



传感器网络 覆盖定位模糊信息 处理方法

曹文明 王 瑞 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

传感器网络覆盖定位 模糊信息处理方法

曹文明 王 瑞 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

不确定覆盖和定位问题是传感器网络实际应用中的热点问题。本书针对具有模糊感知和模糊位置等信息的不确定覆盖和定位问题,探索一种新的模糊信息处理方法,从信息学角度出发,给出自组织网络不确定信息的模糊度量,并研究其模糊几何性质,为实现具有模糊信息的覆盖和定位问题提供有效的解决方案。本书的主要内容有:模糊理论相关知识、模糊 n 维几何理论及其在传感器网络被动目标定位中的应用、Sugeno 测度的传感器网络信息覆盖、Sugeno 测度的模糊流形及其在传感器网络定位中的应用、传感器网络模糊信息覆盖分析、传感器网络云覆盖。

本书适合从事传感器网络、模糊信息处理、智能信息处理、人工智能、模糊式识别等领域工作的学者和研究人员阅读人参考,同时也可以作为理工科大学相关专业研究生的教学参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

传感器网络覆盖定位模糊信息处理方法 / 曹文明, 王瑞著. —北京: 电子工业出版社, 2010.6
ISBN 978-7-121-10932-4

I. ①传… II. ①曹… ②王… III. ①无线通信—传感器—信息处理—研究
IV. ①TP212 ②O159

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 093347 号

策划编辑: 董亚峰

责任编辑: 雷洪勤

文字编辑: 韩玉宏

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 13 字数: 226 千字

印 次: 2010 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 2 000 册 定价: 36.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

传感器网络是无人探测区域的新型信息获取系统,在重要基础设施安全、大型社会活动反恐防爆、高危行业安全探测及国土防空等方面具有重要作用。发展和应用传感器网络实现对区域近距离监视、侦察、目标定位、识别和跟踪是区域信息获取非常重要的手段。作为推动信息领域进入崭新发展阶段的新兴技术,传感器网络相关的理论和应用已成为非常关键的研究方向。其中,传感器网络覆盖和定位是所对应的分布智能信息处理系统中的基础性问题。本书主要针对传感器网络的覆盖和定位问题展开讨论。

实际应用中的传感器网络自身规模大,传感器节点能量、计算能力、通信能力和感知能力等方面受限,人们对实际监控环境的认知有限,网络拓扑动态变化,模型及其参数值的选择与实际情况存在偏差等,所有这些不确定因素会使得所形成的自组织网络信息获取与网络拓扑有一定的随机性和模糊性,导致信息获取的不完整。尤其是传感器位置信息、网络拓扑和感知能力都带有一定的不确定性,往往不能精确测量自身所形成的自组织网络信息。利用传统几何和数理统计方法来解决传感器网络中的具有模糊信息的不确定覆盖和定位问题存在很大的局限性。

本书主要针对具有模糊感知和模糊位置等信息的不确定覆盖和定位问题,探索一种新的模糊信息处理方法,从信息学角度出发,给出自组织网络不确定信息的模糊度量,并研究其模糊几何性质,为实现具有模糊信息的覆盖和定位问题提供有效解决方案。本书利用模糊理论相关知识,提出模糊 n 维几何理论及其在传感器网络被动目标定位中的应用、Sugeno 测度的传感器网络信息覆盖、Sugeno 测度的模糊流形及其在传感器网络定位中的应用、传感器网络模糊信息覆盖分析、传感器网络云覆盖,最后对模糊信息处理的不确定覆盖和定位方法进行了总结与展望。

本书分为 8 章,主要内容安排如下。

第 1 章,简要介绍了本书研究的背景、意义、传感器网络及其特点;阐述了传感器网络的国内外研究现状、传感器网络覆盖问题的研究现状、传感器网络定位问题的研究现状;最后给出了本书的主要贡献。

第 2 章,简要介绍了模糊理论基础知识。具体包括模糊集合、隶属函数、模糊集合的运算、模糊关系、模糊数、模糊语言、模糊推理和模糊性度量等概念。

第 3 章,提出了模糊 n 维几何分析方法,研究了 R^n ($n \geq 1$) 空间中的模糊点、模糊点间的距离、模糊向量、模糊线和模糊二次超曲面等,并探讨了其

相关几何性质。在此基础上,提出了在模糊线性观测轨迹、模糊三角形观测结构和正规模糊椭圆观测轨迹情况下仅含有方向角信息的传感器网络被动目标模糊几何定位算法;提出了 R^3 空间中运动状态下的被动目标模糊几何定位算法和理论,通过在固定时间间隔测量被动目标的模糊方向角、俯仰角以实现 R^3 空间中被动目标包含模糊坐标和运动速度的四维定位。

第4章,介绍了 Sugeno 测度的基本概念和性质,并在此基础上提出了基于 Sugeno 测度的传感器网络信息覆盖分析方法,利用两节点间的相互作用提出了周界覆盖分析方法,给出了蜂窝网状部署情况下的信息覆盖分析,最后提出了基于 Sugeno 测度的传感器网络最佳模糊信息覆盖路径分析方法。

第5章,介绍了 Sugeno 测度空间上随机变量的数字特征,在此基础上将学者 Amari 所提出的统计流形从概率测度空间推广到 Sugeno 测度空间,提出了一种基于 Sugeno 测度的模糊流形分析方法,包括 Sugeno 模糊模型的基本微分几何结构、模糊流形中的切空间、黎曼度量。最后提出了基于信号强度的 Sugeno 模型匹配定位算法。

第6章,提出了传感器网络的模糊信息覆盖分析方法,定义了覆盖强度隶属函数和融合算子,给出了确定部署和随机部署情况下的模糊信息覆盖分析,提出了传感器网络高阶模糊信息覆盖分析方法,利用 Voronoi 图和 Delaunay 图对传感器网络的最佳与最差情况模糊信息覆盖进行了理论分析。

第7章,提出了一种基于云模型的信息覆盖分析方法,并给出了确定部署情况下的云覆盖分析。实验结果显示,云覆盖分析方法不仅可以很好地处理实际环境中的不确定性,而且考虑到了传感器间的协同信息处理,减少了完全覆盖时的节点密度。邻近节点的协同估计会导致能量消耗,影响传感器网络的使用寿命。

第8章,总结本书工作,并对该领域相关问题进行了总结与展望。

本书适合从事传感器网络、模糊信息处理、智能信息处理、人工智能、模式识别等领域工作的学者和研究人员阅读参考,同时也可以作为理工科大学相关专业研究生的教学参考书。

本书作者的研究工作得到了国家自然科学基金项目(No.60872126)和广东省自然科学基金项目(No.8151806001000002)等的资助,在此表示感谢。

本书的第3~7章内容的构思和撰写是在曹文明和王瑞的共同探讨和研究下完成的,详细地阐述和论证了模糊信息处理的传感器网络覆盖和定位方法。

由于作者水平有限,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请专家、读者指正。

作 者
2010年5月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 传感器网络简介	1
1.1.1 传感器网络的特点	1
1.1.2 国内外研究现状	3
1.2 传感器网络覆盖定位问题研究现状	5
1.2.1 传感器网络覆盖问题研究现状	5
1.2.2 传感器网络定位问题研究现状	10
1.3 本书的主要贡献	12
第2章 模糊理论基础	14
2.1 引言	14
2.2 普通集合	16
2.2.1 集合的表示方法	16
2.2.2 集合的运算	17
2.3 模糊集合	18
2.3.1 基本概念	18
2.3.2 模糊集合的运算	21
2.4 分解定理与扩展原理	24
2.4.1 分解定理	26
2.4.2 扩展原理	27
2.5 模糊关系	28
2.5.1 关系的基本知识	28
2.5.2 模糊关系及其基本运算、投影、截关系	29
2.5.3 模糊关系的合成	31
2.5.4 模糊关系的性质	32



2.6	模糊数	33
2.6.1	凸模糊集	33
2.6.2	模糊数	33
2.7	模糊语言与模糊推理	34
2.7.1	语言变量	35
2.7.2	模糊命题	37
2.7.3	模糊推理	39
2.8	模糊性度量	41
2.8.1	模糊集合的模糊性度量	41
2.8.2	模糊事件的概率	44
2.9	小结	46
第3章 模糊 n 维几何理论及其在传感器网络被动目标定位中的应用		
3.1	引言	47
3.2	模糊 n 维几何理论	48
3.2.1	模糊数	48
3.2.2	R^n 空间模糊点与模糊向量	49
3.2.3	R^n 空间模糊线	55
3.2.4	R^n 空间模糊二次超曲面	57
3.3	传感器网络被动目标模糊几何定位算法	59
3.3.1	模糊线性观测轨迹下的被动目标模糊几何定位算法	60
3.3.2	模糊三角形观测结构下的被动目标模糊几何定位算法	65
3.3.3	正规模糊椭圆观测轨迹下的被动目标模糊几何定位算法	69
3.3.4	R^3 空间中运动状态下的被动目标模糊几何定位算法	72
3.4	小结	78
第4章 Sugeno 测度的传感器网络信息覆盖		
4.1	引言	80
4.2	Sugeno 测度基本概念与性质	81
4.3	Sugeno 测度的传感器网络信息覆盖方法	84
4.3.1	Sugeno 测度的传感器网络信息覆盖分析	84
4.3.2	Sugeno 测度的传感器网络周界覆盖分析	87



4.3.3	Sugeno 测度的蜂窝网状部署传感器网络信息覆盖分析	91
4.4	Sugeno 测度的最佳情况模糊信息覆盖分析	93
4.4.1	Sugeno 测度的融合算子	94
4.4.2	最佳情况模糊信息覆盖分析	95
4.5	小结	101
第 5 章	Sugeno 测度的模糊流形及其在传感器网络定位中的应用	103
5.1	引言	103
5.2	Sugeno 测度空间上随机变量的数字特征	104
5.2.1	Sugeno 测度空间上随机变量及其分布函数	104
5.2.2	Sugeno 测度空间上随机变量的数学期望与方差	107
5.3	Sugeno 测度的模糊流形	109
5.3.1	基本概念	109
5.3.2	切空间	113
5.3.3	距离和黎曼度量	125
5.4	信号强度的 Sugeno 模型匹配定位算法	129
5.4.1	Sugeno 模型匹配定位算法	130
5.4.2	仿真分析	134
5.5	小结	135
第 6 章	传感器网络模糊信息覆盖分析	136
6.1	引言	136
6.2	模糊信息覆盖	137
6.2.1	基本概念	137
6.2.2	覆盖强度隶属函数与融合算子	138
6.3	确定部署模糊信息覆盖分析	142
6.4	高阶模糊信息覆盖分析	145
6.4.1	问题描述	145
6.4.2	充分条件	146
6.4.3	完全(K, D_{th}) 覆盖判别算法	147
6.4.4	实例	148
6.5	随机部署模糊信息覆盖分析	149
6.5.1	随机均匀部署模糊信息覆盖分析	149



6.5.2 随机泊松部署模糊信息覆盖分析	151
6.6 界线模糊信息覆盖分析	155
6.7 小结	162
第7章 传感器网络云覆盖	164
7.1 引言	164
7.2 云模型理论概述	165
7.2.1 云模型理论的基本概念	165
7.2.2 云的数字特征	166
7.3 云覆盖	168
7.3.1 问题描述	168
7.3.2 云覆盖模型	169
7.4 实例分析	171
7.5 结论	173
第8章 总结与展望	174
附录A 相关定理证明	177
参考文献	184

第 1 章 绪 论

1.1 背 景

设计、材料、加工和检测构成了现代制造业的四大支柱,而可靠的无损检测技术为产品质量的提升及生产过程安全提供了有力保障,所以说一个国家的无损检测水平反映了该国的工业技术水平,现代工业是建立在无损检测基础上的。无损检测技术能为企业带来显著的经济效益,统计资料显示,经过无损检测后,普通机械产品有 5%~10% 的产品增值,电力、化工、国防、宇航和核能产品有 12%~18% 的产品增值,如德国奔驰汽车几千个零件经过无损检测后,整车运行公里数提高了一倍;日本汽车在 30% 零件采用无损检测后,质量迅速赶上美国。

伴随着改革开放 30 年我国经济的快速崛起,我国拥有了世界上最大的无损检测队伍和市场,目前,我国有 2000 多家无损检测机构,近 17 万无损检测人员,大专院校每年培养近千名无损检测专业的大专生、本科生和研究生;年无损检测仪器销售额超 10 亿元,年无损检测服务产值超 250 亿元。中国的现代化建设对先进的无损检测仪器、技术和服务有巨大的需求。我国的无损检测工作者肩负着重要的历史使命,无损检测事业也面临着前所未有的发展机遇。

超声检测是国内外应用最广泛、使用频率最高且发展较快的一种无损检测技术,与其他无损检测技术相比,它具有检测对象范围广,检测深度大,对裂纹类缺陷敏感、灵敏度高,成本低,使用方便,速度快,对人体无害以及便于现场使用等特点。目前,国外每年发表的约 3000 篇涉及无损检测的文献资料中,约有 45% 是有关超声无损检测的。

传统的超声波检测是以实践和经验为基础的一门技术,主要依靠检测人员根据回波信号凭经验进行缺陷评定。当被检工件的材质和结构复杂时,如压力容器的不规则表面、核电站的非均质各向异性奥氏体焊缝、飞机翼板的多层复合材料等,即使有经验的检测人员也会遇到缺陷识别和定量困难。

近年来,相控阵、导波、TOFD 等新技术的应用大大丰富了超声检测理论与应用领域,提高了检测效率。但面对复杂的检测系统,建立超声声场及回波信号与工件结构、材质、缺陷类型、位置、尺寸和取向的定量关系,对提高超声检测的定位、定性和定量的可靠性更显重要,可指导检测工艺的设计和辅助分析检测数据。

一门技术成熟或上升为科学,最基本、最显著的标志是其进入了误差很小的定

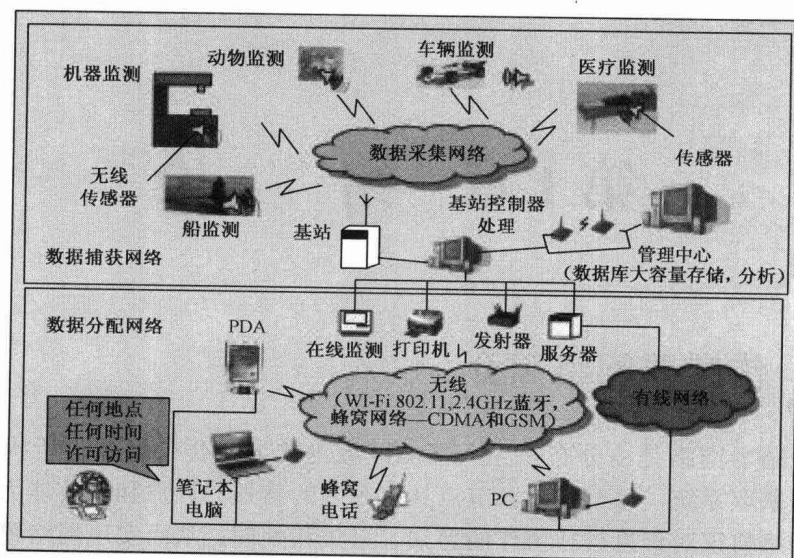


图 1.1 传感器网络示意图

(2) 传感器网络的节点有一定的故障率。传感器网络可能工作在恶劣的外界环境之中，网络中的节点会因为各种不可预料的因素而失效。为了保证网络的正常工作，传感器网络必须具有一定的容错能力，允许传感器节点具有一定的故障率。

(3) 传感器网络的节点在电池能量、计算能力和存储容量等方面有限制。微型化的传感器节点电池能量有限，而且由于物理限制难以给节点更换电池，所以传感器节点的电池能量限制是整个传感器网络设计最关键的约束之一，它直接决定了网络的工作寿命。另外，传感器节点的计算能力和存储容量有限，使得其不能进行复杂的计算，这就要求协议和算法设计要尽可能简洁。

(4) 传感器网络拓扑结构变化的不确定性。为了延长网络的工作寿命，传感器节点经常在工作与休眠状态之间切换；传感器节点随时可能由于各种原因发生故障而失效；为了提高网络的质量，可以添加新的传感器节点作为补充。这些特点都使得传感器网络拓扑结构变化存在一定的不确定性。此外，如果节点具备移动能力，那么也有可能引起网络拓扑的变化。

(5) 传感器网络以数据为中心。在传感器网络中，人们只关心某个区域的某个观测指标的值，而不会去关心具体某个节点的观测数据。以数据为中



心的特点要求传感器网络能够脱离传统网络的寻址过程,快速有效地组织起各个节点的信息并融合提取出有用信息直接传送给用户。

1.1.2 国内外研究现状

近年来,随着微机电系统(MEMS)、无线通信技术、传感器技术与集成电路技术等迅速发展,传感器网络已经成为当今前沿性的热点研究方向之一,有着巨大的科学意义和应用前景,被认为是将对21世纪产生巨大影响的高技术之一。2003年2月的美国《技术评论》杂志评选出将对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术,传感器网络被列为第一。美国《商业周刊》在2003年8月的技术评论中,已经将传感器网络定位为21世纪高技术领域的四大支柱型产业之一,其潜在的市场需求十分巨大。传感器网络已引起世界各国学术界、军事部门和工业界的极大关注。

美国国防预研局DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)在20世纪70年代末和90年代初先后提出的“分布式传感器网络(Distributed Sensor Network, DSN)计划”和“传感器信息技术(Sensor Information Technology, SensIT)计划”有力地推动了传感器网络的理论和实现方法的研究,在网络传感器(network sensor)、网络技术(networking technique)和协同信号处理方法(collaborative signal processing)方面均取得了长足的进展,并先后建立了几个实验平台,成功实现了利用声传感器网络跟踪低空飞行器的实验和利用分布式车辆监视来研究网络中的分布式问题。

美国自然科学基金委员会于2003年制定了传感器网络研究计划,投资3400万美元支持相关基础理论的研究。美国国防部和各军事部门也对传感器网络给予了高度重视,在C4ISR的基础上提出了C4KISR计划,把传感器网络作为一个重要研究领域,设立了一系列的军事传感器网络研究项目。美国英特尔公司、微软公司等信息工业界巨头也开始了传感器网络方面的工作,纷纷设立或启动相应的行动计划。欧盟于2002年开始实施为期3年的“自组织和协作有效能量的传感器(EYES)网络计划”。2004年3月,日本总务省成立泛在传感器网络(Ubiquitous Sensor Network)调查研究会。

加州大学洛杉矶分校、康奈尔大学、麻省理工学院和加州大学伯克利分校等一些著名大学也先后开展了传感器网络方面的研究工作。加州大学洛杉矶分校在生态监控方面研究了小气候传感器和视频传感器网络技术,在地震监控和响应结构方面研究了数据通信控制器和网络时间同步、传感器可靠部



署、宽带地震网络、结构检测的无线地震监控网络。加州大学伯克利分校实施了 WINS 项目,项目包括网络嵌入系统技术 (NEST),为网络嵌入系统开发了一系列的软、硬件实验平台,包括在小型传感器上运行的 TinyOS 操作系统、TOSSIM 模拟器、数据查询系统 TinyDB,在 TinyOS 上运行的编译器 NesC,用于传感器网络的定位系统 Calamari,链路层加密算法 TinySEC;还包括 SensorWebs、SmartDust、Pico Radio 等部分。麻省理工学院研究了传感器网络的数据流管理系统集成框架、查询优化技术、网络节约能量的拥塞控制等,研究了中间件技术,如定位、追踪和联网等,研究了大型传感器网络可扩展算法,还研究了传感器网和移动装置网的分布算法。这些研究获得了 NSF、DARPA 和空军太空实验室的支持。

在国内,传感器网络方面的研究起步较晚,近几年才受到广泛关注。“传感器网络系统的基础软件及数据管理关键技术的研究”已被列为国家自然科学基金委员会信息科学部与微软亚洲研究院正式签署的第二期联合资助项目之一。我国《信息产业科技发展“十一五”计划和 2020 年中长期规划(纲要)》中将“智能信息处理和物与物通信网络技术”确定为网络与通信领域 11 个主要技术领域之一,并将之确定为我国需要重点突破的核心技术,其发展目标包括“重视传感器网络等物与物通信网络技术的研发,形成自主知识产权的核心技术和产品,打造完善的产业链;推广传感器网络技术在全社会的应用,形成一大批有示范效应的应用范例,为无处不在、人与物共享的网络应用奠定基础”。在国内,关于多传感器的数据融合和信息融合方面的研究已有很好的研究成果,在 ad hoc 网络方面也有较好的研究结果。但是,对于面向给定任务的传感器网络的网络技术、网络检测与跟踪方法等内容的报道较少。国内多传感器数据融合和信息融合及 ad hoc 网络技术的研究结果对于研究面向给定任务的无线传感器网络实现方法具有一定的参考价值。

IEEE 于 2003 年 10 月专门针对传感器网络制定了低速无线个域网标准——IEEE 802.15.4 协议。IEEE 802.15.4 协议主要针对物理层和 MAC 层的标准。IEEE 802.15.4 物理层的使用可以支持欧洲的 868MHz 的频段、全球美洲和澳洲的 915MHz 的频段和现在已经被广泛使用的 2.4GHz 的频段,这使得该协议具有更旺盛的生命力。ZigBee 传输速度为 20~250kbps。就在 IEEE 推出 IEEE 802.15.4 协议标准的同时,ZigBee 联盟也开始酝酿着与之相配套的网络层及应用层的协议,目的并不是为了推出一项具体的技术,而是为了给传感器网络和控制系统的推出一个标准的解决方案。IEEE 802.15.4/ZigBee 协议是由 IEEE 802.15.4 标准的物理层和 MAC 层再加上 ZigBee 的网络层和



应用层所组成的，其突出的特点是网络系统支持极低成本、易实现、可靠的数据传输、短距离操作、极低功耗、各层次的安全性等。

1.2 传感器网络覆盖定位问题研究现状

1.2.1 传感器网络覆盖问题研究现状

覆盖作为传感器网络中的一个基本问题，它反映了网络在给定区域内所能提供的感知服务质量，对传感器网络的生存时间、组网和协同信息处理等问题的解决具有十分重要的影响^[7-10]。好的覆盖方法可以使传感器网络的空间资源得到更优化的分配，进而更好地完成环境感知、信息获取和任务的有效传输。传感器网络的覆盖问题在很大程度上取决于传感器节点的覆盖模型和节点的部署位置。简单地说，节点的覆盖模型描述了空间点和传感器之间的几何关系。传感器覆盖模型是传感器的感知能力的测量，而网络覆盖是分散在不同地理位置的传感器节点感知能力测量的集合。

1. 传感器信息覆盖模型

传感器信息覆盖模型描述了空间上的点与传感器之间的一种几何映射关系，而准确的信息覆盖模型可以精确地估计传感器网络的覆盖质量，使得传感器网络的空间资源得到优化分配。下面对现有两类信息覆盖模型进行分析比较，即确定信息覆盖模型和不确定信息覆盖模型。

为了便于研究，在很多情况下，传感器信息覆盖模型被简化为确定信息覆盖模型，即 0-1 覆盖模型^[7]。假设传感器 s 的位置为 (x_s, y_s) ， R_s 为传感器感知半径。任意目标点 p 的位置为 (x_p, y_p) ，其距离 $d(s, p) = \sqrt{(x_s - x_p)^2 + (y_s - y_p)^2}$ ，则式 (1.1) 给出了 0-1 覆盖模型的定义，即事件发生在传感器节点覆盖半径内的覆盖概率为 1，否则为 0。基于 0-1 覆盖模型的覆盖也被称为物理覆盖^[15]。

$$C_p(s) = \begin{cases} 1, & d(s, p) < R_s \\ 0, & d(s, p) \geq R_s \end{cases} \quad (1.1)$$

0-1 覆盖模型的缺点在于过于理想化，没有考虑实际部署中环境噪声、障碍物阻挡等因素对节点感知能力的影响，而且 0-1 覆盖模型检测粒度大，

不足以表现检测可信度。

现有的研究不确定覆盖问题的方法主要以概率论和数理统计为基础^[11-15]。在实际环境中,节点检测的可信度与到检测目标的距离及周边环境状况有关,可信度取值在 0 与 1 之间变化,且符合一定的概率分布。考虑到传感器的感知能力随距离的增加而降低,Megerian 等提出了基于负指数距离的感知模型^[11]。对于传感器节点 s ,任意目标点 p 的感知强度定义为

$$S(s, p) = \frac{\lambda}{[d(s, p)]^K} \quad (1.2)$$

其中, p 为目标点;正常数 λ 和 K 均为与传感器相关的参数, $d(s, p)$ 为节点 s 与目标点 p 的欧几里得距离。Lu 等^[12]参考此模型定义了单传感器节点感知区域内任意点的覆盖概率,即

$$P(s, p) = \begin{cases} \frac{1}{[1 + \alpha d(s, p)]^\beta}, & d(s, p) \leq R_s \\ 0, & d(s, p) > R_s \end{cases} \quad (1.3)$$

其中, $S(s, p)$ 为节点 s 感应区域内任意点 p 的覆盖概率; $d(s, p)$ 为节点 s 与目标点 p 的欧几里得距离; α 和 β 为与传感器物理特性有关的类型参数。任意点的覆盖概率是一个介于 0 和 1 之间的数,通常 β 取值为 1 与 4 之间的整数,而 α 是个可调的参数。

在信号传播路径上所存在的障碍物会降低传感器接收事件信号的能量,造成传感器接收能量的差异(阴影效应)。如果事件发生的信号能量固定,受到阴影效应的影响,节点的感知半径不再是一个确定的值。考虑到感知目标差异、环境噪声与障碍物阻挡等因素对传感器感知能力的影响,Ahmed 等^[13]利用对数距离路径损耗模型提出了基于信号传播的概率覆盖模型。目标事件与传感器距离为 d 的路径损耗公式为

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + N_\sigma \quad (1.4)$$

其中, d_0 为参考距离; n 为路径损耗因子,表明路径损耗随距离增加的增加速度; N_σ 为均值为 0、方差为 σ^2 高斯分布的随机变量,其单位为 dB; $P_L(d_0)$ 为在参考距离 d_0 处的平均路径损耗。 n 与 N_σ 可通过试验测得。 $P_L(d_0)$ 也可以通过给定的事件和传感器特性测量或通过自由空间路径损耗模型来计算。

假设每个传感器有一个接收阈值 γ 用来描述传感器正确接收信号的最小信号强度,利用 Q 函数来计算传感器接收信号强度大于阈值 γ 的概率。 Q 函



数定义为 $Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$ 。其中, $Q(z) = 1 - Q(-z)$ 。所以接收信号强度大于阈值 γ 的概率为

$$\Pr\{P_r(d) > \gamma\} = Q\left[\frac{\gamma - P_r(d)}{\sigma}\right] \quad (1.5)$$

其中, $P_r(d) = P_t(d) - P_l(d)$ 。

该模型考虑了目标差异、环境因素和信号在空间中的传播损耗对传感器感知能力的影响,更加接近现实。Tsai 等^[14]对该模型进行了更为详尽的描述,并分析了阴影效应对感知半径、网络覆盖质量的影响。但该模型需要获取大量关于监测区域的先验数据才能得到准确的模型参数。

考虑到大规模传感器网络节点部署密集、空间上相近节点具有一定相关性的特点, Wang 等^[15]人利用参数估计理论和节点间的协同信息处理方法,提出了信息覆盖。假设事件发生在与传感器 k 距离为 d_k 的位置,所携带的信息为 θ 。 θ 随着距离衰减,衰减系数为 α ($\alpha > 0$)。传感器第 k 个观测值 x_k 也会受到加性噪声的影响。则有

$$x_k = \frac{\theta}{d_k^\alpha} + n_k, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (1.6)$$

利用最优线性无偏估计 (BLUE) 可以在 K 个观测值的前提下,得到估计值 $\hat{\theta}$ 和估计误差 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ 。如果估计误差小,那么不但可以认为检测到了事件或目标,而且可以给出一个可信度。当 $\Pr\{|\tilde{\theta}_k| \leq A\} \geq \varepsilon$ ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) 时,认为目标点被 K 个传感器信息覆盖,记为 (K, ε) 覆盖。

如图 1.2 所示,物理覆盖无法检测的五角星的区域可以被信息覆盖。当 $K=1$ 时,即为简单的 0-1 覆盖;当 $K>1$ 时,信息覆盖不仅仅是 K 个圆盘覆盖的组合。信息覆盖很好地利用节点间的协作处理,扩大了原有的覆盖范围,在给定的目标区域使用较少的节点即可完成覆盖任务。

虽然信息覆盖模型改进了物理覆盖的保守定义,扩大了传感器网络的覆盖范围,但是该模型也存在着缺点:该模型假设环境噪声为空间不相关的白噪声,感知模型为线性模型,有一定的局限性,针对具体应用环境,模型的不准确会导致信息的不完全;节点需要精确定位;另外,节点需要协作处理才可以达到覆盖目的,增大网络开销(如通信量、计算量),所以需要权衡参与估计的节点数目和覆盖质量。

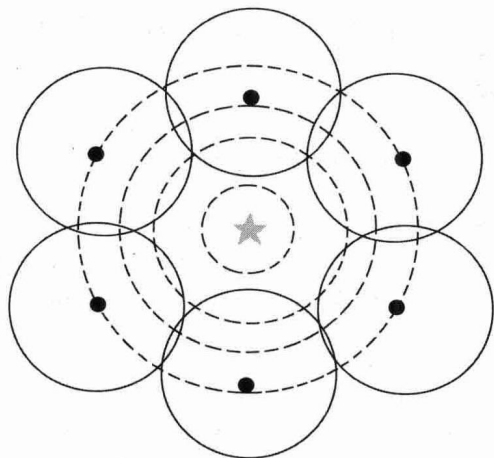


图 1.2 信息覆盖

2. 覆盖问题分类

早期典型的覆盖问题是“艺术馆走廊问题 (Art Gallery Problem)”^[16]。它要求给出监控艺术馆走廊中任意点所需要的最少传感器的布设方法。该问题简化为二维平面上的多边形覆盖后, 可以通过计算几何的方法得到最优解, 但在三维空间中, 该问题成为一个 NP 问题。这种方法为覆盖提供了一些理论背景, 但是由于传感器网络的能量有限和自组织网络拓扑结构等特性, 该方法无法直接应用到传感器网络的覆盖问题中。

传感器网络的覆盖研究与实际应用息息相关。在设计阶段, 需要计算完全覆盖监控区域所要求的最少传感器节点数目; 在部署阶段, 对于在相邻监控区域的中、小型规模传感器网络可实施确定节点部署的方法, 对于网络规模大、监控区域远且危险的传感器网络需要随机抛撒部署, 通过加入具有移动能力的节点, 可在初始部署后, 使移动节点运动到更加合适的位置以达到最佳覆盖; 在工作阶段, 在满足一定网络覆盖质量或网络连通性的前提下, 可以通过调度不同的节点轮流工作以延长网络寿命, 同时调度算法还需要考虑能量消耗等其他因素。表 1.1 从覆盖类型、部署方法、节点调度算法、网络连通性和异类传感器节点 5 个方面总结了传感器网络的覆盖问题。

按照覆盖类型划分, 传感器网络覆盖问题包括针对特定兴趣点的目标点覆盖^[17-24]、针对平面 R^2 内任意点的面覆盖^[7]、界线覆盖^[25-34]、针对空间 R^3 内任意点的空间覆盖^[35,36]及混合型目标覆盖^[37]; 按照传感器部署方法划分, 包括确定节点部署^[38]、随机节点部署^[39-49]和可移动节点部署^[50-60]等类型。