

无线传感器网络的 节点部署算法研究

赵小敏 方丁 ◎ 著

○○○○○

○○○○○○ ○○○○○○



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

无线传感器网络的节点部署算法研究

赵小敏 方 丁 著



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的节点如何部署,关系到是否可以有效感测所关心的区域、部署成本高低和如何避免覆盖盲区等重要问题,它直接影响着无线传感器网络的服务质量,是建立无线传感器网络实际应用系统所必须要解决的关键问题之一。本书主要阐述了感测范围不规则的传感器、有向传感器、有障碍物遮挡的环境以及三维空间等应用中的节点部署问题。

读者对象包括从事无线传感器网络或物联网研究与应用的学者和工程技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络的节点部署算法研究/赵小敏,方丁著.——上海:上海交通大学出版社,2018

ISBN 978-7-313-19636-1

I. ①无… II. ①赵… ②方… III. ①无线电通信—传感器—计算机网络—研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 145792 号

无线传感器网络的节点部署算法研究

著 者:赵小敏 方 丁

出版发行:上海交通大学出版社

地 址:上海市番禺路 951 号

邮政编码:200030

电 话:021-64071208

出 版 人:谈 毅

印 制:虎彩印艺股份有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:880mm×1230mm 1/32

印 张:6

字 数:151 千字

版 次:2018 年 7 月第 1 版

印 次:2018 年 7 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-313-19636-1/TP

定 价:30.00 元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0769-85252189

前 言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 的节点如何部署, 关系到是否可以有效感测所监测的区域、部署成本高低和如何避免覆盖盲区等重要问题, 它直接影响着无线传感器网络的服务质量, 是建立无线传感器网络实际应用系统所必须要解决的关键问题之一。已经提出的一些节点部署算法, 大多假设节点的感测模型是理想正圆的、应用环境是没有障碍物存在的、二维应用场景的或节点感测角度是全向的、栅栏部署覆盖是完整的, 这与 WSN 中传感器节点的实际感测模型和应用环境有很大差距。主要表现在: ①传感器节点的感测模型并非理想正圆; ②WSN 应用环境中通常有障碍物遮挡; ③经常会涉及三维应用环境; ④传感器的感测方向是有指向性的; ⑤栅栏部署覆盖会出现间隙。

本书主要研究适用于上述五种特殊情况下的无线传感器网络节点部署算法, 包括感测范围不规则的节点部署算法、障碍物遮挡环境下的节点部署算法、三维空间中移动传感器网络自我部署算法、旋转式有向传感器部署算法、无线传感器网络栅栏覆盖及修复算法等。

本书在撰写和出版过程中，得到了浙江工业大学计算机科学与技术学院实验室陈庆章、毛科技、苗春雨等几位老师的帮助，他们提出了大量有建设性的意见和建议。实验室的钮一波、王文夫、汤仲喆、蒋双双等研究生也为本书做了一些资料整理和实验仿真的工作。在此对这些老师和研究生表示感谢。

本书得到浙江省一流学科（A类）计算机科学与技术专业建设经费的支持，在此特表感谢。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 无线传感器网络概述	1
1.1.1 无线传感器网络的概念	1
1.1.2 无线传感器网络的特点	2
1.1.3 无线传感器网络的研究进展	4
1.2 无线传感器网络的节点部署问题	6
1.2.1 节点部署与覆盖	6
1.2.2 节点部署算法的评价指标	7
1.2.3 节点部署的分类	9
1.3 无线传感器网络节点部署的研究现状	11
1.3.1 针对减少覆盖盲区和部署成本的部署算法 研究现状	11
1.3.2 针对三维空间环境的部署算法研究现状	12
1.3.3 针对移动节点的自我部署算法研究现状	13
1.3.4 针对有向传感器的部署算法研究现状	14
1.4 本章小结	15
第 2 章 感测范围不规则的节点部署算法	16
2.1 节点感测范围不规则模型	16
2.1.1 传统的感测模型	16

2.1.2 节点感测范围的测定与分析	18
2.1.3 不规则的感测模型	20
2.1.4 节点感测范围不规则下的连通与覆盖	25
2.2 节点感测范围不规则问题的求解	26
2.2.1 网格化	26
2.2.2 Delaunay 三角剖分和 Voronoi 图	27
2.2.3 Delaunay 三角化目标参考点的选择	28
2.3 感测范围不规则的节点部署算法设计	31
2.3.1 DAWISR 算法基本思想	31
2.3.2 DAWISR 算法流程	31
2.3.3 DAWISR 算法关键步骤	33
2.3.4 DAWISR 仿真与分析	37
2.4 基于 OGDC 的无线传感器网络覆盖盲区检测算法	43
2.4.1 引言	43
2.4.2 基于 OGDC 覆盖盲区检测算法设计	44
2.4.3 仿真实验与结果分析	51
2.5 本章小结	56
第 3 章 障碍物遮挡环境下的节点部署算法	58
3.1 基于三角剖分和权值机制的节点部署算法	58
3.1.1 部署问题描述	58
3.1.2 算法思路	58
3.1.3 算法设计	59
3.1.4 算法仿真与分析	65
3.2 基于蜂窝网格的普通节点部署算法	71
3.2.1 问题描述	71

3.2.2 算法基本思想	74
3.2.3 算法仿真与性能评估	80
3.3 基于 FCM 和 SAGA 的簇首节点部署算法	83
3.3.1 异构传感器网络模型和能量模型	83
3.3.2 FCM 和 SAGA 算法简介	86
3.3.3 基于 FCM 和 SAGA 的分簇路由协议	88
3.3.4 算法仿真与性能评估	94
3.4 本章小结	99

第 4 章 三维空间中的移动传感器网络自我部署算法 ... 101

4.1 引言	101
4.2 三维感测模型相关概念	101
4.2.1 三维感测模型	101
4.2.2 三维感测模型的虚拟力	102
4.2.3 三维空间的最大有效覆盖空间和最大有效 覆盖率定义	104
4.3 算法设计	106
4.3.1 节点密度和障碍物密度计算	106
4.3.2 三维空间节点分簇算法	108
4.3.3 移动位置坐标获取	110
4.3.4 密度控制策略	115
4.4 算法实现	116
4.4.1 相关假设	116
4.4.2 初始化阶段	117
4.4.3 选择阶段	118
4.4.4 决策阶段	119

4.4.5 平衡阶段	120
4.4.6 算法执行步骤	121
4.5 算法仿真实验与分析	123
4.5.1 仿真实验设计	123
4.5.2 仿真结果分析	124
4.6 本章小结	128
第5章 旋转式有向传感器部署算法	129
5.1 旋转式有向传感器部署问题	129
5.2 相关概念	129
5.2.1 旋转式有向传感器感测模型	129
5.2.2 时间覆盖模型	130
5.2.3 问题定义	131
5.3 算法设计	133
5.3.1 MGDCD 算法设计	133
5.3.2 DOOP 算法设计	136
5.3.3 网络连通性	140
5.4 算法仿真与分析	140
5.4.1 仿真实验设计	140
5.4.2 仿真结果分析	141
5.5 本章小结	149
第6章 无线传感器网络栅栏覆盖算法	150
6.1 引言	150
6.2 栅栏覆盖	152
6.2.1 栅栏覆盖研究现状	152
6.2.2 栅栏覆盖典型算法	154

6.3 栅栏间隙修复算法	155
6.3.1 栅栏间隙修复	155
6.3.2 修复路径优化	159
6.3.3 仿真实验	160
6.4 本章小结	166
参考文献	167
索引	177

第1章 绪 论

1.1 无线传感器网络概述

1.1.1 无线传感器网络的概念

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是一种新兴的科学技术网络,最早的研究来源于美国军方。无线传感器网络是由大量具有特定功能的传感器节点通过自组织的无线通信方式,相互传递信息,协同完成特定功能的智能专用网络。它综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术、微电子制造技术和软件编程技术等,可以实时监测、感知和采集网络所监控区域内的各种环境或监测对象的信息,并对收集到的信息进行处理和传送。无线传感器网络在工业、农业、军事、安全、交通、医疗等方面都有应用。近年来,智能家居、办公环境以及空间探测等也成了其应用的领域,它的研究与发展关系到国家安全、经济发展等诸多重要的方面,因无线传感器网络有着广泛的应用前景和巨大的潜在应用价值,在国际上也受到了高度的重视。许多科研机构和企业纷纷投入大量的资金,对无线传感器网络的研究和应用已经成为各方竞争的焦点。

由定义可知,无线传感器网络是由大量具有特定功能的传感器节点组织起来的网络,用于某种特定的场合,实现某项特定的功能。图1-1是无线传感器网络的体系结构图,在监控区域按照一定的部署

策略部署了大量用于探测的传感器节点,并通过成簇算法形成了一个簇。每个簇都由一个簇头和若干个远程节点所组成。远程节点用于数据的采集,并通过无线的方式将数据发送给簇头,如果发送距离在远程节点的通信半径以内,单跳就能达成,否则,需要通过多跳才能将数据传送给簇头节点;簇头节点负责数据的汇集和转发,通过有线或无线的方式将收集起来的数据发送给最终处理节点。

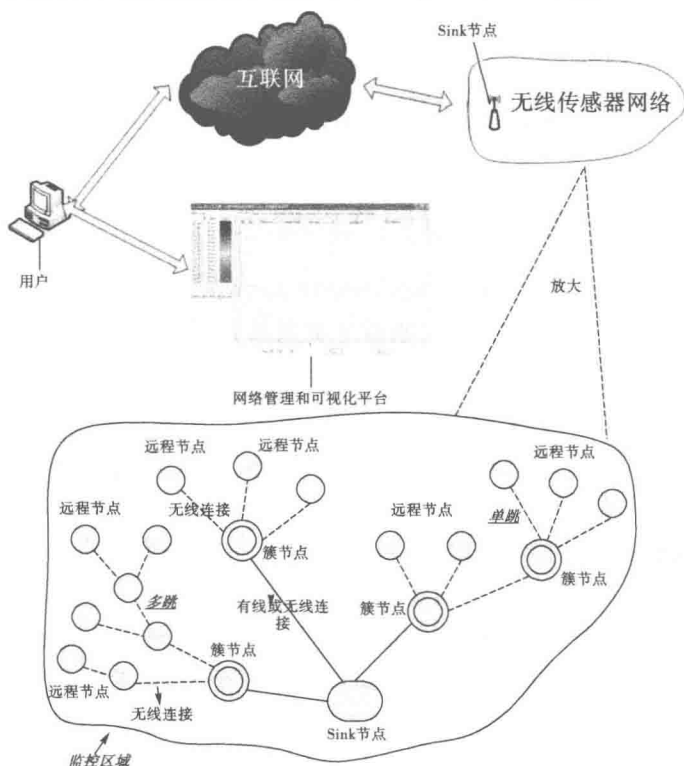


图 1-1 无线传感器网络体系结构

1.1.2 无线传感器网络的特点

无线传感器网络与传感器网络、无线自组织网络等都有一定的差异,并不能简单地认为它就是通过无线方式对多个传感器进行组网。

与传统的无线网络或无线自组织网络相比,无线传感器网络还是具有一些鲜明的特点。

1)低功耗、高度集成、微型化、低价格

通常来说,无线传感器网络用于采集某一特定区域的数据信息,并且是在不能充电的情况下长期处于监测状态,这就需要其满足低功耗、高集成的要求。对于某些特定的应用场合来说,还需要满足微型化的特点才能符合要求。随着应用越来越广泛,虽然当前一些商用的节点(如 DOT 等)在许多指标上离预期的目标仍有一定的差距,但是低价代表了今后的发展方向。

2)节点密集性

在监测区域布设大量同构或异构的传感器节点,是无线传感器网络一个极为重要的特征。通过布设密集的节点,对数据进行采集可以获得同一空间的多项信息,这样就增加了监测的准确性,同时所获取的冗余信息还可以用于容错的检测。

3)拓扑动态变化性

无线传感器网络拓扑的动态性表现在两个方面:一方面,其部署的节点并非都是静止不动的,出于实际应用的需要会通过移动某些节点来达成监测任务;另一方面,出于对能耗的考虑,为了延长网络寿命,节点交替地工作与休眠,这样也会使得网络的拓扑结构一直动态地变化着。另外,某些节点工作时间长了导致电量耗尽或是发生意外使得节点报废也会造成拓扑的变化。

4)自组织性

无线传感器网络的诸多特点决定了其采用自组织工作方式的必要性。传感器节点通常被随机地播撒到一定的区域范围内,事先并不知道节点自身与邻居节点间的相对位置关系,这就需要网络具备能够自动调整而形成自组织网络的功能来适应节点的移动、加入和退出。节点只有不断地进行配置、自行管理、自动调度,才能适应自身条件和外部环境的不断变化。

5)协作式无线网络

协作是无线传感器网络执行监测任务最基本的工作方式,一般包

含协作信息采集、协作信息存储、协作信息处理、协作信息传输等。在复杂的网络环境中,大量的同构或异构传感器节点是通过协作的方式从不同的空间位置和不同的角度对感知对象进行感知,然后通过节点之间的无线通信来达成信息的传输。无线的通信方式也使得整个传感器网络的灵活性大大提高了。

1.1.3 无线传感器网络的研究进展

WSN 的研究起源于 20 世纪 70 年代,最早应用于军事领域,例如冷战时期的声音监测系统(Sound Surveillance System, SOSUS)和空中预警与控制系统(Airborne Warning and Control System, AWACS)。这种原始的传感器网络通常只能捕获单一的信号,传感器节点之间进行简单的点对点通信,网络一般采用分级处理结构。1980 年,美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)的分布式传感器网络项目(Distributed Sensor Networks, DSN)开启了现代传感器网络研究的先河。该项目由 TCP/IP 协议的发明人之一,时任 DARPA 信息处理技术办公室主任的 Robert Kahn 主导,起初设想建立一个由空间分布的低功耗传感器节点构成的网络,这些节点之间相互协作,但自主运行,将信息送达需要它们处理的节点。20 世纪 80—90 年代,传感器网络的研究依旧主要在军事领域进行,并成为网络中心战思想中的关键技术,其中比较著名的系统包括:美军海军研制的协同交战能力系统(Cooperative Engagement Capability, CEC),用于反潜的确定性分布系统(Fixed Distributed System, FDS)和高级配置系统(Advanced Deployment System, ADS),以及远程战场传感器网络系统(Remote Battlefield Sensor System, REMBASS)和战术远程传感器系统(Tactical Remote Sensor System, TRSS)等无人看管地面传感器网络系统。

进入 21 世纪以后,无线通信技术、微芯片制造技术都有了更进一步的发展,随之无线传感器网络技术的研究也取得了重大的进展,逐渐引起了学术界和工业界的关注。作为一种短距离、低功耗无线网络

技术,无线传感器网络技术在科研、工业、国防、国民经济各个领域应用得越来越广泛和深入。人们普遍认为,无线传感器网络技术的发展和应用,将会对现代军事、现代制造业、现代信息技术以及许多重要的社会领域产生巨大的影响,其广阔的应用前景将遍布人们生活的各个领域。

1) 军事领域

在军事领域,WSN 已成为军事 C⁴ISRT (Command, Control, Communication, Computing, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance and Targeting) 系统不可缺少的一部分。因为 WSN 非常适合于恶劣的战场环境,且具有成本低、自组织性强、可迅速扩展等特点,可以用于战场的实时监视、装备的监控、目标的定位跟踪、生化学攻击的防护和搜索等。

2) 环境科学

我们国家幅员辽阔,随着经济的不断发展,环境和生态问题也日趋严峻。人们对环境的变化日益关注,环境科学所涉及的范围也越来越广泛。一些传统的对环境监测的方法已经不能满足现在的要求,无线传感器网络能够对未知地区进行探索和监测,正符合如生物种群研究、地理气象研究、火灾洪水检测等应用场景。

3) 医疗健康

无线传感器网络可以用于采集人体生理数据,通过在患者身体上放置特定的传感器来进行信息收集,这样无论患者在何时何地都会受到医生的监护,当前非常热门的远程医疗很大程度上就是依靠无线传感器网络技术,医生可以随时了解被监护患者的情况,一旦有什么突发事件可以马上进行处理。WSN 为现代化的医疗提供了更加方便和快捷的方式。

4) 智能家居

随着经济的发展,人们的生活质量越来越高,对于自己居住和生活的家自然也提出了更高的目标,智能家居的出现便迎合了这些新时代的要求。在家具和家电中装入嵌入式传感器节点,这些节点

组成小型的家庭无线传感器网络,并将其与 Internet 相连接,会为人们提供更加舒适、温馨、方便和人性化的智能家居环境。如根据家具容易脏的程度可以进行自动除尘,根据室内亮度需求自动调节灯光等。

5) 紧急援救

近年来,天灾人祸频发,地震、火灾、水灾、爆炸甚至恐怖袭击等,会给受灾地区的通信造成巨大的损害,一些固定的通信网络设备,如移动通信网络基站、有线通信网络设施、地球通信卫星、微波接力站等可能无法正常工作或部分无法工作,甚至出现完全损毁的情况,这会使整个区域的通信陷入瘫痪状态。WSN 不依赖固定网络设施的特点使其在这样的困境下成为进行通信的最佳选择。

6) 空间探索

苏联第一颗人造卫星发射升空,拉开了人类航天时代的序幕,在人类完成了对月球的探索之后,又要向新的目标火星发起挑战。借助航天器在外星球随机地播撒无线传感器节点,利用 WSN 低功耗、自组织、动态性等特点,可以对星球表面进行长期的监测与探索。本节所提出的移动传感器三维自我部署算法可以为以后针对需要悬浮于外太空的空间探索难题提供参考。

1.2 无线传感器网络的节点部署问题

1.2.1 节点部署与覆盖

所谓节点部署问题,就是在一定的区域内,通过适当的策略放置传感器节点以满足某种特定的应用需求。节点部署关系到传感器网络监测信息的完整性、准确性和时效性。节点部署有两个主要问题要解决,一是如何避免部署盲区,以确保获得监测区域的完整数据;二是如何部署最少量的节点,达到最大的感测覆盖率。节点部署问题最早起源于艺术馆问题与圆周覆盖这两个经典的计算几何问题。节点部

署的任务是使节点的感测范围能覆盖到监测目标区域或目标点,并保持节点间的连通性。合理的节点部署方式不仅可以优化利用网络资源,还可以根据应用需求调整节点的活跃程度,以动态调整网络的节点密度。此外,在某些节点因物理损坏或能量耗尽而失效时,通过一定策略重新部署节点,可保证网络的连通性和减少覆盖盲区。

传感器节点的部署取决于传感器类型、具体应用和网络的工作环境等因素,可以是随机部署,也可以是确定性部署。在不易到达的地区,通常采用随机部署节点的方法。比如,在自然灾害监测或森林防火检测的应用中,传感器节点通常采用直升机随机抛洒的方式进行部署。在确定性部署中,节点的位置是确定的,通常用于室内,比如室内火灾监测与救援系统、农业大棚环境监测系统等。

所谓覆盖是通过部署传感器网络节点来使网络覆盖范围最大化。当一个区域在任意一个传感器节点的感测范围之内时,称这个区域是可以被覆盖的;反之,若一个区域不在任意一个传感器节点的感测范围之内或超过了监测范围,那么该区域是不能覆盖的,称为覆盖盲区。对应监测区域内覆盖的对象不同,节点覆盖的方式也不一样。按照监测区域覆盖对象的不同,分为区域覆盖、点覆盖和栅栏覆盖三类。区域覆盖是指在任意时刻传感器网络可监控到给定感兴趣区域中的所有子区域,其目标是在保证节点网络连通的前提下,最大限度地覆盖感兴趣区域,使得感兴趣区域中各处都能被一个或多个传感器节点覆盖到。点覆盖是指对感兴趣区域中的目标点进行监测,将节点集合划分为若干互不相交的子节点集合,保证目标点能被每个节点集合完全覆盖即可。栅栏覆盖是指给定一个狭长区域,假如所有可能穿越该狭长区域的路径都至少被一个传感器覆盖,那么这个区域就是被栅栏覆盖的。栅栏覆盖的目标是考虑移动目标突破无线传感器网络而未被监测到的概率最小化。

1.2.2 节点部署算法的评价指标

针对不同的应用环境,对无线传感器网络节点的部署要求也不一