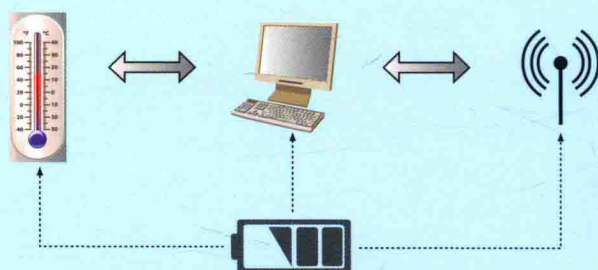


## 无线传感器网络 信息处理与组网设计

Information Processing and Networking  
Design for Wireless Sensor Networks

■ 秦丹阳 著





Information &  
ommunication

信息与通信创新学术专著

# 无线传感器网络 信息处理与组网设计

Information Processing and Networking  
Design for Wireless Sensor Networks

■ 秦丹阳 著

人 民 邮 电 出 版 社  
北 京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

无线传感器网络信息处理与组网设计 / 秦丹阳著

— 北京 : 人民邮电出版社, 2016. 10

(信息与通信创新学术专著)

ISBN 978-7-115-42398-6

I. ①无… II. ①秦… 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(2016)第197573号

## 内 容 提 要

本书主要关注无线传感器网络中面向广域部署的关键技术,从信息处理、组网技术以及泛在组网设计等角度论述广域传感器网络的设计方法与优化架构。重点讨论广域部署传感器网络的本质特点、分布式信号处理方法、无线传感器网络通信算法以及泛在环境的组网设计方式。本书所给出的传感器网络设计方法主要采用多学科多领域知识的融合,特别是分布式信号处理理论与技术、协同通信的最新研究进展以及普适计算的方式方法,本书将提供最新应用背景下典型理论和方法的应用思想以及设计方法;对于无线传感器网络的研究人员和学术参与者,本书将作为未来无线传感器网络面向特殊应用的重要分析工具以及材料补充;对于高年级本科生及相关研究方向的硕士、博士研究生,本书将对学术道路上未来的研究提供方向以及参考。

---

◆ 著 秦丹阳

责任编辑 代晓丽

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

固安县铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 700×1000 1/16

印张: 24

2016 年 10 月第 1 版

字数: 470 千字

2016 年 10 月河北第 1 次印刷

---

定价: 98.00 元

读者服务热线: (010) 81055488 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

# 前 言

现代无线传感器网络是由大量的低成本设备组成，这些设备通过低功率的无线通信方式彼此相连形成网络。无线传感器网络与传感器集合之间的本质区别就在于传感器通过合作、协同等方式形成的组网能力。传感器网络一直被认为是未来军事领域的关键组成部分。然而，随着近年来微电子技术、感知技术、模拟与数字信号处理技术、无线通信技术以及各种组网技术的快速发展，无线传感器网络技术自 21 世纪以来逐渐对人们的生产生活产生了巨大的影响，其应用领域涉及环境检测、自然灾害预警与救援、国土安全、医疗卫生、工业制造、城市交通、智能家居以及金融商业等方面。

无线传感器网络与互联网等普通的数据型网络最为本质的区别在于其特有的设计模式。通常来讲，传感器网络是面向特殊应用的，也就是为了某些特殊目的而部署展开。因此，这种网络的设计必须考虑其特定的应用背景。此外，还需要考虑无线传感器网络的广播媒介情况。对于电池供电的传感器，节能是最为重要的设计参数之一，因为在许多应用领域，更换电池非常困难或者根本无法实现。因此，传感器网络设计必须进行合理的优化以便于延长网络的生存期。能量与带宽受限以及潜在的大范围部署等问题为网络的有效资源分配及传感器管理带来了新的挑战。为此，许多研究都不约而同地采用了跨层设计的方法来应对由此产生的一系列问题。另外，研究中还有必要对协议栈进行重新的设计和调整，用以克服组网设计所带来的其他问题。

本书将关注无线传感器网络的理论方面，从信号处理与通信算法角度论述广域传感器网络的设计方法。重点讨论广域随机部署传感器网络的组网设计方式。

设计传感器网络往往需要多学科多领域知识的融合，特别是分布式信号处理理论与技术、协同通信的最新研究进展以及跨层设计的方式方法。

从内容划分角度看，本书可以分为 3 个部分：第一部分为无线传感器网络的基本性质与局限性；第二部分为传感器网络的信号处理技术；第三部分为通信、

组网以及泛在环境组网设计。

## 第一部分 基本性质与局限性

尽管链路级通信的理论研究取得了较为瞩目的成就，但是对于类似无线传感器网络这种大范围部署复杂网络的科学认知以及设计方法仍处于探索阶段。潜在应用和传感设备的多样性、无线通信媒介的动态性和不可靠性以及较为严格的资源受限特征等都将为大范围部署的异构传感器网络的结构及算法研究带来困难。

第一部分将主要介绍广域部署的传感器网络在基本性质与局限性方面研究的最新进展。研究表明，尽管在应用领域和通信环境方面存在较大的不同，但仍存在一些普适性法则和性能限制，因此往往需要采用系统方法来研究这类复杂的网络问题。本书将在第1~4章对此进行论述。

第1章将从通信角度出发，考虑传感器将所测量数据送往汇聚中心进行数据处理的速率和精确性问题。讨论功率受限条件下基于信源编码与信道编码相独立的数字通信体系架构对可达率失真的作用。最后给出示例说明这种独立设计方法可能引起的性能下降。

第2章将讨论传感器网络内的信息处理问题。这意味着传感器节点将不再将所测的数据送往汇聚中心进行数据处理，而是通过节点间的通信计算所有测得数据的某种函数，比如平均值或者最大值。本章将关注这种网络内部的计算速度能够达到多大，以及最大速度与网络规模间存在何种对应关系。事实上，这种对应关系不仅依赖于通信网络的拓扑结构，还与所采用的计算公式密切相关。

第3章将关注传感器测量数据量与网络能力的基本关系用以获得检测环境对象的状态，并重点讨论大量的前提假设条件所带来的检测问题。对于大范围的检测问题，我们能够得到传感器网络检测能力的下限，这一限制表述了为实现期望检测精度，传感器测量数量随前提假设数量变化的最小速率。对于通信信道来说，传感器网络的感知能力与信道编码理论之间的关系就类似于将通信信道大部分的可能结果移植到大范围部署的传感器网络设计领域中一样。

第4章将通过讨论传感器网络的生存期问题来说明其能量受限特性。考虑到传感器网络生存期依赖于网络结构、具体应用以及贯穿协议栈中的各个参数，因此，很难能够将网络生存期的精确特征用一些重要设计参数的函数来刻画。然而，研究表明网络中确实存在这样一种简单的规律，它几乎可以在任何网络配置（集中式、Ad hoc 分布式或者分级式）对于所有应用（事件驱动、时钟驱动或者问询驱动）来描述网络生存期。这一网络生存期的规律揭示了无线通信物理层的两个关键参数，即剩余能量和信道状态，事实上，这种规律同样适用于上层网络协议的设计。

以上4章内容给出了大规模复杂传感器网络重要原理及基本性质的科学认识方法,并立足于此揭示一些重要的研究方向。然而,这类研究中仍存在许多问题有待于深入研究。信源编码与信道编码何时进行独立设计才能充分实现最优的对应变化关系?如何能在信息论框架下构造时延与能量限制的合理模型?在能量与计算复杂度受限的条件下如何去权衡通信与计算?这只是我们在推动大范围部署无线传感器网络基本科学进程中需要面对的诸多挑战之一。

## 第二部分 传感器网络的信号处理

传感器的信号处理本质是指在单个传感器节点处进行分布式信息处理,然后通过对各个传感器所测得数据的融合来实现全局信号处理。

传统的分布式检测是20世纪90年代初期出现的一种非常重要的技术,当时,DSP和有线通信使得分布式雷达系统能够进行组网用以实现目标检测与跟踪。由于雷达会产生大量的数据,因此,将所有检测的数据都发送给中央处理单元是不切实际的。于是,这类研究便集中在如何在本地传感器节点处量化测得数据以及如何获得最优融合算法等方面。

然而,现代无线传感器网络中应用传统分布式检测技术仍存在一些技术问题。无线传输媒介的衰落与信道共享、干扰的存在以及能量与功率受限等固有特征使得我们需要改变传统的观念而采用新型的设计方法。第5章将介绍现代传感器网络的分布式检测方法。这一章将介绍同类研究中的一些重要成果,并阐明在量化、资源受限条件下的传感器融合以及最优检测性能之间的相互关系。考虑到问题的相似性,我们将采用渐进统计技术的方法来研究大规模传感器网络的相关问题。

当存在许多独立的假设条件导致无法建立针对潜在特性的数学模型时,多采用分布式估计来处理统计推断问题。通常来讲,传感器测量数据的产生可能来自于多种分布形态,因此,无法设计出能够保证一致性最优的传感器量化机制。第6章将主要研究当传感器测的数据需要量化或压缩时的分布式估计技术,并将着重研究点估计、贝叶斯估计以及性能界限等问题。

第7章将介绍传感器网络的分布式学习理论和技术。该章重点关注带宽与能量受限条件下的非参数通信推断问题。这一章将介绍一些典型的网络架构及学习技术,并给出一种分布式学习的体系框架从而传统理论概念建立对应关系。

第8章将介绍传感器的图模型和融合技术。传感器测得数据的统计相关性可以由图模型来表示。图模型有助于建立通信编、译码技术的研究视角。在无线传感器网络中采用统计推断时可以认为推断是基于经验分布的,而对这种分布的计算是传感器信息处理的核心。此外,该章还将介绍传感器自定位、跟踪以及数据关联等领域中的信息传输技术。而能量与带宽受限将再次成为关键的设计参数。

第二部分的 4 章主要讨论了传感器网络中有关信号处理的重要内容,包括检测、估计、学习以及融合。当然,还有许多重要的技术问题无法在书中穷举,有待于读者深入研究。比如,当传感器节点进行编码来适应衰落和噪声信道时,或者当这些节点必须对数据进行分组封装时,量化究竟起到什么作用?到底何种架构最适合传感器网络的分散化推断?如何建模并处理多跳时延和时间相关性?传感器网络的协同机制如何建立?能量与带宽严格受限条件下,以比特为单位(比如分组头或信息数量)或以焦耳为单位(比如信号处理、接收以及传输过程的能量消耗)的开销不能忽略不计。最后,渐近分析提供了一种新的研究角度和设计原则,在这种体系下还有许多与传感器网络相关的问题有待于进一步研究。

### 第三部分 通信、组网与泛在环境跨层设计

传统组网与通信协议为多种应用场合提供了网络技术的设计蓝本,并采用吞吐量、公平性、时延以及误码率等性能参数作为设计指标。这些方法适用于对等性的网络应用,比如远程通信网络或计算机数据网络等,在这类网络中,用户皆为平等的个体,其中信息的传输相互间几乎不相关。这种应用中最主要考虑的指标为服务质量。

相比于传统通信网络与数据网络,传感器网络是由大量传感器节点构成,这些节点部署在特定的区域用以协作的共同检测、感知区域内的目标对象。事实上,我们可以利用传感器网络的两个本质特性来提高通信有效性:传感器的协作特性和应用依赖性。第三部分包括 4 章内容,将主要在物理层传输、媒体接入控制策略、路由协议以及传输调度等的设计过程中研究静态及移动传感器网络的本质特性。

第 9 章将讨论协同通信机制,并介绍目前研究较多的随机方法,用于降低系统的复杂度并提高协同机制的带宽效率。协同方式可以应用于通信与组网等许多领域。在物理层,协同是通过用户共同传递信息并在信宿处采用信号合成技术来提高接收性能。分集与复用增益可以通过利用独立衰落路径由协同中继来获得。电池能量以及传感器节点共享信道带宽等本地资源将由整个网络系统来优化分配。这与传统网络有所不同,在传统网络中更关注公平性问题,而公平性将降低协同有效性。

考虑到以传感器网络为代表的无线多跳通信网络的泛在通信与性能优化需求,在通信与组网过程中往往以自适应与动态性为关键突破口,这就需要多层协作,即跨层设计。在后续研究中,将通过构建信息空间与物理空间的融合多重环境感知模型,来解决多跳通信网络单一环境因素感知的局限性与多跳通信路由机制的泛在环境适应性问题。

第 10 章将讨论传感器网络本地节点的状态更新问题。传统无线通信网络环境中节点所采用的固定感知周期进行邻域信息维护将引起较大的控制开销,从而严重影响环境参数的感知更新速率和普适路由更新的时效性能。为此,研究中将构建本地拓扑感知模型,动态调整链路连接度感知周期,使感知频率能够随节点运动及相对连接状态动态调整,在降低感知代价提高感知时效性的同时提高泛在环境下的数据传输效率。

第 11 章将研究泛在环境下的分布式数据均衡问题。针对无线多跳网络中常出现的数据量不均衡导致可能出现的网络分割以及传输效率下降的现象,将构建数据量感知模型并进行数学量化,建立分布式数据均衡及其自私性避免补充模型,从而以较低的复杂度实现具有公平性保障数据量感知映射并据此提出分布式数据量均衡路由算法。

第 12 章将研究泛在环境下的传输路径修复问题。无线环境最主要的泛在特征就是不确定性,所产生链路可靠性下降是多跳通信过程中无法避免的属性现象。为此,将基于功率检测构建链路质量感知模型,从最优搜索角度构建普适映射模块,实现链路质量到泛在路由模块间的映射,从而设计面向泛在环境的动态传输路径自愈算法,并给出快速收敛优化方案。

第三部分着重论述泛在通信与组网协议的重要性。这些理论的研究将为无线传感器网络的设计提供新的思路。在进行组网设计过程中还必须要注意尽量不破坏原有模块化设计的优势以及可能引起的系统高复杂度问题。此外,当对相邻两个模块的部分功能进行联合优化时,其余功能效用有可能会下降。这些问题在未来传感器系统的设计过程中必须要仔细考虑。

作 者

2016 年 3 月

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 传感器网络的信息论边界          | 1  |
| 1.1 引言                     | 1  |
| 1.2 传感器网络模型                | 2  |
| 1.3 数字结构                   | 5  |
| 1.3.1 分布式信源编码              | 6  |
| 1.3.2 分布式信道编码              | 13 |
| 1.3.3 数字结构的端到端性能           | 19 |
| 1.4 数字结构的代价                | 21 |
| 1.5 一般结构边界                 | 23 |
| 1.6 本章小结                   | 25 |
| 参考文献                       | 26 |
| 第 2 章 无线传感器网络的网内信息处理       | 29 |
| 2.1 引言                     | 29 |
| 2.2 通信复杂度模型                | 31 |
| 2.3 无线网络的计算: 空间复用与分组计算     | 33 |
| 2.3.1 无线通信网络的地理模型          | 34 |
| 2.3.2 分组计算与计算吞吐量           | 35 |
| 2.3.3 对称函数与形式向量            | 36 |
| 2.3.4 同位网络                 | 36 |
| 2.3.5 对称函数的子类: 形式感知与形式阈值   | 37 |
| 2.3.6 同位网络中的最大吞吐量          | 39 |
| 2.3.7 多跳随机平面网络             | 41 |
| 2.3.8 其他非周期网络              | 42 |
| 2.4 有噪无线通信网络: 同位广播网络中的可信计算 | 43 |
| 2.4.1 测量结果的奇偶性             | 44 |
| 2.4.2 阈值函数                 | 45 |
| 2.5 信息论模型                  | 46 |

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| 2.6 本章小结 .....                  | 48        |
| 参考文献 .....                      | 48        |
| <b>第3章 无线传感器网络的感知容量 .....</b>   | <b>51</b> |
| 3.1 引言 .....                    | 51        |
| 3.1.1 广域检测应用 .....              | 51        |
| 3.1.2 传感器网络编码器 .....            | 53        |
| 3.1.3 基于信息论的角度 .....            | 54        |
| 3.2 传感器网络的感知容量 .....            | 55        |
| 3.2.1 节点随机连接传感器网络模型 .....       | 55        |
| 3.2.2 随机编码与方法类型 .....           | 58        |
| 3.2.3 感知容量理论 .....              | 59        |
| 3.2.4 感知容量边界 .....              | 64        |
| 3.3 其他传感器网络模型的感知容量 .....        | 66        |
| 3.3.1 定位感知模型 .....              | 67        |
| 3.3.2 目标模型 .....                | 68        |
| 3.4 本章小结 .....                  | 69        |
| 参考文献 .....                      | 70        |
| <b>第4章 传感器网络生存期定律及其应用 .....</b> | <b>73</b> |
| 4.1 引言 .....                    | 73        |
| 4.2 传感器网络生存期定律及普适性设计原则 .....    | 74        |
| 4.2.1 网络特性与生存期定义 .....          | 74        |
| 4.2.2 生存期定律 .....               | 75        |
| 4.2.3 生存期最大化的通用设计原则 .....       | 75        |
| 4.3 随机最短路径框架 .....              | 76        |
| 4.3.1 问题说明 .....                | 77        |
| 4.3.2 SSP 的讨论 .....             | 78        |
| 4.3.3 网络生存期的基本性能极限 .....        | 80        |
| 4.3.4 网络极限性能的计算 .....           | 81        |
| 4.4 分布式渐进最优传输调度 .....           | 83        |
| 4.4.1 生存期最大化动态协议 .....          | 83        |
| 4.4.2 DTSP 的动态特性 .....          | 84        |
| 4.4.3 DTSP 的渐进最优性 .....         | 85        |
| 4.4.4 分布式实现 .....               | 86        |
| 4.4.5 仿真研究 .....                | 87        |
| 4.5 传感器网络生存期的分析 .....           | 92        |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 4.6 本章小结                   | 92         |
| 参考文献                       | 93         |
| <b>第5章 传感器网络中的信号检测</b>     | <b>95</b>  |
| 5.1 引言                     | 95         |
| 5.2 集中检测                   | 96         |
| 5.3 传统分布式检测框架              | 97         |
| 5.3.1 二元假设检验               | 97         |
| 5.3.2 渐进机制                 | 99         |
| 5.4 无线传感器网络中的分布式检测         | 100        |
| 5.4.1 传感器节点                | 101        |
| 5.4.2 网络架构                 | 101        |
| 5.4.3 数据处理                 | 102        |
| 5.5 无线传感器网络                | 102        |
| 5.5.1 容量约束条件下的检测           | 104        |
| 5.5.2 关于无线信道的讨论            | 105        |
| 5.5.3 相关性检测                | 109        |
| 5.5.4 衰减与衰落                | 110        |
| 5.6 范式分析                   | 112        |
| 5.6.1 相长干涉                 | 113        |
| 5.6.2 消息传递                 | 114        |
| 5.6.3 跨层思想                 | 114        |
| 5.6.4 节能机制                 | 115        |
| 5.7 扩展与普适化                 | 115        |
| 5.8 本章小结                   | 116        |
| 参考文献                       | 117        |
| <b>第6章 带宽能量受限条件下的分布式估计</b> | <b>121</b> |
| 6.1 引言                     | 121        |
| 6.2 分布式量化估计                | 122        |
| 6.3 最大似然估计                 | 122        |
| 6.3.1 噪声概率密度函数已知而方差未知      | 125        |
| 6.3.2 噪声概率密度布函数未知          | 129        |
| 6.3.3 均方误差的下界              | 133        |
| 6.4 向量参数的估计                | 133        |
| 6.5 最大后验概率估计               | 139        |
| 6.6 分布式估计的降维               | 141        |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 6.6.1 解耦分布式估计—压缩 .....               | 142        |
| 6.6.2 耦合分布式估计—压缩 .....               | 146        |
| 6.7 失真率分析 .....                      | 148        |
| 6.7.1 集中式估计的失真率 .....                | 150        |
| 6.7.2 分布式估计的失真率 .....                | 155        |
| 6.7.3 凸优化确定失真率上界 .....               | 158        |
| 6.8 本章小结 .....                       | 158        |
| 参考文献 .....                           | 159        |
| <b>第 7 章 无线传感器网络中的分布式学习 .....</b>    | <b>162</b> |
| 7.1 引言 .....                         | 162        |
| 7.2 典型学习理论 .....                     | 164        |
| 7.2.1 监督式学习模型 .....                  | 164        |
| 7.2.2 核函数方法及经验风险最小化原理 .....          | 165        |
| 7.2.3 其他学习算法 .....                   | 168        |
| 7.3 无线传感器网络中的分布式学习 .....             | 177        |
| 7.4 有融合中心无线传感器网络中的分布式学习 .....        | 181        |
| 7.4.1 分簇方法 .....                     | 181        |
| 7.4.2 分布式学习的统计极限 .....               | 181        |
| 7.5 有网内处理 Ad hoc 无线传感器网络的分布式学习 ..... | 184        |
| 7.5.1 基于稀疏度的分布式训练 .....              | 185        |
| 7.5.2 基于次梯度增量法的分布式训练 .....           | 186        |
| 7.5.3 基于交替投影法的分布式训练 .....            | 188        |
| 7.6 本章小结 .....                       | 190        |
| 参考文献 .....                           | 191        |
| <b>第 8 章 无线传感器网络中的图模型与融合 .....</b>   | <b>194</b> |
| 8.1 引言 .....                         | 194        |
| 8.2 图模型 .....                        | 195        |
| 8.2.1 定义与性质 .....                    | 195        |
| 8.2.2 和积算法 .....                     | 196        |
| 8.2.3 最大乘积算法 .....                   | 197        |
| 8.2.4 环路置信传播 .....                   | 198        |
| 8.2.5 非参数置信传播 .....                  | 198        |
| 8.3 无线传感器网络的图模型 .....                | 199        |
| 8.3.1 传感器网络中的自定位 .....               | 200        |
| 8.3.2 传感器网络多目标数据关联 .....             | 202        |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 8.4 消息检查与近似对融合的影响                | 204        |
| 8.4.1 消息检查                       | 204        |
| 8.4.2 基于粒子的消息传递精确度               | 205        |
| 8.5 消息近似的作用                      | 207        |
| 8.6 网络融合资源受限的优化分配                | 210        |
| 8.6.1 传感器网络目标追踪的资源管理             | 211        |
| 8.6.2 严格受限条件下的分布式推测              | 215        |
| 8.7 本章小结                         | 221        |
| 参考文献                             | 222        |
| <b>第 9 章 广域传感器网络的随机协同传输</b>      | <b>225</b> |
| 9.1 引言                           | 225        |
| 9.2 无线传感器网络的协同传输                 | 226        |
| 9.2.1 协同无线电物理层模型                 | 226        |
| 9.2.2 集中编码分配协同机制                 | 228        |
| 9.3 随机分布式协同机制                    | 229        |
| 9.4 随机协同编码的性能                    | 232        |
| 9.4.1 分集阶数特性                     | 232        |
| 9.4.2 性能仿真与数值分析                  | 235        |
| 9.5 基于随机协同编码的协同广域网络分析            | 237        |
| 9.6 理论分析与验证                      | 242        |
| 9.7 本章小结                         | 244        |
| 参考文献                             | 244        |
| <b>第 10 章 泛在多跳通信网络的邻域状态自适应更新</b> | <b>247</b> |
| 10.1 引言                          | 247        |
| 10.2 典型邻域状态感知算法研究                | 247        |
| 10.2.1 问题分析                      | 247        |
| 10.2.2 基于相邻节点覆盖的感知与更新            | 248        |
| 10.2.3 基于控制论的感知与更新               | 252        |
| 10.3 本地拓扑感知模型                    | 254        |
| 10.3.1 本地拓扑感知度                   | 254        |
| 10.3.2 邻域状态感知映射的公平性收敛            | 256        |
| 10.4 基于拓扑感知的邻域状态动态更新算法           | 269        |
| 10.4.1 邻域状态自适应感知                 | 269        |
| 10.4.2 超时值的自适应调整                 | 270        |
| 10.4.3 反应式感知分组的重调度               | 272        |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 10.5 仿真结果与性能分析 .....                 | 274 |
| 10.5.1 仿真模型的构建 .....                 | 274 |
| 10.5.2 仿真结果与性能分析 .....               | 275 |
| 10.6 本章小结 .....                      | 279 |
| 参考文献 .....                           | 279 |
| <br>第 11 章 分布式数据动态均衡 .....           | 282 |
| 11.1 引言 .....                        | 282 |
| 11.2 典型数据均衡算法研究 .....                | 283 |
| 11.2.1 动态负载感知路由算法 .....              | 283 |
| 11.2.2 负载均衡算法 .....                  | 285 |
| 11.3 数据负载感知模型 .....                  | 288 |
| 11.4 分布式数据动态均衡路由算法 .....             | 292 |
| 11.4.1 非饱和数据特征下的马尔可夫退避建模 .....       | 292 |
| 11.4.2 基于 Bloom 滤波的最优散列建模 .....      | 296 |
| 11.4.3 分布式数据动态均衡算法 .....             | 299 |
| 11.5 分布式均衡公平性辅助算法 .....              | 302 |
| 11.5.1 算法描述 .....                    | 302 |
| 11.5.2 自私节点的检测 .....                 | 306 |
| 11.5.3 复杂度分析 .....                   | 309 |
| 11.6 仿真结果与性能分析 .....                 | 311 |
| 11.6.1 仿真模型的构建 .....                 | 311 |
| 11.6.2 仿真结果与性能分析 .....               | 312 |
| 11.7 本章小结 .....                      | 317 |
| 参考文献 .....                           | 318 |
| <br>第 12 章 动态传输路径自愈技术 .....          | 321 |
| 12.1 引言 .....                        | 321 |
| 12.2 典型本地路径修复算法研究 .....              | 323 |
| 12.2.1 基于 CF 策略的路由修复算法 .....         | 323 |
| 12.2.2 基于 on-the-fly 策略的路由修复算法 ..... | 327 |
| 12.3 链路质量感知模型 .....                  | 330 |
| 12.3.1 链路质量检测区域 .....                | 331 |
| 12.3.2 功率检测与质量判断 .....               | 332 |
| 12.4 最优搜索数学建模 .....                  | 333 |
| 12.4.1 最优搜索理论 .....                  | 333 |
| 12.4.2 搜索问题的状态方程 .....               | 335 |



|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 12.4.3 状态方程的解.....    | 339 |
| 12.5 本地路由动态自愈算法.....  | 344 |
| 12.5.1 算法描述.....      | 344 |
| 12.5.2 修复后的优化.....    | 348 |
| 12.6 仿真结果与性能分析.....   | 350 |
| 12.6.1 仿真模型的构建.....   | 350 |
| 12.6.2 仿真结果与性能分析..... | 351 |
| 12.7 本章小结.....        | 356 |
| 参考文献.....             | 356 |

|           |     |
|-----------|-----|
| 名词索引..... | 360 |
|-----------|-----|

# 第 1 章

## 传感器网络的信息论边界

### 1.1 引言

传感器网络的应用受到通信与计算等方面的限制。这些限制可能来源于网络的规模或部署的代价，比如，许多传感器网络的应用都需要在较大范围内部署大量小型而廉价的传感器节点<sup>[1,2]</sup>，这使得在通信上需要花费的能量（以及设备尺寸）与计算量间存在一种相互作用，而且，目前还不清楚二者中究竟哪个才是真正的瓶颈。一些研究人员认为，在现代通信系统中计算消耗的能量在不超过传输能量时基本都相等<sup>[3-5]</sup>。另外，一些研究人员采用摩尔定律来解释计算瓶颈问题，并认为距离量子计算的临界线还有相当的距离<sup>[6-8]</sup>。

本章将根据摩尔定律的观点来讨论通信限制方面的问题，以便在基本层面上理解这些限制对传感器网络的影响。具体来讲，在研究过程中将忽略计算限制，并认为网络中所有设备所参与的任何计算都无需任何代价。这样可以获得通信限制的影响以及相对紧性能边界。而这也正是能够将信息论方法成功引入通信系统分析的关键所在。

本章内容可以看作已有技术的概述。为此，本章分成 4 个部分。第一部分讨论采用信息论分析的基本模型特征，传感器采用最优编码并将这些码字在噪声信道上传送而不引入额外误差。第二部分将讨论完成这些工作的数字结构的边界问题。第三部分论述采用数字结构时可能引入的代价。第四部分简要回顾通用结构（并非特指数字结构）下的信息论技术。

这一章主要讨论一般信息论界限，论述这些界限如何应用于线性高斯传感器网络这种特定的场景。这有助于研究结果更加具体：研究中的边界将采用矩阵结构来表述，而并非采用通用的信息量。

1.2 传感器网络模型

本章的主要目标是阐明通信资源对传感器的总体性能产生的影响。这里讨论的具体方法就是信息论，当然，它并不能适用于所有类型的传感器网络，而是多用于长期部署的面向实际对象的检测型传感器网络。

本章所研究的传感器网络模型如图 1-1 所示，采用  $L$  个变量来表示物理环境中存在的检测对象，它们可以看作是系统的自由度或是系统的当前状态。本章将采用离散时间的随机过程来对每一种自由度建模。尽管也会讨论传感器直接检测系统状态的情况，但是重点仍放在自由度无法被直接检测的应用场景。这里，每个传感器节点将测量所有变量的噪声组合。对于给定状态，采用条件概率分布来对检测过程建模。有时，传感器节点可以作为一些基础性网络的扩展，并从基站处获得一些反馈。基于这些内部通信以及反馈信号，每个传感器将生成一定的输出并在无线信道上传送。采用同样条件概率分布来对这种信道建模。基站将接收到信道上传送的输出信号。对于本章所讨论的信息论界限，假设中心数据采集单元与基站间均为理想链路连接（比如通过骨干网等）。数据采集器主要用于获取物理系统的基本自由度（或者状态）。

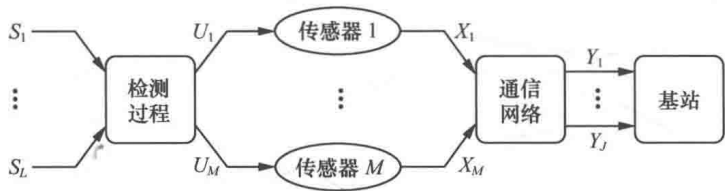


图 1-1 本章所研究的通用传感器网络模型

基本物理现象可以通过随机向量序列来表述。

$$\{\mathbf{S}[n]\}_{n \geq 0} = \{(\mathbf{S}_1[n], \mathbf{S}_2[n], \dots, \mathbf{S}_L[n])\}_{n \geq 0} \tag{1-1}$$

其中， $n$  为时间标度。本章将讨论  $\{\mathbf{S}[n]\}_{n \geq 0}$  为独立同分布随机向量序列。为了简化本章后续内容中的符号表达，这里将此序列做如下定义： $\mathbf{S}^N \triangleq \{\mathbf{S}[n]\}_{n=1}^N$ 。采用大写字母  $\mathbf{S}$  表示随机变量，小写字母  $s$  表示其真实值。 $P_{\mathbf{S}}(s)$  表示  $\mathbf{S}$  的分布。为了进一步简化表示符号，当下角标符号在形式上是括号中符号的大写字母时，则将下角标省略，如采用  $P(s)$  代替  $P_{\mathbf{S}}(s)$ 。随机向量  $\mathbf{S}[n]$  并不是由传感器节点直接检测的，传感器  $m$  检测序列  $U_m^N = \{U_m[n]\}_{n=1}^N$ ，该序列取决于条件概率分布下的物理现象，有