

信息科学与工程系列专著

传感器网络中的 盲源分离与信号重构

Blind Source Separation and Signal Reconstruction
in Sensor Networks

陈宏滨 冯久超 谢智刚 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

信息科学与工程系列专著

传感器网络中的盲源分离与信号重构

**Blind Source Separation and Signal Reconstruction
in Sensor Networks**

陈宏滨 冯久超 谢智刚 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统地阐释了传感器网络中盲源分离与信号重构的算法、性能评估及能效和生命周期优化。全书共 10 章, 内容包括: 传感器网络的系统架构、关键问题和发展趋势; 分布式估计的量化器和估计器的设计方法; 盲源分离的混叠模型和经典算法; 信号重构的模型和经典算法; 带宽受限的传感器网络中实现盲源提取的方案; 传感器网络的拓扑结构对其中盲源提取的性能和能效的影响; 多簇传感器网络执行盲源提取时的性能和能耗之间的折中; 多跳传感器网络执行盲源提取时的性能和生命周期之间的折中; 多跳传感器网络中分布式估计的性能和能耗; 在带宽受限的传感器网络中重构混沌信号的方法。

本书读者对象: 从事传感器网络研究和开发的科研人员, 高等院校通信、信息工程、物联网工程、传感网工程及相关专业的教师、研究生和高年级本科生。

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

传感器网络中的盲源分离与信号重构 / 陈宏滨, 冯久超, 谢智刚著. —北京: 电子工业出版社, 2012.11
(信息科学与工程系列专著)

ISBN 978-7-121-18770-4

I. ①传… II. ①陈… ②冯… ③谢… III. ①无线电通信—传感器—信号处理—研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 249260 号

责任编辑: 张来盛(zhangls@phei.com.cn)

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 787×1 092 1/16 印张: 9.25 字数: 208 千字

印 次: 2012 年 11 月第 1 次印刷

印 数: 2 500 册 定价: 39.00 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 zlts@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

信号分离和重构是近年来国际信号处理领域的研究热点。混沌信号的盲分离和重构在混沌通信和其他领域中都有潜在的应用价值,其他信号的分离和重构也广泛应用于通信系统干扰抑制、语音识别、图像恢复等领域。盲源分离的问题背景是一个传感器阵列中的多个传感器同时观测到多个源信号的混叠,从多个观测信号中同时分离所有源信号或者依次提取源信号。研究人员对语音和图像信号的分离研究得很多,而对混沌信号的分离很少关注。另外,现有的盲源分离方面的研究主要在传感器阵列平台上进行,传感器的原始观测信号可以被直接利用。已有的混沌信号重构方面的研究大多针对点对点的信号模型,没有考虑传感器网络中的混沌信号重构。

传感器网络部署方便、价格低廉,有望应用于智能家居、交通预报、水下和化学放射等危险区域探测、战场监视等场合。它是新兴的面向应用的分布式计算平台,能够完成信号检测和估计等任务。在这个新的平台上,盲源分离和信号重构问题的研究还很少有人涉及。这两个问题都属于分布式估计的范畴。由于传感器的通信带宽受限,需要将观测信号先进行量化,再进行传输。观测噪声、量化噪声和无线通信引起的误码都会导致观测信号失真。另外,传感器网络中的资源约束和网络复杂性使得传感器网络中分布式估计问题的研究充满了挑战性。传感器节点自带能量有限,部署以后很难回收。传感器节点的计算能力和存储空间也有限。传感器网络一般部署在恶劣的自然环境中,传感器节点和数据链接都很容易出故障。这些因素都要求我们设计简单的分布式估计方案,在能量约束下尽可能获得好的估计性能。目前,传感器网络中的分布式估计问题研究涉及单个参数估计、一个或者多个信号估计,但是很少考虑盲源分离和混沌信号重构。

著者根据目前的技术发展和近年来所取得的一些研究成果,编写了这本专门介绍传感器网络中的盲源分离与信号重构技术的书籍。

本书分为 10 章,具体内容编排如下:

- 第 1 章介绍传感器网络的系统架构、关键问题和发展趋势;
- 第 2 章介绍分布式估计的量化器和估计器设计方法;
- 第 3 章介绍盲源分离的混叠模型和经典算法;
- 第 4 章介绍信号重构的模型和经典算法;
- 第 5 章详细地讲述带宽受限的传感器网络中实现盲源提取的方案;
- 第 6 章介绍传感器网络的拓扑结构对其中盲源提取的性能和能效的影响;
- 第 7 章讨论多簇传感器网络执行盲源提取时的性能和能耗之间的折中;
- 第 8 章讨论多跳传感器网络执行盲源提取时的性能和生命周期之间的折中;
- 第 9 章介绍多跳传感器网络中分布式估计的性能和能耗;
- 第 10 章介绍一种在带宽受限的传感器网络中重构混沌信号的方法。

本书研究内容受到国家自然科学基金项目（编号 60572025、60872123、61162008）、国家自然科学基金-广东省自然科学基金联合基金项目（编号 U0835001）、香港理工大学基金（编号 1-BBZA, G-YF51）、广西教育厅重大项目（编号 201101ZD006）以及华南理工大学研究生重点课程建设基金（编号 yjzk2011001）的资助，在此特别表示感谢。在本书的编写过程中，参阅了大量中英文参考文献，在此对原作者表示感谢。

由于传感器网络中的分布式估计技术、盲源分离技术和信号重构技术正在不断发展，再加上著者学识有限，书中错误在所难免，敬请广大读者批评指正。欢迎读者来信讨论其中的技术问题，联系方式：chbscut@guet.edu.cn。

著 者
2012 年 9 月

目 录

第 1 章 传感器网络	1
1.1 引言	1
1.2 系统架构	2
1.2.1 有簇和无簇的传感器网络	2
1.2.2 单跳和多跳的传感器网络	3
1.3 关键技术	3
1.3.1 分簇	4
1.3.2 节点休眠调度	5
1.3.3 媒质接入控制协议	6
1.3.4 路由协议	6
1.3.5 同步	7
1.3.6 分布式信号处理	7
1.4 发展趋势	7
1.4.1 物联网	7
1.4.2 能量获取传感器网络	8
1.4.3 传感器网络无线充电	9
1.5 本章小结	9
参考文献	9
第 2 章 分布式估计	12
2.1 引言	12
2.2 普适分布式估计器	15
2.3 最大似然分布式估计器	17
2.4 分布式估计的性能和能耗	18
2.5 本章小结	28
参考文献	28
第 3 章 盲源分离	32
3.1 引言	32
3.2 混叠模型	32
3.3 经典算法	33
3.4 本章小结	37
参考文献	37

第4章 信号重构	41
4.1 引言	41
4.2 系统模型	41
4.3 经典算法	42
4.4 本章小结	53
参考文献	53
第5章 带宽受限传感器网络中的盲源提取	55
5.1 引言	55
5.2 传感器阵列中的盲源提取	56
5.2.1 混叠模型	56
5.2.2 盲源提取算法	57
5.3 均匀传感器网络中的盲源提取	57
5.3.1 盲源提取方案	58
5.3.2 盲源提取算法	58
5.3.3 仿真结果	60
5.4 非均匀传感器网络中的盲源提取	64
5.4.1 传感器的观测信号重构	65
5.4.2 传感器选择方案	66
5.4.3 仿真结果	66
5.5 本章小结	68
参考文献	68
第6章 拓扑结构对传感器网络中盲源提取的性能和能效的影响	70
6.1 引言	70
6.2 针对无噪混叠的基准盲源提取	70
6.3 有簇的传感器网络中的盲源提取	71
6.4 带融合中心的传感器网络中的盲源提取	72
6.5 级联的传感器网络中的盲源提取	73
6.6 观测信号含噪时的盲源提取	74
6.7 能效和生命周期对比	75
6.7.1 能效对比	75
6.7.2 生命周期对比	76
6.8 讨论	78
6.8.1 传感器故障的影响	78
6.8.2 数据链接故障的影响	79
6.9 仿真结果	79
6.9.1 传感器数对性能的影响	79
6.9.2 量化比特数对性能的影响	81
6.9.3 观测噪声对性能的影响	81

6.9.4	能效对比	81
6.9.5	生命周期对比	82
6.9.6	传感器故障和数据链接故障对性能的影响	83
6.9.7	传播提取向量过程中的差错对性能的影响	83
6.10	本章小结	85
	参考文献	86
第 7 章	多簇传感器网络中盲源提取的有效能耗最小化	87
7.1	引言	87
7.2	多簇传感器网络中的盲源提取	88
7.3	盲源提取算法	89
7.3.1	第一阶段的算法	89
7.3.2	第二阶段的算法	90
7.4	待折中的参数	91
7.4.1	盲源提取的性能	91
7.4.2	传感器网络中的总能耗	91
7.4.3	优化尺度	93
7.4.4	最优簇数	93
7.5	形成簇的策略	93
7.6	关于最优簇数的分析	94
7.7	仿真结果	97
7.8	本章小结	101
	参考文献	101
第 8 章	多跳传感器网络中盲源提取的性能和生命周期的折中	103
8.1	引言	103
8.2	多跳传感器网络中的盲源提取	104
8.3	关于通信差错的分析	105
8.4	网络生命周期	106
8.4.1	单个传感器的能量约束	106
8.4.2	网络的能量约束	106
8.4.3	生命周期最大化	107
8.5	性能和生命周期的折中	107
8.5.1	性能评价准则	107
8.5.2	优化问题	107
8.5.3	关于优化问题解的分析	108
8.6	能量分配策略	109
8.7	仿真结果	109
8.7.1	性能和分支数之间的关系	109
8.7.2	性能和每个信道的误比特率之间的关系	110

8.7.3	性能和每个分支上的传感器数之间的关系	110
8.7.4	生命周期和能量约束之间的关系	111
8.7.5	生命周期内的性能变化关系	112
8.7.6	性能和生命周期的折中	113
8.7.7	网络能量约束下的能量分配	115
8.8	本章小结	116
	参考文献	116
第 9 章	多跳传感器网络中分布式估计的性能和能耗	118
9.1	引言	118
9.2	多跳传感器网络中的分布式估计	119
9.3	能耗和网络生命周期	120
9.4	折中	121
9.4.1	性能和能耗之间的折中	121
9.4.2	性能和生命周期之间的折中	121
9.5	分析	121
9.5.1	均匀感知环境	122
9.5.2	非均匀感知环境	124
9.6	仿真结果	124
9.6.1	性能与能耗之间的折中	124
9.6.2	生命周期内的性能变化	125
9.6.3	性能与生命周期之间的折中	126
9.7	本章小结	127
	参考文献	128
第 10 章	传感器网络中的信号重构	130
10.1	引言	130
10.2	信号重构问题	131
10.3	重构算法	132
10.3.1	观测信号的重组	132
10.3.2	基准信号重构和最佳线性无偏估计	132
10.3.3	传感器网络中的信号重构算法	133
10.3.4	性能仿真	133
10.4	基于阈值判决的传感器选择策略	136
10.4.1	代价函数和阈值之间的关系分析	137
10.4.2	仿真结果	137
10.5	本章小结	139
	参考文献	140

第1章 传感器网络

1.1 引言

无线传感器网络诞生于 20 世纪 70 年代，最初起源于战场监测等军事应用，随后逐渐转向民用。它综合了传感器技术、嵌入式计算技术、网络及通信技术、分布式信息处理技术等，能够通过各类集成化的微型传感器协作实时监测、感知和采集各种环境的信息，通过嵌入式系统对信息进行处理，并通过自组织无线网络以多跳方式将感知信息传送到用户终端。

传感器网络是新兴的面向应用的分布式计算平台，是一种特殊的无线自组织网络，其简化模型如图 1-1 所示。成百上千个微型传感器节点（用○表示）密集分布在观测区域中，它们将采集的数据通过无线链接以单跳或多跳方式发送到融合中心。单个传感器节点的传输距离短，而且容易损坏。但是整个传感器网络可以覆盖很宽的区域，而且具有容错性和可扩展性。传感器网络的工作以部署区域中的事件观测为中心，可以由事件触发，也可以是周期性观测。单个传感器节点不知道整个网络的情况，但是可能了解附近传感器节点的情况。因此传感器网络很难用一个中心控制器进行管理，但是相邻的传感器节点可以进行信息交互。传感器网络的拓扑结构是动态变化的，这是因为节点可能移动，经常有节点加入或者退出网络，无线链路也是不稳定的。和传感器阵列相比，传感器网络有很多优点，如部署更快捷，覆盖面更广，不需要人工采集数据，价格更低廉，功耗低等。传感器网络可以用于远程医疗、智能家居、军事监视、工业过程监控、危险环境监测等场合^[1]，如将传感器安装在病人身上，并将它们联网，可以远程监控病人的健康状况^[2]。目前已经开发出一些传感器网络实验平台，如美国加州大学伯克利分校开发的 MICA2。人体区域传感器网络（body area sensor network）被认为对需要照顾的人来说非常有用。多个传感器节点挂在人的身上，可以采集心电、脑电、脉搏、血压等信号，并将采集到的数据无线发送到远端的融合中心。医生不需要近距离接触就可以了解相关人士的健康状况^[2]。从信号处理的角度来看，融合中心如何有效处理这些数据是关键。

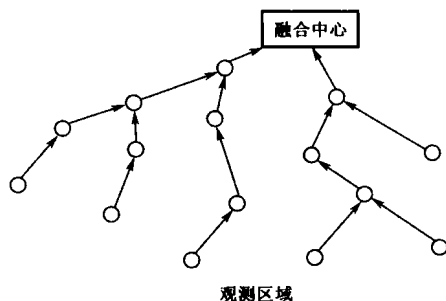


图 1-1 传感器网络模型

传感器节点的体积很小,用难以更换的电池供电,一般包含感测、计算、通信和电源四个基本模块,其通信带宽和能量都有限^[3]。尽管最近人们提出了可以从外界获取太阳能、风能等可再生能源的传感器网络^[4],但是相关技术还远未成熟。外界能源不稳定,不是任何时刻都有,在不同时刻和不同位置可获取的能量也不同。传感器的观测信号通常被噪声污染,在无线信道中传输时还会受到信道畸变的影响。传感器网络可完成信号检测^[5-10]和估计^[11]、目标定位和跟踪^[12,13]等信号处理任务。处理这些具体问题时,人们通常考虑如何在能量约束的情况下尽可能获得好的性能,性能和能耗的折中可转化为带约束的优化问题。另外,传感器的计算能力和数据存储空间都有限,设计的信号处理算法要尽量简单。信号处理算法的成功实现还依赖于网络节点间的时间同步。

传感器网络在感测、计算、通信、侦听、休眠时都消耗能量。单个传感器节点的能量是有限的,因此设计传感器网络信号处理算法、MAC 协议、路由协议等都要考虑节能。在能量约束下,设计的信号处理算法和经典的信号处理算法不同^[14],MAC 协议和路由协议等也和传统通信网中的有所不同。传感器网络中的通信消耗的能量占整个能量消耗的很大一部分,因此一种节能的方式是减少通信负荷,如在网内形成簇,先对采集的数据进行预处理再发送到融合中心;采用多跳的方式传送数据,缩短通信距离;改善传输机制,减少冗余消息传送。另外,通过合理调配休眠/唤醒模式,也可以让传感器节省一部分能量。还可以采用跨层优化手段节能,联合考虑物理层、数据链路层、网络层、应用层等的设计指标。

单个传感器节点的能量有限,因而传感器网络的生命周期也是有限的。生命周期受很多因素影响,包括单个传感器的能量限制、具体应用环境的限制、网络受到恶意攻击等。由此得到生命周期的定义也有很多种^[15]。有的定义生命周期为从传感器网络开始工作到有一个传感器失效时;有的定义为从传感器网络开始工作到有一部分传感器失效时;有的定义为从传感器网络开始工作到剩下的能正常工作的传感器不能覆盖某一区域时;还有功能性定义,侧重于传感器网络是否完成指定的任务^[16]。为了让传感器网络工作更长一段时间,人们提出了很多延长传感器网络生命周期的方法,如设计分布式的最优路由算法^[17],对多个传感器到融合中心的数据传输进行调度^[18],设计中心式的迭代算法最大化网络生命周期^[19],让传感器从外界环境中获取能量^[20-22]。传感器节点从外界获取能量可以一定程度上缓解能量约束,但是如何优化利用从外界获取的能量这个问题尚未解决。

1.2 系统架构

1.2.1 有簇和无簇的传感器网络

有簇和无簇的传感器网络系统架构如图 1-2 所示。图中黑色圆圈代表簇头节点。融合中心可能是固定的,也可能是移动的。在有簇的传感器网络中,节点自组织成簇,每个簇中有一个节点作为簇头,其他节点作为簇成员。簇成员将采集到的数据发送到簇头,簇头对接收到的数据进行聚合后再将数据发送到融合中心。无簇的传感器网络主要有两

种，一种是所有节点将采集的数据直接发送到融合中心，另一种是数据在相邻节点之间传递。传感器网络中的节点密集部署，如果所有节点将所采集到的数据直接发送到融合中心，大量数据的同时传送将引起严重的相互干扰。另外，传感器节点采集到的数据具有一定相关性，没有必要将所有数据都发送到融合中心。在传感器网络内部进行分簇^[23]，让簇头对簇内成员采集的数据进行预处理，可以减少传送的数据量，并且缩短平均通信距离。另外，分簇还可以减少由竞争冲突引起的数据包丢失，提高吞吐量。但是，分簇将导致簇头很快耗尽能量，使得簇成员的数据无法到达融合中心。我们可以让节点轮流扮演簇头的角色，均衡节点的能耗，延长网络生命周期。

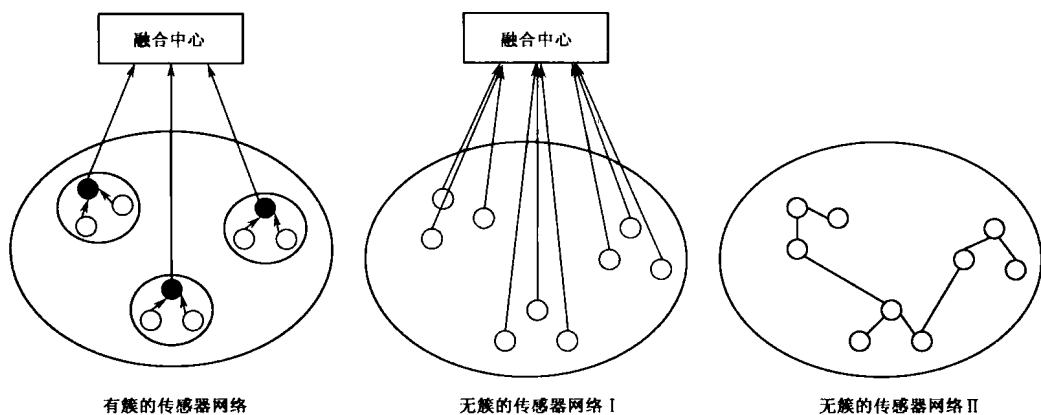


图 1-2 有簇和无簇的传感器网络

关于传感器网络分簇的研究大多只考虑两级的分簇架构，多级的分簇架构难以管理而且稳定性较差。另外，分簇的研究较少考虑节点对观测环境和传感器网络自身的学习。当有节点加入或者退出网络时，分簇架构必须自适应调整。

1.2.2 单跳和多跳的传感器网络

在单跳传感器网络中，所有传感器节点直接将数据发送到融合中心。这种传感器网络架构简单，易于控制。但是传感器节点通信距离比较短，融合中心不能离传感器网络部署的区域太远。另外，很多传感器同时向融合中心发送数据容易引起相互干扰。

在多跳传感器网络中，某个传感器节点通过其他传感器节点将数据逐跳发送到融合中心。多跳传感器网络比单跳传感器网络复杂，不易控制，需要寻找合适的路由。但是逐跳发送可以让传感器节点将数据发送到远端的融合中心。

1.3 关键技术

传感器网络的关键技术很多，包括数据聚合、节点部署、分簇、节点休眠调度、移动性管理、媒质接入控制协议、路由协议、定位、同步等。下面我们介绍几种和传感器网络分布式估计有关的关键技术。

1.3.1 分簇

低能耗自适应层级分簇 (LEACH) 协议^[24]是传感器网络分簇协议的典型代表。在 LEACH 协议中, 传感器节点自组织成局部的簇, 每个簇中有一个节点作为簇头, 其他节点是簇成员。簇成员将数据发送到簇头, 簇头对收到的数据进行聚合, 然后将数据发送到远端的融合中心。通常簇头节点比簇成员节点携带的能量更多, 计算和通信能力也更强。如果簇头节点预先选定且一直担任簇头的角色, 它将很快耗尽能量, 从而使得该簇的成员不能正常通信。LEACH 协议让传感器节点随机轮换担任簇头的角色, 从而均衡它们的能耗。

LEACH 协议使用分布式算法在传感器网络中形成 k 个簇。在第 $r+1$ 轮开始 (时刻 t), 第 i 个传感器节点以概率 $P_i(t)$ 选择自己作为簇头。概率 $P_i(t)$ 的设定使得这一轮的平均簇头数目是 k 。如果传感器网络中有 N 个节点, 有

$$E[\#CH] = \sum_{i=1}^N P_i(t) \times 1 = k \quad (1-1)$$

为了保证所有节点担任簇头的次数相同, 每个节点平均 N/k 轮要担任一次簇头。用 $C_i(t)$ 表示第 i 个传感器节点在最近 $(r \bmod (N/k))$ 轮中是否担任过簇头, 那么第 i 个传感器节点在第 r 轮必须选择以下概率担任簇头:

$$P_i(t) = \begin{cases} \frac{k}{N - k \times (r \bmod N/K)}, & C_i(t) = 1 \\ 0, & C_i(t) = 0 \end{cases} \quad (1-2)$$

在前 r 轮中没有担任过簇头的平均节点数是 $N - k \times r$ 。 $\sum_{i=1}^N C_i(t)$ 代表在 t 时刻担任过簇头的节点数, 有

$$E\left[\sum_{i=1}^N C_i(t)\right] = N - k \times [r \bmod (N/k)] \quad (1-3)$$

这样保证了每 N/k 轮后节点的剩余能量基本上相等。根据式 (1-2) 和式 (1-3) 计算出每轮平均的簇头数为

$$E[\#CH] = \sum_{i=1}^N P_i(t) \times 1 = (N - k \times [r \bmod (N/k)]) \times \frac{k}{N - k \times [r \bmod (N/K)]} = k \quad (1-4)$$

上述概率设定假设所有节点的初始能量相等而且节点一直发送数据。如果节点的初始能量不相等, 概率设定为

$$P_i(t) = \min \left\{ \frac{E_i(t)}{E_{\text{total}}(t)} k, 1 \right\} \quad (1-5)$$

其中, $E_i(t)$ 是第 i 个传感器的当前能量, $E_{\text{total}}(t) = \sum_{i=1}^N E_i(t)$ 。对于这种概率设定, 剩余

能量更多的节点比剩余能量更少的节点更可能担任簇头。每轮平均的簇头数为

$$E[\#CH] = \sum_{i=1}^N P_i(t) \times 1 = \left(\frac{E_1(t)}{E_{\text{total}}} + \dots + \frac{E_N(t)}{E_{\text{total}}} \right) k = k \quad (1-6)$$

另一种传感器网络分簇协议的典型代表是混合节能分布式分簇 (HEED) 协议^[25]。它的核心思想是依据节点的剩余能量和另一个参数 (节点和邻居节点的距离或者节点密度) 周期性地选择簇头。

1.3.2 节点休眠调度

传感器节点密集部署在观测区域, 相邻节点采集的数据具有相关性, 而且每个节点有一定的感知范围, 不用所有节点都活跃就能覆盖整个观测区域, 并保持连通性。因此, 可以让部分节点进入休眠状态以节省能量^[26]。节点休眠调度就是为了找到能保证网络覆盖和连通性所需要的节点, 并让其他节点进入休眠状态。随着时间的推移, 节点的剩余能量将发生变化, 需要改变节点的状态, 让工作的节点休眠, 并唤醒休眠的节点进入工作状态, 以延长网络生命周期。

文献[26]介绍了多种典型的节点休眠调度算法。

(1) 随机独立调度: 在每一轮开始前, 每个节点独立决定以概率 p 活跃或者以概率 $1-p$ 休眠。这种算法能够保证观测区域的每个点至少被 K 个节点覆盖, 并且延长网络生命周期至未进行节点休眠调度对应的生命周期的近 $\frac{1}{p}$ 倍。另外, 这种算法不需要位置或距离信息, 没有调度开销, 节点也不需要维持邻居节点表。但是这种算法对不可预料的节点损坏的鲁棒性差。

(2) 倡导扇形算法: 这种算法能够保证覆盖度并且节省能耗, 它的核心思想是让某个节点进入休眠状态, 只要它的感知区域被邻居节点完全覆盖。每个节点用邻居节点的位置信息和感知范围确定倡导扇形, 并且连接倡导扇形的中心角。如果整个 360° 的中心角被覆盖, 该节点可以进入休眠状态。这种算法需要准确的位置信息, 节点之间要保持时间同步, 有调度开销, 节点需要维持邻居节点表。

(3) 生命周期最大化算法: 这种算法能够保证观测区域的每个点至少被 K 个节点覆盖并且最大化网络生命周期。每个节点有三种状态: 活跃、休眠、脆弱。当节点处于脆弱状态并且发现它的部分感知区域不能被活跃或者脆弱的邻居节点覆盖时, 它就进入活跃状态; 否则它进入休眠状态。这种算法能够保证特定的覆盖度, 需要准确的位置信息, 有调度开销。

(4) 轻量级的部署有关节点休眠调度算法: 这种算法保证统计意义上的覆盖度, 假设每个活跃节点知道它的活跃的邻居节点数。当活跃的邻居节点数超过阈值时, 该活跃节点随机选择它的一个邻居节点进入休眠状态。这种算法不需要位置信息, 每个节点必须知道它的感知范围内的邻居节点数。

(5) 环境侦测和自适应感知算法: 这种算法假设节点经常不可预测地损坏, 节点总数比活跃节点数多得多, 没有位置信息, 对节点损坏的鲁棒性好。这种算法将活跃节点

隔开至少 c 米的距离以节省能量。

(6) 最优地理密度控制算法：这种算法试图最小化活跃节点的重叠感知区域，可以保证观测区域的每个点至少被 1 个节点覆盖并且任何节点都跟最少 1 个邻居节点连接。这种算法需要准确的位置信息，节点之间要保持时间同步，有调度开销。

(7) 覆盖度配置算法：这种算法试图最大化休眠节点数，可以保证观测区域的每个点至少被 K 个节点覆盖，并且任何节点都跟最少 K 个邻居节点连接。这种算法需要准确的位置信息，节点需要维持邻居节点表。

(8) 自适应自配置拓扑结构算法：这种算法允许节点自动调节连通度，以获得想要的数据传递率。它不需要位置信息，也不需要周期性地发现邻居节点，但是要获得活跃的邻居节点数。

(9) 基于距离的节点调度算法：在分簇的传感器网络中，这种算法选择远离簇头的节点以更大的概率休眠。每个节点不需要知道其他节点的位置信息，但是这种算法可能导致不均衡的节点能耗。

传感器网络节点休眠调度方面的研究较少考虑观测环境的变化。实际上，观测环境可能发生动态变化。例如，传感器网络一开始用于区域观测，某个时刻区域中有目标出现，传感器网络转而跟踪该目标，当目标移出该区域时，传感器网络又恢复区域观测。由于区域观测和目标跟踪需要的活跃传感器节点数不同，当发生区域观测到目标跟踪的环境变化时，节点必须自适应地调整状态。

1.3.3 媒质接入控制协议

在传感器网络中，信道资源是有限的，而节点又密集部署，相邻节点发送数据时可能引起相互干扰，导致数据重传浪费能量。节点还可能收到本来发给其他节点的数据，浪费能量。还有控制信令传送、信道侦听等也浪费能量。这就需要设计媒质接入控制协议^[27]，减少节点发送数据时因冲突引起的丢包和不必要的能耗。现有的传感器网络媒质接入控制协议主要由载波侦听多路访问（CSMA）协议和时分多址（TDMA）协议衍变而来，融入了节能因素。

能量受限的传感器网络中媒质接入控制协议的研究已经比较成熟，目前人们开始研究能量获取传感器网络的媒质接入控制协议^[28]。

1.3.4 路由协议

传感器网络中的路由问题很有挑战性，这是因为节点数目众多，不太可能维持地址列表，传统基于 IP 的路由协议不适用；数据传送大多是多对一的，节点将采集到的数据以多跳方式发送到融合中心；节点的能量、计算和存储能力都有限；节点可能损坏导致拓扑结构改变。人们已经提出很多种传感器网络的路由协议^[29]，它们既要考虑能量限制，又要符合特定应用和系统架构的要求。按照传感器网络的系统架构划分，路由协议主要有三种：平面的、分层的以及基于位置的路由。在平面路由协议中，所有节点的地位平

等。在分层路由协议中，节点自组织成簇，簇头进行数据融合。在基于位置的路由协议中，节点利用位置信息转发数据到指定的地方。按照协议操作方式划分，路由协议主要有基于多径的、基于查询的、基于协商的和基于服务质量的路由协议。

1.3.5 同步

传感器网络没有共同的时钟，每个节点有自己的时钟。当多个传感器节点同时向融合中心发送数据时，节点之间的时间同步对数据融合来说显得非常重要^[30]。但是，当相邻节点之间依次传递数据时，只要相邻节点之间保持时间同步即可。传感器网络中的时间同步要考虑能效、系统架构、时延等因素。

同步协议分为：

(1) 主从同步和对等同步。主从同步指的是多个从节点将一个主节点的时钟视为参考时钟，并且努力和主节点的时间保持同步。对等同步指的是节点之间保持时间同步，没有主时钟，它对主节点损坏的鲁棒性好，但是难以控制。

(2) 时钟校准和无限制时钟。时钟校准指的是对节点的时钟进行修正，让它们跟参考时钟保持一致。无限制时钟指的是节点之间通过发送时间标签保持同步。

(3) 内同步和外同步。内同步指的是网内没有时钟基准，将节点之间的最大时间差最小化。外同步指的是外部提供参考时钟，节点的时钟跟参考时钟保持一致。

1.3.6 分布式信号处理

传感器网络可以完成各种类型的信号处理任务，如检测、估计、目标定位和跟踪。但是，传感器节点的通信带宽有限，通常不能将原始数据发送到融合中心或者邻居节点。这样信号处理的性能有所降低。因此，传感器网络中信号处理的关键问题是在能耗约束下最大化性能或者在性能约束下最小化能耗。信号处理可以集中式的实现，即传感器节点将数据发送到融合中心，由融合中心完成信号处理任务。信号处理也可以分布式的实现，即相邻节点传递数据，信号处理任务由节点合作完成。

1.4 发展趋势

1.4.1 物联网

物联网就是物物相连的互联网，其英文名称是“The Internet of Things”^[31]。物联网是通过传感器网络、射频识别（RFID）、红外感应器、全球定位系统等信息传感设备，按约定的协议，将任何物品与互联网连接，进行信息交换和通信，以实现对物品的智能识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络。物联网没有统一的定义，有人说物联网就是深度信息化。物联网牵涉到多学科领域，包括电子、通信、计算机、信号处理和各行业知识。物联网的应用范围很广，比如在智能交通领域，汽车和路边基础设施都安装有传感器、射频识别卡和红外感应器等，便于对汽车进行用户识别和位置跟踪，对交通流量

进行疏导,并且对交通安全进行预警。在物流领域,射频识别卡参与物品的生产、包装、运输和销售全过程,确保物品的质量和安全。在精细农业领域,传感器实时观测农作物生长的土壤温度、湿度以及农作物病虫害,能够提高农作物产量。在健康领域,传感器可以采集病人和老人的脉搏、血压、心电等信号,实现远程医疗和救助。

2009年,美国总统奥巴马和IBM公司都提出了“智慧地球”的口号。同年8月,温家宝总理在无锡考察时提出了“感知中国”的理念,物联网产业上升为国家战略。同年9月,工业和信息化部和国家标准化委员会推动传感器网络标准工作组成立,力争主导制定传感网国际标准。2012年3月,我国传感网(物联网)标准化基础理论研究取得一系列重大突破。无锡物联网产业研究院院长刘海涛及其团队在国际上所提出的物联网三层架构、共性平台+应用子集等物联网总体思路,先后被国际标准采纳。物联网的关键技术基本已经成熟,但标准制定和产业化目前还未完成^[32]。这是因为物联网尚处于早期发展阶段,缺乏统一的技术标准和成熟的业务模式,行业融合不够,力量分散,产业集中度低。另外,物联网在地址分配、大规模联网和信息安全等方面也还面临着挑战。物联网中的海量终端需要非常多的IP地址,目前的IPv4版本无法满足要求,即将使用的IPv6版本有望解决这个问题。物联网中存在多种异构的有线/无线网络,这些网络的互连互通远比单一网络复杂。物联网连接和处理的对象主要是物以及相关的数据,其“所有权”特性导致物联网信息安全要求比以处理文本为主的互联网更高。

物联网通常被划分为三层架构,即感知层、传输层和应用层。感知层就是全面感知,对物进行识别和数据采集;传输层就是可靠传递,通过各种有线和无线网络传递信息;应用层就是智能处理,对采集到的数据进行分析 and 处理。物联网应用的关键是软件,包括服务器端的应用软件和中间件,以及数据挖掘和分析软件,还有传输层和感知终端的嵌入式软件。中间件是物联网软件的核心,是占领物联网制高点的关键^[32]。传感器网络是物联网感知层的重要组成部分。传感器网络一般没有直接和互联网相连,因此节点采集的数据要通过中间网络转发。转发时的中间网络和网关节点选择决定了数据转发的效率。物联网感知层采集的数据非常多,但是用户只对部分数据感兴趣。过量的数据传输不仅浪费能量,而且容易导致网络拥塞。这就需要在传感器网络中采用按需感知方式,通过和用户交互,自适应地调节数据采集的频率。

1.4.2 能量获取传感器网络

传感器节点携带的能量有限,因此传感器网络的核心问题就是在保证性能的同时最小化能耗或者最大化网络生命周期。这也是传感器网络和其他无线网络的本质区别。随着传感器节点硬件水平的提高和充电技术的发展,人们考虑让传感器节点从外界获取能量,如太阳能、风能,从而缓解传感器节点的能量限制,延长网络生命周期^[4]。但是外界能源是不稳定的,不是任何时刻都有,而且不同时刻、不同位置可获取的能量也不同。因此能量获取传感器网络的关键问题是如何最大限度利用从外界获取的能量,延长网络生命周期或者提高性能。针对外界能源的不确定性,可以对能量获取过程进行数学建模并使用分布式估计算法对未知参数进行估计,从而为优化利用外界能源创造条件。