



无线传感器 网络研究与应用

冯秀芳 王丽娟 关志艳 著 |



国防工业出版社

National Defense Industry Press

无线传感器网络 研究与应用

冯秀芳 王丽娟 关志艳 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书全面论述了无线传感器网络的发展历程、无线传感器网络的特点、关键技术及相关应用。全书共分8章,主要内容包括无线传感器网络的概述、无线传感器网络的体系结构、无线传感器网络的覆盖算法、无线传感器网络的路由协议、无线传感器网络数据融合路由协议算法、无线传感器网络的定位算法、无线传感器网络目标跟踪技术的研究与应用等。

本书可作为无线传感器网络领域的研究人员及工程技术人员的参考资料,也可作为高等院校通信、计算机、电子、物联网等专业本科生和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络研究与应用/冯秀芳,王丽娟,关志艳著. —北京:国防工业出版社,2014. 12

ISBN 978-7-118-09429-9

I. ①无... II. ①冯... ②王... ③关... III. ①无线电通信—传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 223944 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售



*

开本 787 × 1092 1/16 印张 16 字数 365 千字

2014 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

随着信息技术、集成电路及传感器等技术的迅猛发展,使得价廉、功耗低、体积微小并具备一定计算、感知、存储及通信能力的设备得以实现,并且部署于各种物理环境之中,形成一种新型的网络——无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)。无线传感器网络已成为当今国内外备受关注、由多门学科交叉的新型前沿研究领域。无线传感器网络综合了传感器、嵌入式计算、分布式信息处理、无线通信和软件编程等技术,可以协作地实时监测、感知和采集所监控区域的各种环境或监测对象的信息,并对监测到的信息进行处理,传送给需要这些信息的用户。

由于无线传感器网络的技术特点,使其在军事、环境、安全、医疗、工农业生产以及家居等各个领域都有着广阔的应用前景。在军事、国防、工农业、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、反恐反恐、危险区域远程控制等许多重要领域都有潜在的实用价值,已经引起了许多国家学术界和工业界的高度重视。

无线传感器网络的关键技术包括:拓扑控制技术、节点定位技术、网络覆盖技术、时间同步技术、数据融合技术、数据压缩技术、协作信号信息处理技术、网络路由及安全技术等,本书重点对无线传感器网络体系结构、覆盖技术、定位算法、路由协议、数据融合、目标跟踪等方面的技术和应用进行介绍。全书共分8章,第1章对无线传感器网络的发展历程、无线传感器网络的特点、研究热点及关键技术等进行了概述;第2章主要介绍了无线传感器网络的体系结构;第3章重点讨论了无线传感器网络的覆盖算法;第4章分析了无线传感器网络的路由协议;第5章研究了无线传感器网络数据融合路由协议算法;第6章研究了无线传感器网络的定位算法;第7章介绍了无线传感器网络目标跟踪技术的研究与应用;第8章介绍了无线传感器网络的数据融合及在机械故障诊断中的应用。

本书作者从2005年开始研究无线传感器网络,曾赴加拿大女皇大学、加拿大爱德华王子岛大学、日本横滨国立大学等进行有关无线传感器网络方面的学习和研究。近年来,作者和课题组成员在无线传感器网络覆盖技术、定位算法、路由协议、数据融合、目标跟踪等方面的研究取得了一定进展,在国内外期刊和学术会议上发表论文数十篇。本书是作者及课题组研究人员多年研究成果的积累。本书在编写过程中得到了国家自然科学基金、山西省自然科学基金、山西省科技平台建设项目、山西省回国留学人员科研资助项目、山西省留学人员科技活动项目的支持,在此表示谢意!本书第2、5、6、7、8章主要由冯秀芳编写;第1、4章及5、6章的部分内容由王丽娟编写;第3章由关志艳编写。胡静娴、吕淑芳、王晓晨、于亚男、郑慧月、吴菊英、田丽汶等研究生为本书的资料收集及整理做了许

多工作,另外,本书在编写过程中参考了大量的文献和资料,在此谨向原作者及各位老师、同学的工作表示诚挚的感谢。

近年来,物联网技术的发展非常迅猛,无线传感器网络技术的发展也取得了很大的进展。由于作者水平所限,书中难免出现不妥的地方,恳请广大读者批评指正。

本书在编写过程中,参考了大量的文献和资料,在此谨向原作者及各位老师、同学的工作表示诚挚的感谢。近年来,物联网技术的发展非常迅猛,无线传感器网络技术的发展也取得了很大的进展。由于作者水平所限,书中难免出现不妥的地方,恳请广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 无线传感器网络的概述	1
1.1 无线传感器网络的发展历程	1
1.1.1 无线传感器网络的研究历史	3
1.1.2 无线传感器网络的研究现状	5
1.1.3 传感器网络技术的发展趋势	6
1.2 无线传感器网络的特点	7
1.2.1 传感器网络的类型	8
1.2.2 无线传感器网络的应用	9
1.2.3 内部传感器系统平台和操作系统 OS 支持	12
1.2.4 无线传感器标准	13
1.2.5 存储	15
1.3 无线传感器网络的研究热点及面临的挑战	16
1.4 无线传感器网络的关键技术	18
第 2 章 无线传感器网络的体系结构	20
2.1 无线传感器网络体系结构研究现状	20
2.1.1 节点结构	20
2.1.2 网络结构	21
2.1.3 跨层设计方法	23
2.2 无线传感器网络硬件系统的基本框架	24
2.2.1 无线传感器节点的优化配置	24
2.2.2 核心部件的设计要求	25
2.3 无线传感器网络软件系统的设计原则	26
2.4 系统设计的关键技术	28
2.5 无线传感器网络协议栈的设计	29
2.6 IEEE 802.15.4 协议和 ZigBee	30
2.6.1 IEEE 802.15.4 协议	30
2.6.2 ZigBee 技术简介	32
2.6.3 ZigBee 技术与 IEEE 802.15.4 的关系	33
2.6.4 ZigBee 技术的应用	36
2.7 TinyOS 操作系统	37
2.8 本章小结	38

第3章 无线传感器网络覆盖算法的研究	39
3.1 网络覆盖技术	39
3.1.1 覆盖技术分类	41
3.1.2 覆盖问题的解决方案	41
3.1.3 覆盖机制的局限性	45
3.2 无线传感器网络覆盖问题研究	46
3.2.1 覆盖问题研究模型分类	46
3.2.2 异构传感器网络有关覆盖的基本概念	47
3.2.3 节点感知模型	49
3.3 同构传感器网络区域网格划分	50
3.3.1 虚拟同构菱形网格划分	52
3.3.2 虚拟同构正方形网格划分	53
3.4 异构传感器网络区域网格划分	54
3.4.1 异构正六边形网格划分	54
3.4.2 异构正方形网格划分	56
3.5 虚拟力算法在异构网络中的应用	58
3.5.1 传统虚拟势场方法	58
3.5.2 异构节点受力分析	58
3.5.3 异构节点虚拟力表达式及移动坐标表达式	58
3.6 算法仿真与性能分析	60
3.7 本章小结	61
第4章 无线传感器网络的路由协议	62
4.1 概述	62
4.2 无线传感器网络路由协议的特点	63
4.3 无线传感器网络路由协议的关键技术	64
4.4 无线传感器网络路由协议的分类	68
4.4.1 数据为中心的路由协议	68
4.4.2 分层路由协议	76
4.4.3 基于地理位置的路由协议	82
4.4.4 网络流量和 QoS-aware 路由协议	87
4.5 本章小结	90
第5章 无线传感器网络数据融合路由协议算法的研究	92
5.1 无线传感器网络数据融合与路由协议	92
5.1.1 无线传感器网络数据融合	93
5.1.2 无线传感器网络路由协议	99
5.1.3 数据融合与路由协议	110
5.2 无线传感器网络数据融合在网络层的实现	110

5.2.1	网络层路由方式分类	110
5.2.2	DC 路由中的数据融合	111
5.2.3	独立的数据融合协议层	113
5.3	数据融合树的构造	113
5.3.1	反向组播树	113
5.3.2	三种典型的数据融合树	114
5.4	LEACH 算法	115
5.4.1	簇的建立阶段	115
5.4.2	稳定传输阶段	116
5.4.3	LEACH 协议算法的仿真实验	116
5.5	Prim 数据融合路由算法	119
5.5.1	Prim 路由融合算法	119
5.5.2	Prim 数据融合路由算法的仿真实验	120
5.6	CPG 算法的提出	121
5.6.1	最短路径问题	121
5.6.2	网络模型及算法描述	122
5.6.3	仿真评价	124
5.6.4	CPG 算法与 SPT 算法的性能比较	126
5.7	本章小结	127
第 6 章	无线传感器网络的定位算法	128
6.1	概述	128
6.1.1	无线传感器网络节点定位技术的背景	129
6.1.2	研究无线传感器网络节点定位技术的意义	130
6.1.3	定位技术简介	130
6.1.4	无线传感器网络节点定位的基本原理	133
6.2	基于测距的定位技术	137
6.2.1	二维空间计算节点位置的基本方法	137
6.2.2	三维空间计算节点位置的基本方法	140
6.2.3	常见的基于测距的定位技术	142
6.2.4	多种其他的定位技术	147
6.3	基于 RSSI 定位算法改进与实现	150
6.3.1	RSSI 测距原理	150
6.3.2	基于 RSSI 定位算法定位过程	150
6.3.3	基于 RSSI 定位算法不足分析	152
6.3.4	基于 RSSI 定位算法的改进与扩展	152
6.4	非测距定位技术	159
6.4.1	质心定位算法	160

6.4.2	DV-Hop 定位算法	165
6.4.3	APIT 定位算法	169
6.4.4	基于 APIT 定位算法的改进与实现	170
6.5	本章小结	181
第 7 章	无线传感器网络目标跟踪技术的研究与应用	183
7.1	目标跟踪技术	183
7.1.1	基于分层网络的目标跟踪技术	184
7.1.2	点对点网络中的目标跟踪技术	186
7.2	基于数据融合的目标跟踪	188
7.2.1	基于数据融合的 WSN 节点跟踪系统	188
7.2.2	测距及定位技术	189
7.2.3	时间同步技术及轨迹预测	191
7.2.4	基于数据融合的节点跟踪	192
7.3	模糊测距、定位及通信实现	192
7.3.1	目标跟踪系统框架	193
7.3.2	模糊测距及定位	194
7.3.3	通信协议设计	196
7.4	目标跟踪仿真试验	197
7.4.1	Matlab 仿真试验	197
7.4.2	GAINS 平台试验	199
7.5	本章小结	201
第 8 章	WSN 数据融合及在机械故障诊断中的应用	202
8.1	基于神经网络的 WSN 数据融合	202
8.1.1	人工神经网络在 WSN 数据融合中的应用	202
8.1.2	基于神经网络的融合模型的建立	203
8.1.3	复杂机械设备数据融合的功能模型	203
8.2	机械故障诊断模型	205
8.2.1	循环统计量	205
8.2.2	调幅信号循环自相关函数解调分析	207
8.2.3	滚动轴承的故障特征	209
8.3	无线传感器网络中基于 PCA 神经网络的数据融合	210
8.3.1	主元分析(PCA)神经网络	210
8.3.2	基于 PCA 神经网络的 WSN 数据融合技术	211
8.3.3	基于 WSN-PCA-DA 的故障诊断	212
8.3.4	试验结果分析	218
8.4	WSN 中基于模糊神经网络的故障诊断	219
8.4.1	模糊逻辑及模糊神经网络	219

8.4.2 基于 WSN - FNN - DA 的故障诊断系统	226
8.4.3 模糊推理机的建立	226
8.4.4 模糊推理机的实现	227
8.5 本章小结	231
参考文献	232

第1章 无线传感器网络的概述

无线传感器网络(WSN)已越来越受到广泛关注。微电子机械系统(MEMS)技术的飞速发展,促进了智能传感器的应用。与传统的传感器相比,这些传感器尺寸更小,价格更便宜,但处理能力和计算资源相对有限。这些传感器可以按照具体的决策策略,感知、测量及收集环境信息,并将这些感知数据传给用户。

本章简要概述了无线传感器网络的发展、特点及研究热点和关键技术。

1.1 无线传感器网络的发展历程

无线传感器网络通常没有或有少量的基础设施。它由大量的传感器节点(往往几十个到成千上万个)组成,并且协同工作来监控某个特定的区域,从而获得有关该区域的相关特性数据。有两种类型的无线传感器网络(WSN):有结构的和无结构的。无结构的WSN由密集的传感器节点构成以Ad Hoc方式(随机部署方式)部署于区域。这些节点一旦被部署,该网络将以无人值守方式来监控和报告,但在这种无结构的WSN的网络维护,如管理网络的互联性和故障检测,则由于节点数目过多而显得困难。有结构的WSN,部分或全部节点是按照事先规划的方案(部分或全部节点的位置是固定的)进行部署其优点是节点相对较少,网络管理和维护成本低。有结构的WSN部署的节点个数虽然相对少,但部署位置固定,可以有效覆盖监测区域;而无结构WSN的节点采用随机部署方式,会出现监测区域没有覆盖节点的可能性。

智能传感器节点是一些具有一个或多个传感器、处理器、存储器、电源模块、无线收发模块和触发模块的低功耗设备。各种机械的、热敏的、生物的、化学的、光学的以及磁性的传感器都可以被嵌入到传感器节点来监控环境特性。传感器节点的存储能力有限,通常部署于人难以直接到达的位置,利用无线电波的无线通信形式将数据传输到基站(例如:一个笔记本电脑、个人手持设备,或是一个固定基础设施的访问点)。传感器节点的主要能源来自电池,根据具体环境可以在部署传感器节点的地方将太阳能电池板作为获取能源的辅助措施。根据具体的应用和使用的传感器类型,触发器模块可以嵌入到传感器节点中。

WSN可以适用于多种场合的应用:军事目标追踪及监视、自然灾害预警、生物医学健康监控、危险环境探测、地震预测等。在军事目标追踪及监视中,WSN有助于入侵攻击监测及攻击行为的识别;在自然灾害预警中,WSN通过传感器节点可以感知和检测环境参数,从而能在自然灾害发生前进行预警;在生物医学应用中,外科植入的传感器有助于监控病人的健康状况;在地震预测预报中,在火山易发区域以Ad Hoc方式部署传感器节点可以监测地震和火山岩的发展。

与传统的网络相比,无线传感器网络有着设计和资源方面的局限性。资源局限性包

括有限的能量、短的通信距离、低带宽以及每个节点有限的处理和存储能力;设计局限性体现在 WSN 与应用相关、具体的被监测环境紧密相关,被监测的环境在决定无线传感器网络的大小、传感器节点的部署方案及无线传感器网络的拓扑结构方面都起着决定作用。WSN 网络规模的大小随着被监控环境区域大小的改变而改变。对于室内环境而言,在有限的空间内由少量节点就可以构成一个实现对相关环境参数进行监控的无线传感器网络;对于室外环境,往往需要较多的节点去覆盖一个大的被监测区域。当被监测环境是人难以接近或到达的、或是需要由成千上万的节点去组建用于环境监测的无线网络,节点的 Ad Hoc 部署方案是最佳的。被监测环境中的障碍也会限制或影响到节点间的通信,进而影响到网络互联性或网络的拓扑结构。

对 WSN 的研究主要是通过引入新的设计理念、创建或改进现有协议、探究新的应用、研发新的算法来改进上面提到的 WSN 的局限性。

目前最新的传感器技术提供了设计和研发多种类型的无线传感器网络应用的解决方案。市场上可用的传感器有两种:普通(多功能)传感器节点和网关(桥接)传感器节点。普通(多功能)节点的任务是完成对被监测环境具体参数的测量任务。这种节点可以嵌入到用于检测多种物理特性的设备当中,物理特性包括光照、温度、湿度、气压、速率、加速度、声学、磁力学等特性。网关(桥接)节点负责从普通节点收集数据并将它们中继传输到基站。网关节点具有较强的处理能力、较大的电池电量、较远的信号(无线信号)传输范围。通常,需要将普通节点和网关节点相结合,来部署构成一个无线传感器网络 WSN。

为了将无线传感器网络技术应用到实践中,需要研发的工作可以大致分为以下三类^[1],如图 1-1 所示。

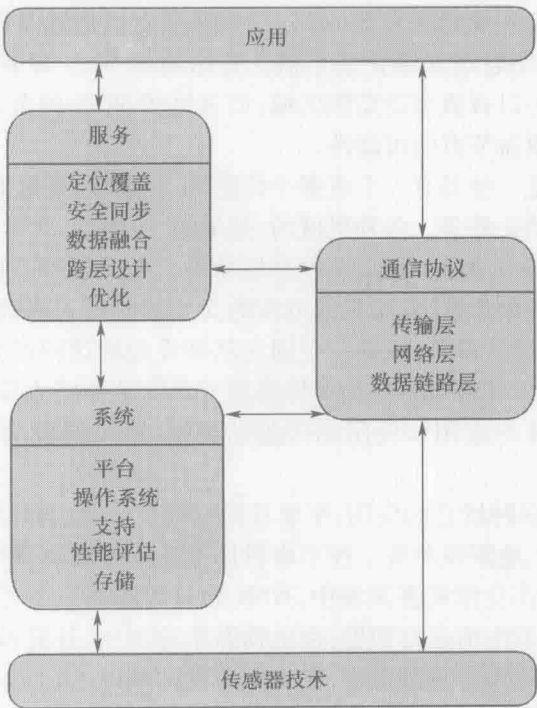


图 1-1 WSN 主要研发任务分类

(1) 系统。若每个传感器节点是独立的系统,为了能够支持传感器系统的不同应用软件,新的系统平台、操作系统以及存储机制的研发是实现该系统的主要任务。

(2) 通信协议。为了实现具体应用和传感器节点间的正常通信,需要对通信协议进行研发。

(3) 服务。为了增强具体的应用及网络效率,改进系统性能,需要对相关服务进行研发。

从应用需求和网络管理的角度而言,传感器节点的自组织能力是很关键的,即传感器节点可以将它们自己组织为网络,之后能有效地控制和管理它们自己。由于传感器节点的能量、处理能力、存储能力有限,为满足需求,完成具体的应用,需要研发新的通信协议和管理服务。

1.1.1 无线传感器网络的研究历史

无线传感器网络被看作是 21 世纪最重要的革新技术之一。利用微型传感器实现组网的技术是未来的一项关键技术。1999 年 9 月,美国《商业周刊》将其列为 21 世纪 21 项最重大技术之一^[1]。廉价、智能设备配以多个传感器的电路板,可通过无线连接和 Internet 实现组网;通过大量部署的传感器,可以提供史无前例的能力来操纵和控制家庭住所、城市以及环境;组网的微型传感器可为国防领域提供广泛的系统技术,增强勘测、侦查、监控能力以及其他战术应用能力。

微型的可任意处理的传感器可以部署于地面、空中、水下、体内、车内以及楼宇内。每个传感器节点会被嵌入处理能力,可以按照声学、地震学、红外、磁模以及微型雷达的方式来运行,通过全球定位系统 GPS 或者本地定位算法来使节点获取位置和定位信息。

表 1-1 概括总结了一般传感器网络中可能涉及的属性范围。

表 1-1 传感器网络的属性

传感器	尺寸:小型(MEMS)、大型(雷达、卫星) 数目:少量、大量 类型:被动式(声波、地震、视频、红外、磁性)、主动式(雷达、激光) 空间覆盖:密集、稀疏 节点部署:固定计划、Ad Hoc(空中撒落) 动态性:静止(地震传感器节点)、移动
监测方式	分布式(如环境监测)、集中式(局部范围,如目标追踪) 协作式(如空中的交通管制)、非协作式(如军事目标监测)
运行环境	有利(单位的工作场所)、不利(战场)
通信	网络:有线、无线 带宽:高速、低速
处理结构	集中式(所有数据发送到中心节点)、分布式(数据分布在传感器或其他节点)、混合型
可利用能源	受限(小型传感器节点)、不受限(大型传感器节点)

传感器网络当前的以及潜在的应用包括:军事监测、物理安全、空中交通管制、交通监测、视频监控、工业制造自动化、分布式机器人、环境监测以及建筑物和结构监测。在这些

应用中的传感器节点可大可小,构成的网络可以有或无线。微型传感器构成的无处不在的无线传感器网络,可能会越来越发挥着改变整个感知世界的无可替代的作用^[2]。

针对不同的应用需求,可以构成不同类型的传感器网络,但是采用的技术却是相同或相似的。传感器网络技术的发展经历了不同的研究领域:感知、通信以及计算(包括硬件、软件和算法)。

1) 早期的军事传感器网络研究

随着科学技术的不断发展,国防应用成为传感器网络研究的最早驱动力。冷战时期(1947—1991),美国声纳监听系统 SOSUS(Sound Surveillance System),是由声学传感器构成的系统,被部署在海底的战略要地对前苏联潜艇实施秘密监测和追踪。近年来,其他更为复杂的声学传感器网络被部署,从而实现对潜艇活动的监测。SOSUS 现在被美国国家海洋和大气管理局 NOAA 用来监测海洋事件,例如地震和动物活动^[3]。同样在冷战时期,防空雷达系统被研发并被部署用于保护美国和加拿大的国防安全。该系统经历了多年的技术发展,已经将航空器作为传感器,成为机载空中警报和控制系统,现在该系统飞机也用于禁止毒品交易任务。

这些传感器网络一般采用分层处理结构。在许多情况下,人的操作在系统中起着关键作用。为此展开的各项研究都着眼于满足不同的应用需求,例如声学信号处理和翻译、追踪和数据融合等,都为现代传感器网络提供了核心处理技术基础。

2) DARPA 分布式传感器网络项目

现代无线传感器网络研究起始于 1980 年美国国防部高级研究计划署 DARPA 开展的分布式传感器网络 DSN 项目^[4]。截至这一阶段,ARPANET(Internet 前身)已经运行多年,美国各大学和研究机构的主机数量达到 200 多台。R. Kahn,是 TCP/IP 协议的开发者之一,是对 Internet 的发展起了关键作用的人物之一,当时是 DARPA 信息处理技术中心的负责人。他计划将 ARPANET 通信方法扩展应用至传感器网络中。该网络假定由许多空间上处于分散的、低成本的传感器节点构成,节点间可以相互合作,但各自自主运行,并将各节点的信息路由到最需要这些信息的节点。

对于当时的研究发展水平而言,该研究项目是极富有挑战性的。在这一阶段,个人电脑和 workstation 还未出现;计算机处理主要集中在运行 Unix 和 VMS 操作系统的微型计算机,如 PDP-11 以及 VAX 机;调制解调器工作在 300~9600B,以太网刚刚开始流行初期。

DSN 研究小组在 1978 年确定了 DSN 系统的技术构成^[4]:声学传感器,适用于资源共享网络中一般应用进程间通信的高层次通信协议,包括传感器节点自定位算法的处理技术和其他算法,以及用于动态可编辑分布式系统和语言设计的分布式软件。DSN 研究小组使用人工智能 AI 技术,来帮助理解信号和评估环境^[5,6],以及解决多种不同的分布式问题^[7-9]。既然没有现成的技术可用,DSN 研究小组不得不解决分布式计算支持、信号处理、跟踪以及试验台的问题。

美国卡内基梅隆大学 CMU 的科研人员曾致力于研发能够为容错的 DSN 系统提供灵活透明访问分布式资源的网络操作系统。最初的研发系统称为 ACCENT 的面向通信的操作系统^[10],支持透明组网、系统重新配置以及绑定功能。后来,该系统逐渐发展为 MACH 操作系统^[11],并得到了商业认可。卡内基梅隆大学其他的研究内容还包括^[11]:研发用于网络进程间通信的协议来支持通信计算的动态绑定、构建分布式系统软件的接口

规范语言、研发 DSN 动态负载均衡和容错重新配置的系统。所有这些研究都是在以太网互联的 VAX 机上构建的室内测试台(声学传感器)完成。

美国麻省理工学院 MIT 的研究人员关注于基于知识的信号处理技术^[12],采用信号提取和匹配技术,通过部署的阵列分布式的声学麦克风实现对直升机的跟踪定位。研究人员提供了一个概念框架,将其设想成为类似于人在交互式信号处理过程中以及对现实世界信号的理解和翻译过程中使用的信号处理系统。MIT 为 DSN 数据分析和算法开发专门研发了一套信号处理语言和交互式计算环境 SPLICE。

具体到处理环节,在分布式环境中跟踪多个目标,显然比集中跟踪实现难度更大。在 20 世纪 80 年代,能够应对高的目标密度、漏检和误警率等困难环境的多重假设追踪算法研发成功,该算法可以被分解以适应分布式实现^[13,14],现在该算法已经发展成为解决困难环境中跟踪问题的标准方法。

美国麻省理工学院林肯实验室随后研发了对低飞航空器的声学追踪实时测试床^[15]。传感器是声学阵列,包括 9 个麦克风,部署于 3 个同心三角,最大间隔为 6m。PDP11/34 型计算机和一个阵列处理器对声学信号进行处理。用于目标跟踪的节点计算机由 3 个配有 256kB 存储器的 MC68000 处理器(512kB 的共享存储器)和一个定制的操作系统构成。通信主要依靠以太网和微波无线电。

3) 20 世纪 80 年代和 90 年代期间的军用传感器网络

尽管传感器网络技术的早期研究人员已经考虑到大量采用微小的传感器来构成网络,但是微型传感器技术在 20 世纪 80 年代和 90 年代期间还没有得到很好的发展。但军方人员还是很快意识到了传感器网络的好处。传感器网络逐渐成为以网络为中心的武器装备中的关键构成^[17,18]。在基于平台的武器装备中,平台“拥有”特定的武器,这些武器以相对固定的架构拥有传感器。换句话说,传感器和武器被独立的平台安装,并由这些独立运行的平台控制。在基于网络的武器装备中,传感器不一定安装在武器或是平台之上,它们通过通信网络实现相互合作,信息被发送到适当的“射手”。传感器网络可以通过多次观测现象、扩展的检测范围以及加速响应时间,来改进监测和跟踪性能。而且,充分利用商业网络技术和普通的网络接口,会降低系统开发成本。

基于网络的武器系统的一个典型案例是由美国海军开发的网状传感器系统 CEC^[19](Cooperative Engagement Capability)。该系统由多个负责收集空中目标数据的雷达构成,数据的采集是由“具有汇报功能”的处理节点以及其他处理各自监测区域的节点采集数据的共享和关联来完成的。由于所有的节点对基本信息具有相同的访问权限,该系统获得了一个可持续军事行动的“公共态势图”。其他的军用传感器网络包括:像固定分布式系统 FDS 和高级可部署系统 ADS 等用于反潜战的声学传感器阵列;像远程战场传感器系统 REMBASS 和战术远程传感器系统等无人值守地面传感器 UGS^[20]。

1.1.2 无线传感器网络的研究现状

计算技术和通信技术的进步带动了传感器网络研究的重大转变,并且使它越来越接近最初的愿景。基于微电子机械系统 MEMS 的体积微小的、廉价的传感器技术、无线组网技术以及廉价的低功耗处理器技术的发展,使适用于不同应用的无线 Ad Hoc 网络的部署应运而生。美国国防部高级研究计划署 DARPA 利用最新的技术进步,再一次启动传

传感器网络的研究计划^[21]。

最近完成的 DARPA 传感器信息技术项目 SensIT^[22] 的两个关键研究和发展目标是：
①研发新的组网技术。在战场的特殊环境，这些传感器装备或节点需要能够以 Ad Hoc 方式在高度动态的环境中迅速部署。现在的网络技术，适用于固定基础设施上的语音和数据的传输，不足以满足战场的需求。该项目研发了适用于高度动态的 Ad Hoc 环境中的新的网络技术。
②网络信息处理技术，例如如何从部署的传感器网络中提取有用、可靠、及时的信息。这意味着可以利用由这些传感器创建的分布式计算环境，来处理网络中的信号、信息以及传感器网络中的动态和交互式的查询及其他任务。

SensIT 具有和现在使用的传感器相关的新的能力。例如，目前实现边界安全的自动策略安全系统 TASS^[22] 是专用的而非可编程的。TASS 系统使用基于只负责传输的节点技术以及远程范围内的监测机制。而 SensIT 网络具有与之不同的功能：该网络系统是交互式、可编程的，可以实现动态的查询和任务分布；系统的多任务功能允许多个并发用户；由于传感器系统的监测范围较小，系统软件和算法可以利用所受威胁的邻近设备，来明显改进监测和追踪的准确度；软件和整个系统设计支持低延迟、节能的操作、内置的自治和生存能力，以及较低的探测概率的操作。SensIT 传感器网络可以支持监测、识别、对威胁的跟踪以及目标确定、通信等任务。

1.1.3 传感器网络技术的发展趋势

现在的传感器网络可以利用 20 年前没有的技术完成当时几乎不可想象的功能。传感器、处理器以及通信设备变得越来越小，越来越便宜。Ember, Crossbow 以及 Sensoria 等商业公司正在构建小型传感器节点以及部署传感器网络系统，为我们的日常生活提供了一个远景：我们的生活质量会因这些微小的、嵌入式的传感器节点构成的网络而改善。除了来自于这些公司的产品，商家现成的个人数字助理 PDA 使用掌上电脑操作系统，具有强大的计算能力。这些设备都可以轻易地固化到传感器网络中，担当网络中有处理能力的节点，其中有些设备甚至具有内置的传感能力，例如相机。这些功能强大的处理器可以和 MEMS 设备以及具有大量数据库和通信平台的机器相关联，从而带来一个由技术先进的传感器网络构成的新时代。

基于 IEEE 802.11 标准的无线网络可以提供的带宽已经接近有线网络可以提供的带宽能力。传感器网络可以提供低能耗高性能的应用。IEEE802.15 标准已被定义为个人区域网 PAN 的标准，网络半径为 5~10m。近距离的传感器网络技术是 PAN 中采用的理想技术。IEEE 鼓励短距离内通信技术和算法的研发，以确保低成本传感器网络技术的持续发展^[23,24]。而且，芯片容量以及处理器产品能力的增加会使计算、通信对每个比特的能量需求降低。传感、计算以及通信功能可以在单一芯片上实现，从而进一步减少芯片成本以及实现大量传感器节点的部署和应用，这已成为传感器网络发展的必然趋势。

未来随着 MEMS 技术的发展，具有更强能力以及功能更加多样化的传感器节点将会应运而生。例如，美国加州大学伯克利分校，在 20 世纪 90 年代后期完成智能 Dust 研究项目^[25]，研发出能够感知、通信、体积微小以至于能够放入到立方毫米大小的空间的传感器芯片。由这些无处不在的、低成本、可任意处置的微型传感器构成的无线网络，可以在许多新型的应用中提供近距离的监测能力。图 1-3 显示了不同类型传感器节点的大小。

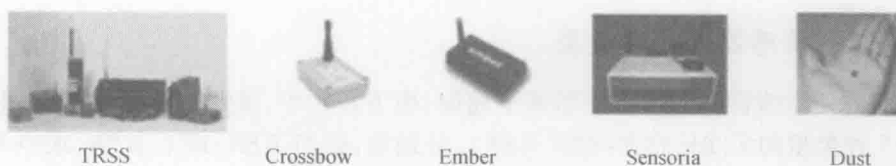


图 1-3 不同传感器节点的大小

1.2 无线传感器网络的特点

目前,无线网络包括移动通信网、无线 LAN、蓝牙网络、Ad Hoc 网络等多种不同类型。和 Ad Hoc 网络类似,无线传感器网络有许多特殊性,体现在其移动性、开关特性以及节点电池能量的有限性等诸多方面。与这些无线网络相比,无线传感器网络的独特性,主要体现在如下几个方面^[25]:

(1) 计算能力。由于传感器节点成本、大小以及电池能量的有限,使得传感器节点的程序空间和存储空间非常有限,从而节点计算能力受限。

(2) 电池能量。传感器节点往往由于电能耗尽而失效或被丢弃。因此,路由协议和算法实现应该将节约能量消耗事先考虑进来。节点用于传输数据信息的能量消耗要多于节点完成计算的能量消耗,例如:传感器节点传输 1b 数据的能量消耗可以用来执行 3000 行计算指令。因此,如何在传感器网络运行的过程中节能从而使无线传感器网络的生命周期最大化,是研究人员面临的难题。

(3) 通信能力。传感器网络的通信带宽有限,通信距离往往局限于几十到几百米之间。由于传感器容易受自然环境影响,例如山脉、建筑物等地形障碍以及暴风雨和闪电等天气情况,因此很难维护一个运行平稳的传感器网络。这就要求传感器网络的硬件和软件必须具有健壮性、容错性强、安全性,这也是无线传感器网络的研究方向之一。

(4) 动态性。由于电池能量耗尽或其他故障,传感器节点随时可能从网络中退出。而且在网络运行过程中,可能会有新的传感器节点移动到网络中,或因监测任务需要添加新的节点到现有传感器网络中。这无疑会引起网络拓扑变化,所以要求无线传感器网络拓扑具有重新配置功能和动态自调节能力。

(5) 无中心,自组织。无线传感器网络节点的部署不需要预安装任何网络基础设施。节点电源开启后,传感器节点可以调节自己完成分布式算法,迅速并自动组合构建成传感器网络。

(6) 多跳通信。无线传感器网络中,传感器节点只和自己直接的邻节点通信。如果一个节点需要和自己信号辐射范围之外的其他节点通信,必须依靠中间节点通过多跳路由来传输数据。传统的有线网络多跳路由需要借助网络或路由器来实现跨网段数据的转发,而无线传感器网络中的节点不但可以充当数据收集和发送端,同时还可以充当路由器的角色。

(7) 应用相关。无线传感器网络不同于传统的有线网络,它是高度应用相关的,最终目的是获取监测区域的数据。