数的拓扑控制算法还只停留在理论研究阶段,没有考虑实际应用的诸多困难。拓扑控制还有许多问题需要进一步研究,特别是需要探索更加实用的拓扑控制技术。以实际应用为背景、多种机制相结合、综合考虑网络性能将是拓扑控制研究的发展趋势。

习题 3

1. 按照其组网形态和方式分,有_____、_____和混合式。
2. 按照节点功能及结构层次分,无线传感器网络通常可分为平面网络结构、_____、_____以及 Mesh 网络结构。
3. 混合网络结构是无线传感器网络中_____和_____的一种混合拓扑结构。

4. 拓扑控制中一般要考虑的设计目标有____、____、____、吞吐能力、干扰和竞争、网络延迟和拓扑性质等几个方面。

5. LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)算法是_____。

6. 与覆盖问题直接相关的是传感器节点的感知模型。目前,无线传感器网络主要有____、____两种基本感知模型。

7. 按照无线传感器网络节点的不同配置方式(即节点是否需要知道自身位置信息),可以将无线传感器网络的覆盖算法分为____、____两大类。

8. 根据覆盖目标不同,目前覆盖算法可以分为____、____及栅栏覆盖。

9. 拓扑控制的意义是什么?

10. 拓扑控制设计目标是什么?

11. 功率控制技术有哪些?

12. 基于节点度的功率控制的基本思想是什么?

13. 基于方向的功率控制的基本思想是什么?

14. 层次性拓扑结构控制方法有哪些?

15. 启发机制的基本思想是什么?

16. 覆盖理论基础的基本思想是什么?

17. 覆盖感知模型的基本内容是什么?

18. 覆盖算法分类有哪些?

19. 典型覆盖算法有哪些?

20. 覆盖能效评价指标有哪些?

21. 基于虚拟势场力的传感器网络区域覆盖控制的基本内容是什么?

22. 基于市场竞争行为的无线传感器网络连接与覆盖算法的基本内容是什么?