

# 随机部署 无线传感器网络

陈曦 著

Wireless  
Sensor  
Network

清华大学出版社

# 随机部署 无线传感器网络

陈曦 著



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书针对随机部署的无线传感器网络,分析网络覆盖性能的基本特性并设计出非完全覆盖的节点工作模式;分析传感器网络以大概率捕捉动态目标的节点调度机制与节点工作模式对覆盖性能及网络寿命的影响;进一步提出以概率转发的多路由通信协议.最后介绍基于能量强度的多目标声源定位及目标个数的估计方法与基于 Mica 传感器系统的目标定位与跟踪的实验.

本书可供高等院校相关专业的研究生以及从事无线传感器网络的研究和应用的人员参考.

版权所有,侵权必究.侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

随机部署无线传感器网络/陈曦著.—北京:清华大学出版社,2017

ISBN 978-7-302-47670-2

I. ①随… II. ①陈… III. ①无线电通信—传感器—研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 155297 号

责任编辑:刘颖

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印装者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:10.75 字 数:246 千字

版 次:2017 年 10 月第 1 版 印 次:2017 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:42.00 元

产品编号:068562-01

# 前言

本书研究随机部署的无线传感器网络。我们采用概率和统计方法分析网络的感知覆盖、目标监测和跟踪等性能,并设计出传感器节点依概率、按周期的调度模式以及依概率转发数据包的多路由通信协议。本书中采用的方法及得到的结果对于以其他方式部署的无线传感器网络也有一定的参考意义。

衷心感谢何毓琦教授。与何教授的合作让我受益匪浅,他的洞察力和灵感给予我深刻的启发。非常感谢管晓宏教授。他在 2003 年就引领清华大学自动化系智网中心的师生进入无线传感器网络这一新兴的、充满挑战和希望的研究领域。感谢与我共同从事无线传感器网络研究的其他老师和学生:赵千川、袁睿翕、江永亨、夏俐、白红星、贾庆山、张健松、李江海、王永才、唐文、韩殿飞、周洪超、李彬、王星石、聂春凯、李杰、葛均峰等。

本书大部分内容是对我们所发表的部分会议论文、期刊论文以及研究生的学位论文的整理和总结。由于学位论文的主要工作都体现在相应的会议论文或期刊论文中,学位论文之间在时间和内容上也存在一定的继承关系,在整理过程中做了整合。为便于读者查找,同时免去在正文中一一标注引用的繁复,下面集中列出与本书有关的学位论文。

张健松. 无线传感器网络中目标跟踪问题的理论和实验研究. 2006.

白红星. 大规模无线传感器网络非完全覆盖问题研究. 2008.

王星石. 无线传感器网络梯度网络组织结构的路由协议的研究. 2010.

李杰. 无线传感器网络节能覆盖理论分析和算法研究. 2011.

葛均峰. 无线传感器网络中基于能量强度的声源多目标定位. 2012.

聂春凯. 无线传感器网络覆盖问题的随机模型研究. 2013.

感谢刘颖老师为本书所做的技术编辑工作。

感谢国家自然科学基金、美国联合技术研究中心 (UTRC)、清华大学骨干人才资助计划、清华-UTC 建筑节能、安全与控制研究中心所提供的财政支持。感谢清华大学一流大学推进计划研究生教育教学改革项目,本书的出版得到该项目的资助。

限于作者水平,书中错误在所难免。敬请读者批评指正。

陈 曦

2017 年 9 月于北京清华园

# 目 录

|       |                   |    |
|-------|-------------------|----|
| 第 1 章 | 绪论                | 1  |
| 1.1   | 无线传感器网络概述         | 1  |
| 1.2   | 无线传感器网络的研究内容      | 3  |
| 1.3   | 无线传感器网络的应用        | 6  |
| 1.4   | 本书的内容与结构          | 8  |
| 第 2 章 | 无线传感器网络覆盖问题       | 9  |
| 2.1   | 覆盖问题的几个要素         | 9  |
| 2.1.1 | 节点的感知模型           | 9  |
| 2.1.2 | 覆盖类型              | 10 |
| 2.1.3 | 节点的部署方式           | 10 |
| 2.1.4 | 节点的调度方式           | 11 |
| 2.2   | 覆盖问题的研究现状         | 12 |
| 2.2.1 | 基于节点位置信息的覆盖配置     | 13 |
| 2.2.2 | 基于节点工作概率的覆盖配置     | 15 |
| 2.2.3 | 基于局部环境信息的覆盖配置     | 16 |
| 2.2.4 | 动态目标探测和异构网络       | 16 |
| 2.3   | 覆盖问题的难点           | 17 |
| 第 3 章 | 随机部署网络覆盖性能        | 18 |
| 3.1   | 同构网络的点覆盖          | 18 |
| 3.1.1 | 点覆盖的概率            | 19 |
| 3.1.2 | 完全覆盖与点覆盖的比较       | 20 |
| 3.1.3 | 节点以一定概率工作下的点覆盖的概率 | 20 |
| 3.1.4 | 边界效应的分析           | 22 |
| 3.2   | 异构网络的点覆盖          | 25 |
| 3.2.1 | 点覆盖的概率            | 25 |
| 3.2.2 | 性能与成本的优化          | 26 |
| 3.3   | 仿真实验              | 29 |
| 3.3.1 | 同构网络的仿真实验         | 29 |
| 3.3.2 | 异构网络的仿真实验         | 31 |

|       |                      |    |
|-------|----------------------|----|
| 3.4   | 总结 .....             | 33 |
| 第 4 章 | 比例覆盖配置 .....         | 34 |
| 4.1   | 基于定位的比例覆盖配置 .....    | 34 |
| 4.1.1 | 责任区域的概念及性质 .....     | 35 |
| 4.1.2 | 比例覆盖配置协议 .....       | 38 |
| 4.1.3 | 仿真实验 .....           | 39 |
| 4.2   | 免定位的比例覆盖配置 .....     | 42 |
| 4.2.1 | 责任区域 .....           | 42 |
| 4.2.2 | 站岗协议 .....           | 44 |
| 4.2.3 | 仿真实验 .....           | 46 |
| 4.3   | 总结 .....             | 49 |
| 第 5 章 | 动态目标的探测 .....        | 50 |
| 5.1   | 节点状态切换机制 .....       | 50 |
| 5.2   | 动态目标探测的性能分析 .....    | 51 |
| 5.2.1 | 单个传感器的探测概率 .....     | 51 |
| 5.2.2 | 给定路径下的目标探测概率 .....   | 54 |
| 5.2.3 | 探测到目标的传感器节点的个数 ..... | 56 |
| 5.3   | 应用实例 .....           | 57 |
| 5.3.1 | 森林火灾监测系统设计 .....     | 57 |
| 5.3.2 | 边境监测系统设计与优化 .....    | 58 |
| 5.4   | 总结 .....             | 61 |
| 第 6 章 | 传感器网络的随机调度算法 .....   | 63 |
| 6.1   | 网络模型描述 .....         | 63 |
| 6.2   | 随机调度机制 .....         | 64 |
| 6.2.1 | 能耗分析 .....           | 64 |
| 6.2.2 | 工作概率的动态调节 .....      | 66 |
| 6.2.3 | 时间同步与网络连通性 .....     | 68 |
| 6.2.4 | 调度算法性能测试 .....       | 68 |
| 6.3   | 节点故障模型下的调度机制 .....   | 72 |
| 6.3.1 | 节点发生故障的模型 .....      | 72 |
| 6.3.2 | 考虑节点故障的调度算法 .....    | 73 |
| 6.4   | 网络性能的改进 .....        | 75 |
| 6.4.1 | 动态工作概率的修正 .....      | 75 |
| 6.4.2 | 周期长度的选取 .....        | 76 |
| 6.4.3 | 仿真实验 .....           | 77 |
| 6.5   | 总结 .....             | 78 |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 第 7 章 | 概率转发路由协议 .....              | 79  |
| 7.1   | 路由协议 .....                  | 79  |
| 7.1.1 | 常见网络拓扑结构 .....              | 80  |
| 7.1.2 | 路由协议的研究现状 .....             | 82  |
| 7.2   | 概率转发模型 .....                | 83  |
| 7.2.1 | 概率转发协议描述 .....              | 84  |
| 7.2.2 | 转发概率分析 .....                | 84  |
| 7.3   | 仿真软件 ns2 与 ProFor 的仿真 ..... | 87  |
| 7.3.1 | 仿真软件 ns2.....               | 87  |
| 7.3.2 | ProFor 的仿真 .....            | 89  |
| 7.4   | ProFor 的仿真结果及其分析 .....      | 93  |
| 7.4.1 | 概率转发的仿真过程 .....             | 93  |
| 7.4.2 | 单次转发 .....                  | 94  |
| 7.4.3 | 概率转发的仿真结果 .....             | 94  |
| 7.5   | 总结 .....                    | 97  |
| 第 8 章 | 概率转发协议的扩展 .....             | 98  |
| 8.1   | 考虑丢包率的概率转发协议 .....          | 98  |
| 8.1.1 | 转发概率分析 .....                | 99  |
| 8.1.2 | 仿真结果分析 .....                | 100 |
| 8.1.3 | 误码率对数据传输成功率的影响 .....        | 105 |
| 8.2   | 数据包合并转发机制 .....             | 105 |
| 8.2.1 | 合并转发机制分析 .....              | 106 |
| 8.2.2 | 数据包合并的仿真 .....              | 108 |
| 8.3   | 概率转发协议的节点能耗 .....           | 109 |
| 8.3.1 | 同源节点转发的分析 .....             | 109 |
| 8.3.2 | 转发次数的仿真统计与分析 .....          | 110 |
| 8.3.3 | 关于节点转发次数的总结 .....           | 113 |
| 8.4   | 节点状态切换与多基站 .....            | 113 |
| 8.4.1 | 节点状态切换机制 .....              | 113 |
| 8.4.2 | 关于基站的讨论 .....               | 114 |
| 8.5   | 总结 .....                    | 115 |
| 第 9 章 | 基于能量强度的多目标声源定位 .....        | 116 |
| 9.1   | 目标定位与跟踪的研究现状 .....          | 117 |
| 9.2   | 目标个数已知的多目标定位 .....          | 119 |
| 9.2.1 | 声音能量强度测量模型 .....            | 120 |
| 9.2.2 | 基于最大似然估计的多目标定位 .....        | 121 |
| 9.2.3 | 基于目标初始化的多目标定位算法 .....       | 123 |

|        |                         |     |
|--------|-------------------------|-----|
| 9.2.4  | 多目标定位算法的仿真与分析 .....     | 126 |
| 9.3    | 目标个数的估计问题 .....         | 128 |
| 9.3.1  | 基于聚类目标个数的估计 .....       | 129 |
| 9.3.2  | 基于模型最小描述长度的目标个数估计 ..... | 135 |
| 9.3.3  | 目标个数估计的仿真与分析 .....      | 137 |
| 9.4    | 总结 .....                | 139 |
| 第 10 章 | 实验研究: 目标定位方法 .....      | 140 |
| 10.1   | MICA 系统 .....           | 140 |
| 10.1.1 | MICA 的硬件系统 .....        | 140 |
| 10.1.2 | TinyOS 软件系统 .....       | 142 |
| 10.1.3 | 网络和基站的接口实现 .....        | 143 |
| 10.2   | 常用的目标定位方法 .....         | 143 |
| 10.2.1 | 基于测距的目标定位方法 .....       | 143 |
| 10.2.2 | 免测距的目标定位方法 .....        | 144 |
| 10.3   | 三种测距方法的实验结果 .....       | 145 |
| 10.3.1 | 利用电磁波信号强度测距 .....       | 145 |
| 10.3.2 | 利用声音信号强度测距 .....        | 146 |
| 10.3.3 | 利用声音信号的传播时间测距 .....     | 147 |
| 10.4   | 不同定位方法的实验结果 .....       | 148 |
| 10.4.1 | 基于测距的定位方法 .....         | 148 |
| 10.4.2 | 免测距的定位方法 .....          | 149 |
| 10.5   | 总结 .....                | 150 |
| 参考文献   | .....                   | 151 |

# 第 1 章 绪 论

无线传感器网络的研究综合了传感器技术、嵌入式计算技术、无线通信技术、计算机网络技术、信息融合技术等现代先进技术,是当前国内外前沿研究的热点领域之一。2003 年 2 月,美国《技术评论》杂志<sup>[1]</sup>评选出的对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术中,无线传感器网络名列第一。

## 1.1 无线传感器网络概述

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 是由大量低成本、低功耗、具备信息收集、处理和传输功能的传感器节点组成,节点在通过随机播散或人工安置于目标区域后,以自组织方式构建成传感器网络,其目的是要监测和感知周围环境和目标状态的变化,并通过特定的路由协议将获取的信息传送给信息接收中心<sup>[2,5]</sup>。

典型的无线传感器网络包括传感器节点、汇聚节点 (或称为基站)、用户端<sup>[3]</sup>,见图 1.1。汇聚节点一般是无线传感器网络中一个或几个运算能力较强且通信距离较远的节点。网络运行以后,节点将在现场采集到的信息进行初步处理,然后通过多跳中继的方式将信息传送给汇聚节点,最后经过互联网、卫星或移动接入点 (如无人机) 等途径传送到用户终端;用户通过分析处理这些信息以达到其监测的目的。另外,用户还可以通过终端发送指令对网络进行配置和管理,例如分配监控任务或者发送查询请求等。

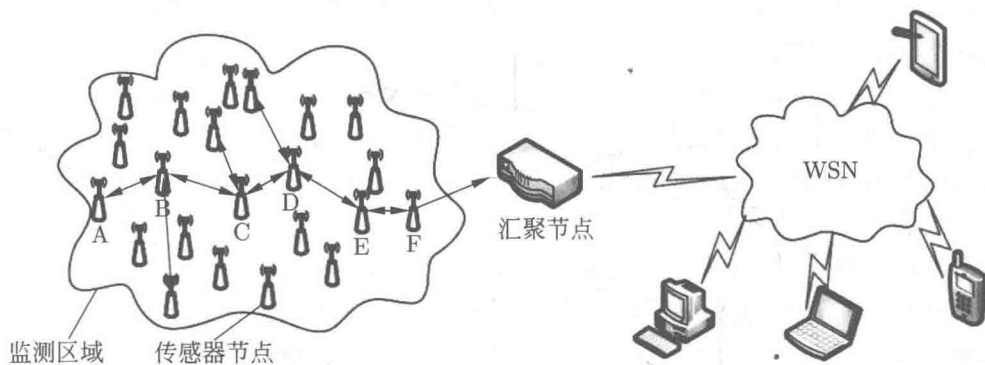


图 1.1 无线传感器网络系统架构

无线传感器网络节点一般由感知模块、信息处理模块、通信模块以及电源模块四部分组成<sup>[4]</sup>。感知模块包括各种类型不同的传感器,节点通过这些传感器对监测区域进行

主动或被动探测。此外,根据监控任务的不同,节点还可能包含定位模块、自充电模块、移动模块等,如图 1.2 所示。

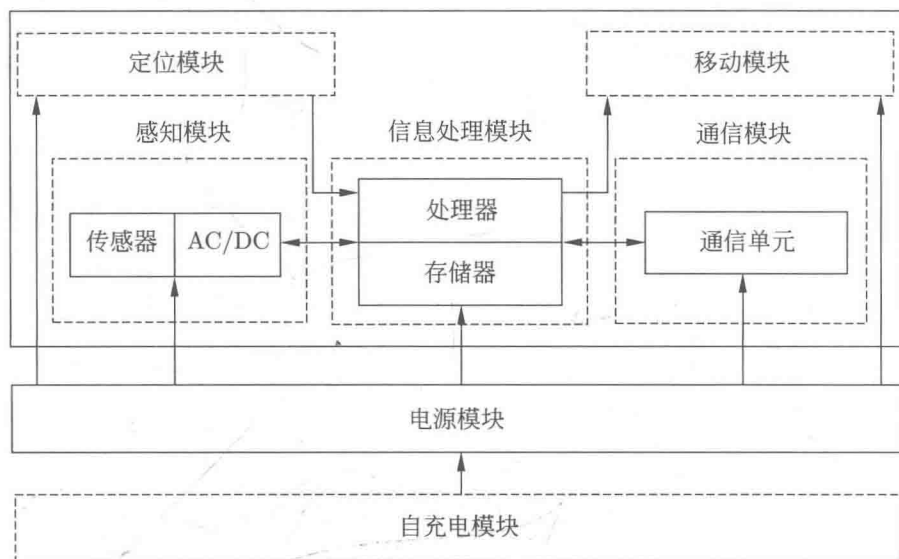


图 1.2 无线传感器节点的组成

传感器的作用是采集某种物理信号,如热、磁、声、光等,进而通过信息处理、信息融合手段对环境进行监测或跟踪。因此,传感器的传感功能是无线传感器网络应用功能得以实现的基础,也是无线传感器网络区别于其他网络的一个重要特征。无线传感器网络是为某个特定的需要而设计的一种基于应用的网络。相比于传统的无线网络,如移动通信网、无线局域网、蓝牙网络等,它具有以下的特点:

(1) 硬件资源有限。由于受到成本、体积和功耗等方面的限制,传感器节点的计算能力和存储能力十分有限,网络中的节点之间必须进行协作的分布式信息处理。同时,由于无线传感器节点通常采用电池供电,传感器网络的实际应用需要合理的能源分配算法。另外,节点的通信能力有限,节点的通信功耗与通信距离的  $n(n \geq 2)$  次方成正比,这就使得网络需要采用多跳路由的方式进行通信。

(2) 网络规模较大。由于单个节点传感和通信能力的限制,实际应用中通常会包含大量的传感器节点,以确保网络对目标区域的监测性能满足要求。网络规模越大,对目标区域的监测性能越好,但网络的开销也增大,网络的利用率会降低。因此需要平衡网络性能与效率。

(3) 网络自组织。一般来讲,无线传感器网络中没有严格的控制中心,不同节点在网络中所处的地位平等,可以随时加入或离开网络,单个节点的故障不会对网络整体产生致命的影响。节点通过分层协议和分布式算法协调各自的行为,节点部署后可以快速、自动的组成一个独立的网络。

(4) 动态拓扑属性。由于网络中节点的能量有限,一些节点可能因能量耗尽而失效;一些节点可能会受到目标区域内环境因素的影响而离开网络;一些节点也可能由于网络需求而被添加到网络中。这些情况都会使网络的拓扑结构发生变化。

## 1.2 无线传感器网络的研究内容

无线传感器网络作为多学科交叉的产物,已成为新兴信息领域的重要研究课题之一。对于无线传感器网络的研究主要集中在节点和网络两个层面。在传感器节点的软硬件研究中,硬件包括嵌入式处理器、通信器件和传感元件的研究;软件方面主要是适合嵌入式应用的操作系统和开发语言。无论是软件还是硬件,首要目标都是在满足处理、存储、通信、传感的基础上优化系统的能耗。

对传感器节点层面的研究主要包括以下几个方面:

### (1) 传感技术

对网络性能的不同需求导致传感器节点需要具备采集温度、湿度、风力、光强、气体浓度、电磁场强、压力等一种或多种信号的能力,设计实现多功能微型化的传感器是研究的重点。

### (2) 低能耗节点

由于成本和体积等因素的限制,传统的传感器节点主要由电池供电,也不具有再充电的特性,因此,为了延长节点工作时间和网络寿命,研究和实现低功耗的传感器节点十分必要。

### (3) 低成本节点

无线传感器网络包括大量的传感器节点,节点的成本在一定程度上决定网络的可行性,在保证节点性能的同时降低节点成本还需要很多努力。

### (4) 无线通信技术

传感器节点要求通信技术简单易行、成本低、鲁棒性好,因此,载波和天线技术、数据调制解调技术是传感器节点研究中的主要问题。

从原型系统到商业应用,传感器节点的研究已颇具规模。较早的比较典型的是由加州大学伯克利分校 (University of California, Berkeley) 和 Crossbow 公司研制的无线传感器系统 Mica, Mica2, Mica2Dot, MicaZ, 它们已被广泛地用于低功耗无线传感器网络的研究和开发。

从网络层面来考虑,传感器网络的研究主要包括:

### (1) 通信协议

通信协议泛指节点与节点之间、节点与基站之间的通信协议。根据传统计算机网络的模型,网络可以从下到上分为物理层、数据链路层、网络层、传输层、会话层、表示层、应用层共七层。其中传输层、会话层、表示层和应用层协议旨在支持网络中各类应用产生的不同类型的数据流。而网络层解决路由选择以及异构网络的连通问题,异构网络连通问题和不同应用产生的多种数据流问题在无线传感器网络的研究中很少见。因此,无线传感器网络的通信协议通常只讨论物理层、数据链路层和网络层的路由协议问题。

#### ① 物理层

物理层研究数据在传输介质中的传输问题。相比于有线传输介质,无线信道极容易受到周围环境的影响。信号衰减、多径效应等问题是无线通信中的常见问题。因此,数据

传输的可靠性是无线传感器网络物理层协议的主要研究问题,该层的设计也直接关系到电路的复杂度和各个单元的能耗。

## ② 数据链路层

数据链路层负责差错控制和流量控制。传统网络中的纠错编码、校验码等差错控制技术都可以应用到无线传感器网络的设计中。流量控制则是针对数据处理能力不对等的节点之间的链路进行传输速率的控制。

介质访问 (medium access control, MAC) 层是数据链路层的一个子层,主要研究如何向各个传感器节点分配有限的信道资源。如果相邻的节点同时发送数据,会对各自的数据传输造成干扰,因此同一时刻只允许一个节点占用共享信道。MAC 协议研究如何使各个节点在互不干扰的情况下,公平地享有访问介质的机会。

根据减少数据碰撞和串音现象所采用的方法,可将 MAC 协议分为三类: (i) 基于随机竞争的 MAC 协议<sup>[6,7]</sup>,网络中节点随机使用信道而不受其他节点约束; (ii) 基于时分复用 (TDMA) 技术的 MAC 协议<sup>[8,9]</sup>,以时分复用方式为各节点分配独立信道; (iii) 以及基于频分复用 (FDMA) 或码分多址复用技术 (CDMA) 的 MAC 协议<sup>[10]</sup>,以 FDMA 或 CDMA 方式实现无冲突的强制信号分配。

## ③ 路由协议

路由协议的研究借鉴了许多无线 Ad Hoc 网络的理论与方法,并有所发展。特别是考虑了对能耗的需求,以及传感器网络一对多 (广播) 或多对一 (汇集) 的通信模式,发展出为延长网络寿命的节能路由算法。无线传感器网络中单个节点的通信能力有限,大部分节点无法直接和基站通信,节点采集的数据需要中继节点的多次转发才能到达基站。研究表明,节点总能耗以通信能耗为主<sup>[11,12]</sup>。路由协议对网络的通信量有显著的影响。合理有效的路由协议需要保证节点能耗与网络性能的平衡,并最大限度地延长网络寿命。当前关于路由协议的研究可以分为基于位置信息的路由协议<sup>[13]</sup>、以数据为中心的路由协议<sup>[14]</sup>、基于聚簇的路由协议<sup>[15,16]</sup>、基于能量的路由协议<sup>[17,18]</sup>等。

传感器节点对能量的要求更为苛刻,不但节点初始能量少并且常常难于补充。在设计传感器网络协议时,不仅要针对单个节点设计其自身的节能工作模式,还要利用节点多的优势,设计多个节点协作节能的工作模式。

## (2) 网络拓扑控制

拓扑控制和管理的研究一般借鉴无线移动 Ad Hoc 网络的理论与方法,并有所发展,特别是根据信息获取的需要提出了在保证连通性条件下的传感覆盖问题。研究表明,传感半径与通信半径必须满足一定关系才能保证对检测信息的捕获要求。由于采用多跳通信模式,它远比相应蜂窝通信复杂。根据节能的需要,大量节点经常处于睡眠状态,加上恶劣工作条件下节点的损坏或能量的耗尽,传感器网络的拓扑经常处于变动之中,因而需要设计节点唤醒机制。为节省能量,典型的做法是利用聚类的思想,在邻域内选取头节点负责整个邻域内节点与外界的通信。另一方面,因为无线传感器网络通常规模十分巨大,考虑到通信能耗和扩展性,分布式覆盖拓扑管理的研究更有实用价值。自 2003 年始,有学者开始同时考虑能耗和扩展性这两个约束对拓扑管理的影响。已经证明在凸形监测区域上,当通信半径大于或等于感知半径的 2 倍时,如果监测区域被完全覆盖,那么网络就是连通的。

### (3) 节点定位技术

节点定位技术<sup>[19,20]</sup>是传感器网络中关键研究领域之一. 在传感器网络的实际应用中, 事件发生或数据采集的绝对或相对位置至关重要, 例如森林火灾监测、水质监测等都离不开精确的位置信息, 没有位置信息的数据几乎没有意义. 根据网络模型和应用场景的差异, 人们提出了各种不同类型的定位算法, 这些算法模型的区别主要体现在: 信号的传输模型、锚节点和普通节点的密度、设备的移动性、特殊的硬件能力等.

### (4) 网络时间同步

和位置信息相同, 时间信息也是对事件进行完整描述所必备的要素之一. 目标跟踪、节点调度等都需要精确时间信息的支撑. 但是, 几乎所有的传感器节点都存在时钟漂移和扭曲的问题, 处理器将不会以完全相同的速度运行, 节点间的时钟差异随着时间的推移而越来越大, 导致从网络获得的数据没有正确的时间戳<sup>[21,22]</sup>. 传统的 GPS 技术虽然能够保证很好的时间同步, 但是 GPS 技术的成本高、能耗大, 并不适用于无线传感器网络. 网络时间同步机制的设计, 必须保证定位精度高、节点能效高以及网络鲁棒性强等.

### (5) 网络安全技术

作为任务型网络, 无线传感器网络不仅要保证采集、传输数据的及时性, 同时还要保证数据的机密性和可靠性. 由于节点大多部署在开放环境中, 传感器网络很容易遭受外部恶意攻击, 因此, 检测并阻止来自外部或自身网络中的恶意攻击, 在一定程度上决定了整个网络能否正常运行. 目前关于网络安全的研究主要集中在密钥管理<sup>[23]</sup>、安全路由<sup>[24]</sup>、DoS(Deny of Service) 攻击<sup>[25,26]</sup>、入侵检测与识别<sup>[27,28]</sup>等方面. 目前国内外有相当多的科研人员在传感器网络安全方面开展工作, 主要是对现有信息安全成果的移植. 最具代表性的是美国加州大学伯克利分校提出的安全通信架构 SPINS, 这种架构已经被用于智能微尘 (Smart Dust) 项目的网络实验, 以提供安全的通信平台. 但考虑到传感器节点资源极其有限, 比传统网络更容易受到攻击, 高性能的安全协议却难以移植, 因此需要通过充分利用传感器网络中信息获取过程的行为特点来提高安全性.

### (6) 网络数据查询

针对传感器网络数据管理的研究, 在数据存储与索引技术上表现出了以数据为中心的特点, 将关键字与感知数据关联, 并利用地理散列函数实现了以数据为中心的存储 (Data Centric Storage, DCS). 连同以数据为中心的数据提取 (Data Centric Communication Abstraction), 在扩展性方面已体现的优势. 在这些协议中节点的命名采用节点所处的地理位置信息, 因为这为管理大规模无线传感器网络提供了潜力. 但这些研究都是从链路层、网络层出发, 仅考虑了通信层面本身的问题, 并不涉及物理层的数据可靠性. 现有数据管理的研究在数据模型和查询语言方面借鉴了传统的关系模型, 并有所扩展 (如 TinyDB 和 COUGAR).

能量管理始终是传感器网络研究最主要的一个方面, 由于电池驱动节点能量得不到补充, 因而必须在各个层次上考虑能量的约束, 传感器网络的能量管理往往将检测、计算、通信的能耗综合在一起考虑, 能量管理渗透在网络系统的各个层面, 其复杂性大大增加.

自组织方式在无线传感器网络中有重要作用, 目前大多数研究都集中在网络的拓扑

控制和管理、路由选择协议、聚类算法、节点协同跟踪、自组织定位和查询、无线信道 MAC 协议等方面。

### 1.3 无线传感器网络的应用

传感器网络作为一种成本低、功能强、简单实用的网络系统,具有十分广阔的应用前景。由于传感器网络不受时间、地点、环境等方面的约束,它可以在任意时间、地点,甚至任意环境中为用户获取所需的信息。无线传感器网络在军事、环境监测、工业自动化、医疗、交通等领域都有广泛的应用。

#### (1) 军事应用

传感器网络的研究最早起源于军事领域,在战场监测等领域的优越性十分明显,可以将传感器节点部署在需要监控的区域,通过对声音、磁通量等物理量的检测、分析和定位,实施战场监视。具体可用于监控车辆和人员,目标跟踪与分类<sup>[29,30]</sup>,从而获取部队部署、装备等信息。悬浮于空气中的“智能微尘”传感器网络,则有可能检测到对雷达“隐形”的飞行器。布置于海洋中的传感器网络,能够有效检测潜艇等航海器。广泛分布的传感器网络还可用于核能、生化等攻击的检测。另外,无线传感器网络也能为我方车辆和人员的定位提供独立于 GPS 之外的有效手段。通过飞机播撒等方式可以将大量节点密集地部署于人员不便到达的目标区域。无线传感器网络在军事上应用的优势在于网络由密集随机分布的低成本节点组成,具有较强的自组织性和容错能力,不会因为个别节点的损坏而导致整个系统的崩溃,而且易于快速部署,能适应恶劣的战场环境。这些优点进一步保证了网络能够提供有关战场的可靠信息,减少因信息缺乏或错误所造成的伤亡。

#### (2) 智能制造

在工厂自动化、工业系统监控和先进制造系统领域,传感、控制和管理系统的无线化是重要趋势。制造系统中的所有移动行走设备,可通过无线传感器网络进行定位、跟踪、监控和控制,完全改变目前的控制和监控系统工作模式。微型无线传感器可以大量嵌入制造设备或产品的关键部位,对制造装备和产品进行大规模的实时监控,及时诊断和预测故障的发生,大大提高设备的可靠性,降低事故率,如货运列车轴温探测系统<sup>[48]</sup>,系统能量监测<sup>[49]</sup>,天然气管道各项指标的测量<sup>[50]</sup>,等等。传感器网络可用于监测工业基础设施的完好状况,并通过数据融合来预测可能出现的问题,比传统方法方便准确。例如监测桥梁,传感器能放置在桥墩底部、桥梁两侧或底部,搜集桥梁的温度、湿度、震动幅度、桥墩被侵蚀程度等信息并做出提前预报。

#### (3) 灾难预警

灾难预警是无线传感器网络重要的应用之一,比如野外火灾的监测预警<sup>[31-33]</sup>。在森林中,通过飞机把大量传感器节点播撒到监测区域。这些传感器配有温度传感器,并且可以通过定位算法确定自己的位置。节点自组织形成网络,基站汇聚所有节点的数据形成所在监测区域的温度场,判断区域是否有火灾,并把火灾报警信息发送到消防队员配备的 PDA 上。类似的系统还可以应用在可能发生泄漏事故的化工厂等事故安全隐患

高的环境以及大型建筑突发灾难应急救援中<sup>[34]</sup>。在这类应用中,网络需要及时对突发的灾难事件进行预警,需要大量节点来覆盖监测区域,节点会因为灾难的发生而彻底损坏。这种情况对预警数据传输的可靠性要求很高。

#### (4) 环境监测与物种检测

环境监测是无线传感器网络的又一个非常重要的应用领域。由于环境监测范围广,监测难度大等问题,传统的数据采集和统计方法已经无法有效进行,利用无线传感器网络便于进行环境监测<sup>[35]</sup>,如湿地水环境远程实时监测<sup>[36]</sup>、雪情监测<sup>[37]</sup>、火山活动监测<sup>[38]</sup>以及温室温度监测<sup>[35]</sup>、森林防火监测、洪水监测,等等。无线传感器网络还可以帮助研究人员了解动物的生活习性,比如在动物身上佩戴传感器<sup>[40]</sup>,跟踪候鸟和昆虫的迁移,研究候鸟迁移对禽流感等鸟类传播疾病的影响。

#### (5) 智能建筑

大型建筑中的通风、照明和中央空调会耗费大量能源。通过无线传感器网络更高效地实时监控温度、气流、湿度等物理参数,可以在满足使用者需求的同时,提高环境的舒适度并减少能耗<sup>[41,42]</sup>。无线传感器网络还可以应用在地震带的建筑中,用来监测预报地震波的信息。

#### (6) 物流管理

在物流管理领域,需要为一些物资(比如小型集装箱)配备传感器,便于物资在运送或者仓储调度的时候进行定位<sup>[43]</sup>。在这类应用中,传感器节点为主动通信模式,即在有相应物体靠近的时候,节点主动启动进行通信。这种功能类似于射频标签(Radio Frequency Identifier, RFID)<sup>[44]</sup>,但无线传感器网络可以比RFID系统支持更加复杂的功能<sup>[45]</sup>。

#### (7) 医疗健康

无线传感器网络在医疗健康领域的应用可以改善现有的医疗和患者监护系统<sup>[46,47]</sup>,医生可以在住院患者或慢性病患者身上安装可监测各种生理信号的传感器节点,如心率仪、血压计、血氧计、体温以及血糖仪,等等,利用无线多跳式网络通信,医生或患者本人就可以随时了解病情及身体状况,以便及时处理。更重要的是,同传统有线或大型的检测设备相比,微型传感器可以用于长期监测,且不会给人的正常生活带来太多的不便。传感器网络为未来的远程医疗、医院药品管理、老年人智能家庭护理提供了更加方便快捷的解决方案。

#### (8) 智能交通

无线传感器网络可以用在交通监控上。具有嵌入网络能力的传感器节点广泛部署于重要路段及路口,检测和估计交通繁忙状况及车辆密度,还可以估计车辆速度。传感器与邻居节点相互交换各自监控到的信息,提供整个城市的交通状况全景,从而优化交通引导,减缓城市交通的拥塞程度。

#### (9) 其他应用

无线传感器网络还可用于空间探测、突发事件监测<sup>[51]</sup>等不同领域。在物联网的应用研究中,嵌在家电和家具中的传感器与执行机构组成的无线网络及Internet进行连通,将为人们提供更加舒适、便捷和人性化的智能家居和办公环境。

无线传感器网络为实际的工程应用提供了十分广阔的发展平台,成功的工程应用也将促进无线传感器网络在未来得到更好的发展.目前已经存在的应用,如环境监测、生理健康检测、工业监控和军事跟踪等,都具有十分鲜明的应用特点和专业需求.这些特点和需求与当前的工业发展趋势相结合开发出许多新的软、硬件平台.无线传感器网络在近几年来发展起来的物联网技术及应用中也发挥着重要的作用.

有关无线传感器网络的概述可以参见已出版的相关书籍(如文献[52,53]等).

## 1.4 本书的内容与结构

无线传感器网络对监测区域的传感覆盖是最重要的网络性能.第2章介绍影响网络覆盖性能各个因素以及针对覆盖问题的研究成果.接下来6章的内容针对节点随机部署的无线传感器网络,分别介绍有关的网络覆盖性能、节点调度协议以及通信协议的研究成果.具体而言,第3章分析随机部署的无线传感器网络的覆盖性能的基本特性.第4章在节点随机部署的条件下,分析并设计出一种对监测区域的覆盖能满足给定比例的节点轮换工作的协议.第5章研究传感器网络如何能以大概率捕捉到动态目标.第6章深入分析传感器节点的工作模式对覆盖性能及网络寿命的影响,设计节点的概率调度机制.第7章和第8章是关于节点随机部署的无线传感器网络的通信协议设计.第9章研究基于能量强度的多目标定位及目标个数的估计.最后介绍 Mica 传感器系统以及将 Mica 系统用于目标定位和跟踪的实验.

## 第2章 无线传感器网络覆盖问题

无线传感器网络通常会被部署在某个区域,用以监测此区域内的环境状态或可能出现的目标,这个区域被称为监测区域.所谓覆盖问题是指在节点部署完之后所形成的网络对监测区域的监测效果是否满足要求.例如,在一片森林中部署无线传感器网络以预防火灾,那么覆盖问题所关心的是这个网络能否及时感知到森林中可能发生的火灾的位置.网络覆盖性能是评价网络服务质量的重要标准.覆盖问题的核心是:在满足监测任务对覆盖性能的要求的前提下,通过功率控制、拓扑控制或节点休眠调度等方法降低网络能耗,延长网络寿命.

### 2.1 覆盖问题的几个要素

#### 2.1.1 节点的感知模型

单个传感器节点的感知区域指节点能够监测的区域;一个无线传感器网络的感知区域指网络内所有节点感知区域的并集.

传感器节点的感知模型用来描述节点的感知范围和监测能力.节点的感知模型有多种.如有基于曝光量 (exposure) 的覆盖概念<sup>[54-58]</sup>以及与此相近的使用信息覆盖 (information coverage) 的概念<sup>[59-61]</sup>,在这些定义中传感器可以检测到任意远处出现的信号,但信号强度随距离衰减.在无线传感器网络的研究中,主要采用布尔感知模型和概率感知模型.

布尔感知模型 (也称为 0-1 感知模型、二元感知模型或圆盘感知模型):在二维感知平面上,网络节点的感知范围是以节点位置为圆心,  $r$  为半径的圆,这里  $r$  为节点的感知半径,  $r$  的值由传感器节点的物理性能决定.每个节点只能感知和发现在其感知范围内的环境信息或发生的事件 (感知概率相同并且都为 1).对于感知范围以外的环境或事件,节点完全无法感知 (感知概率为 0).

类似地,在三维感知空间中,布尔感知模型的感知范围是以节点位置为球心,  $r$  为半径的球形区域.

概率感知模型:相比于布尔感知模型,概率感知模型则更接近于节点感知的实际情况.在实际应用中,节点的感知能力很容易受到外界环境因素的干扰,节点感知信号的强度也会随着距离的增大而衰减,而不是如布尔感知模型那样保持不变.传感器节点  $A$  能够感知到监测区域中任意一点  $m$  的概率,记为  $P_A(m)$ ,  $P_A(m)$  会随着两点之间距离