

21世纪高等学校物联网专业规划教材

54 57xGD5 54141 01 0545 045

54 57xGD5 54141 01 0545 045

54 57xGD5 54141 01 0545 045

# 无线传感网与TinyOS

◎ 熊书明 辛燕 王良民 编著

54 57xGD5 54141 01 0545 045

54 57xGD5 54141 01 0545 045

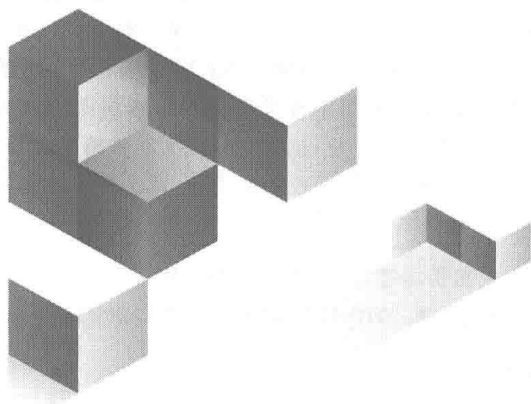
54 57xGD5 54141 01 0545 045

54 57xGD5 54141 01 0545 045

外借



清华大学出版社



# 无线传感网与 TinyOS

◎ 熊书明 辛燕 王良民 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本教材根据物联网工程本科专业的教学需要,结合无线传感网的发展历史、最新趋势和应用现状编写而成,旨在系统阐述无线传感网的核心技术、开发平台,为学习者提供较为全局的视角。教材内容论及近年来国际国内无线传感网的形成历史和 TinyOS 开发平台;分析无线传感网的组织架构和协议栈结构,从平台角度总结出一个无线传感网应用开发的基本要素;随后从无线传感网 MAC 协议、路由协议、时间同步、数据感知与融合方面详细介绍无线传感网关键技术,并简要介绍诸如拓扑控制、节点定位等其他重要技术;最后,从无线传感网应用开发角度重点阐述 TinyOS 系统和 NesC 程序设计语言。

本书主要针对以下读者,包括普通高等院校学习无线传感网课程的本科生,涉及物联网工程、网络工程、计算机应用、通信工程等信息技术类专业;也包括开设无线传感网课程的职业技术学院学生,以及无线传感网工程技术开发人员。最后,普通高等院校的硕士生、博士生也可将其作为了解和开发无线传感网的入门参考教材。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

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

无线传感网与 TinyOS/熊书明,辛燕,王良民编著. —北京:清华大学出版社,2017  
(21 世纪高等学校物联网专业规划教材)  
ISBN 978-7-302-48287-1

I. ①无… II. ①熊… ②辛… ③王… III. ①无线电通信—传感器—网络操作系统—高等学校—教材 IV. ①TP212 ②TP316.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 208266 号

责任编辑:闫红梅 薛 阳

封面设计:刘 键

责任校对:李建庄

责任印制:刘海龙

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)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:19

字 数:467 千字

版 次:2017 年 12 月第 1 版

印 次:2017 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:49.00 元

产品编号:059159-01

物联网是继计算机、因特网之后信息技术的第三次革命浪潮,是一个新兴产业,而物联网工程专业则是教育部为该产业发展特别设立的新专业。无线传感网作为物联网工程专业的一门核心课程,在培养学生专业技能和课程体系建设中起着重要作用,我们总结出近年来课程建设和教学过程中的体会、经验,以开发+平台的视角完成教材内容的编写工作。本书的目的是系统介绍无线传感网的基本概念、发展历程、基本原理和核心技术,以及学术界和工业界流行的 TinyOS 开发平台,给学生较为整体的课程知识,以实践为导向激发其专业学习兴趣。

“形而上者谓之道,形而下者谓之器”。本书在阐述无线传感网理论知识的同时,融入实践的视角组织文字,力求深入浅出。另一方面,在具体介绍无线传感网实践开发时,又力争抽象出工作原理,以原理指导应用开发。因此,本教材“道器”有效融合,既有工作原理的深入分析,也有应用开发的设计实践,点面结合;通过核心技术+开发实践将相关章节有效联系起来,系统性较强。在上述写作方针的指导下,全书共分 10 章,其章节内容组织如图 1 所示。

第 1 章为概述,介绍无线传感网的发展概况、场景应用和发展趋势,并简要阐述无线传感网节点硬件、微操作系统平台、节点开发语言。

第 2 章为无线传感网的组织结构,介绍无线传感网整体结构、协议栈、核心技术、物理层基本概念,并通过具体应用实例,描述无线传感网应用的程序框架,抛出学习问题。

第 3 章为无线传感网 MAC 协议,主要包括无线广播信道、基于竞争的介质访问控制协议和混合介质访问协议,详细阐述 IEEE 802.15.4 标准,简要介绍其他类型的无线传感网 MAC 协议。

第 4 章为无线传感网路由协议,主要包括无线传感网路由协议的特点、路由协议设计的核心问题,详细阐述无线传感网分层路由协议、平面路由协议的设计,重点分析工业标准 ZigBee 网络路由协议。

第 5 章为无线传感网同步技术,包括无线传感网时间同步的必要性、同步技术分类、时间同步模型,详细阐述无线传感网经典的时间同步机制。

第 6 章为无线传感网数据感知与融合技术,主要包括典型传感器网络节点硬件、数据采集板和网关节点,模拟量采集转换的工作原理和组织结构,并以一个实例介绍无线传感网数据感知、采集的系统组成和程序实现。

第 7 章为无线传感网其他核心技术,包括节点的能量管理机制、拓扑控制技术、节点定位技术、网络安全控制。

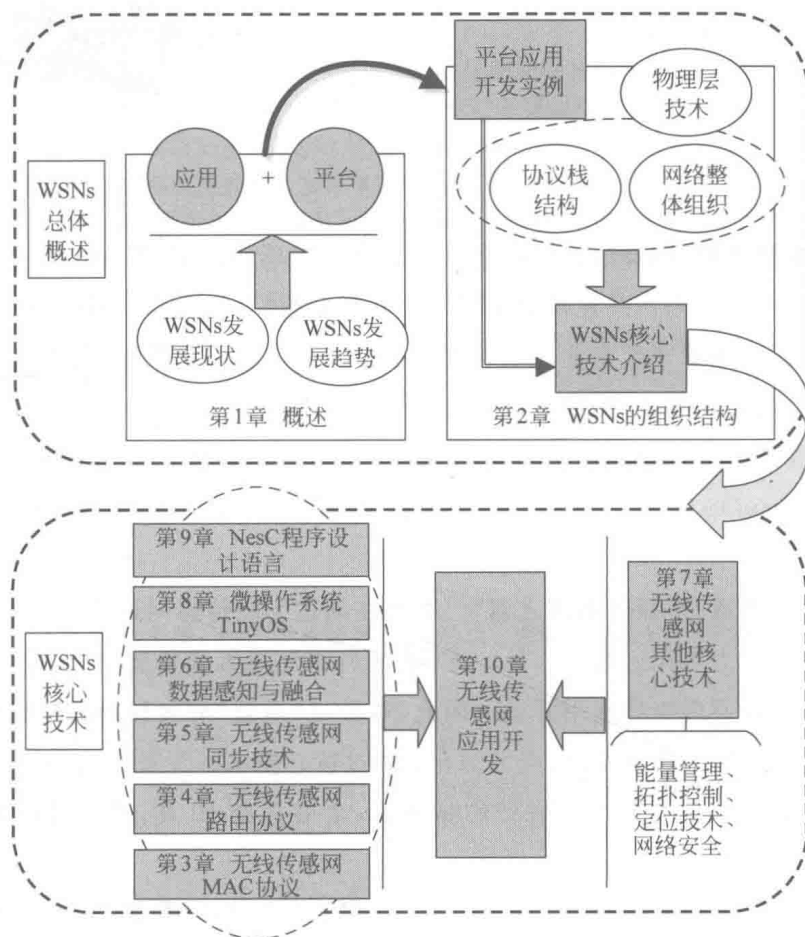


图1 本书章节内容框架结构

第8章为微操作系统 TinyOS, 主要包括 TinyOS 的体系结构、内核调度机制, 重点探讨任务、事件和任务调度模型; 深入分析 TinyOS 及其应用程序的启动过程、TinyOS 的网络协议栈结构和实现、TinyOS 的资源管理。

第9章为 NesC 程序设计语言, 包括 NesC 语言的特点、组成, 重点讨论接口、组件、配置和模块等概念; 深入分析 NesC 程序的运行模型、NesC 语言的程序设计。

第10章为无线传感网应用开发, 以两个实例详细介绍无线传感网的应用开发, 包括基于节点 RSSI 的位置识别、基于树状路由的无线传感网多跳数据传输。

课时安排上, 考虑到各个学校有各自的侧重点, 不同物联网专业办学依托的学科不一样, 因此办学特色也不尽相同, 这些特色将决定该门课程内容讲授范围不尽相同, 建议大致课时为 45~75。对于同一本教材, 由于教学定位不同、教学对象不同, 教学内容也会有所不同, 针对不同院校, 为便于使用, 我们建议的教学内容如表 1 所示, 这些内容可根据实际情况做一定调整。

表1 教学内容建议

教学对象		普通高校物联网工 程本科专业	普通高校其他信息 技术类本科专业	职业技术类
第1章 概述		▲	▲	▲
第2章 无线传感网的组织结构	2.1~2.2	▲	▲	▲
	2.3	▲	▲	
	2.4~2.5	▲	▲	▲
第3章 无线传感网 MAC 协议	3.1~3.2	▲	▲	▲
	3.3	▲		
	3.4	▲	▲	▲
	3.5	▲	▲	
第4章 无线传感网路由协议	4.1~4.2	▲	▲	▲
	4.3~4.4	▲○	○	
	4.5	▲	▲	▲
	4.6	▲	▲	
第5章 无线传感网同步技术	5.1	▲	▲	▲
	5.2	▲		
	5.3	▲○	▲○	▲○
	5.4	▲		
第6章 无线传感网数据感知 与融合技术	6.1	▲○	▲○	▲
	6.2	▲	▲	▲
	6.3	▲	○	
	6.4	▲	▲	▲
第7章 无线传感网其他核心 技术	7.1~7.2	○		
	7.3	▲	○	○
	7.4	○		
第8章 微操作系统 TinyOS	8.1~8.4	▲	▲	▲
	8.5		○	
第9章 NesC 程序设计语言		▲	▲	▲
第10章 无线传感网应用开发	10.1	▲○	▲○	▲
	10.2			○

注:▲表示必讲,○表示内部可选。

本书由无线传感网课程组的老师合作编写。熊书明负责制订了全书的大纲、内容安排和写作风格,负责编写了第2~4章和第8章;第1章由熊书明、辛燕与赵俊杰合写完成;辛燕负责完成第5章和第6章的编写工作;赵俊杰负责完成第7章和第9章的编写工作;包松负责完成第10章的编写工作。熊书明负责完成了全书的统稿、组织和审校工作;研究生郝伟强完成了本书大量插图的绘制工作,胡永娣、王谦、苏远、王文骏参与了书稿的材料收集工作,感谢他们为本书付出的辛勤劳动。在此衷心感谢王良民教授,本教材的撰写来自他对我们国家专业综合改革试点的物联网专业建设安排,最初是他把我带进了传感网研究与物联网教学,这本教材的章节安排以及内容设计多数来自和他商谈讨论中获得的启发,也是他的鼓励和鞭策让我最终负责完成了这本教材的编写。作者所在课题组从2007年开始研究无线传感网及物联网,先后承担了与此有关的国家自然科学基金、国家统计局重点项目等多

项课题,在无线传感网、物联网研究与应用方面积累了较深厚的理论和技术基础,编写过程得到江苏大学重点教材建设项目的支持,在此表示感谢!本教材的相关实验例程来自兼容TinyOS 2.x的韩伯开发套件,并根据需要做了适当调整,同时,教材编写的一些灵感来自无锡泛太公司实验设备使用过程中的经验积累,也参考了众多优秀教材的编写,在此一并衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正,在汲取大家建议和意见的基础上,我们会不断修正、完善本书内容,联系电子邮箱地址:37939881@qq.com。专业建设任重道远,希望本书的出版能为物联网工程专业等的发展尽一份绵薄之力。

熊书明

2017年10月

于玉带河畔

# 目 录

第 1 章 概述	1
1.1 无线传感网发展概况	1
1.1.1 无线传感网简介	1
1.1.2 无线传感网发展的几个阶段	2
1.1.3 无线传感网的主要特点	3
1.2 无线传感网的应用	5
1.3 无线传感网开发平台简介	8
1.3.1 节点硬件	8
1.3.2 无线传感网微操作系统	10
1.3.3 应用开发语言	11
1.4 无线传感网发展趋势	13
习题	14
第 2 章 无线传感网的组织结构	15
2.1 无线传感网组织	15
2.1.1 无线传感网总体结构	15
2.1.2 节点通信模块	16
2.1.3 控制器模块	17
2.1.4 节点其他模块	18
2.2 二维协议栈结构	20
2.3 无线传感网的物理层	23
2.4 无线传感网核心技术	27
2.5 简单无线传感网节点应用实例	29
2.5.1 应用的整体框架	30
2.5.2 应用程序的功能实现	30
2.5.3 值得思考的问题	31
习题	32
第 3 章 无线传感网 MAC 协议	33
3.1 无线广播信道	33
3.2 无线传感网 MAC 协议概述	37
3.3 竞争的介质访问协议 S-MAC	41



3.3.1	协议特点 .....	41
3.3.2	节点的侦听与睡眠 .....	42
3.3.3	介质访问的冲突避免 .....	48
3.3.4	协议的通信结构设计 .....	51
3.3.5	协议的实现 .....	52
3.3.6	时延分析与性能测试 .....	54
3.4	混合介质访问 IEEE 802.15.4 标准 .....	60
3.4.1	802.15.4 概述 .....	61
3.4.2	物理层 .....	63
3.4.3	MAC 层帧结构 .....	68
3.4.4	MAC 子层 .....	70
3.5	其他无线传感网 MAC 协议 .....	76
	习题 .....	80
<b>第 4 章</b>	<b>无线传感网路由协议 .....</b>	<b>81</b>
4.1	无线传感网路由概述 .....	81
4.2	路由设计的核心问题 .....	83
4.3	无线传感网层次结构路由协议 .....	84
4.3.1	LEACH 协议 .....	84
4.3.2	链路估计父节点选择协议 .....	89
4.3.3	汇聚树协议 CTP .....	93
4.4	无线传感网平面结构路由协议 .....	98
4.4.1	洪泛路由协议 Flooding .....	98
4.4.2	定向扩散路由协议 DD .....	98
4.4.3	AODV 路由协议 .....	102
4.5	ZigBee 路由协议 .....	109
4.5.1	ZigBee 概述 .....	109
4.5.2	ZigBee 协议栈 .....	110
4.5.3	ZigBee 拓扑结构 .....	111
4.5.4	网络层帧结构 .....	113
4.5.5	ZigBee 协议的路由机制 .....	116
4.6	其他无线传感网路由协议 .....	119
	习题 .....	122
<b>第 5 章</b>	<b>无线传感网同步技术 .....</b>	<b>123</b>
5.1	同步技术简介 .....	123
5.1.1	WSN 时间同步的必要性 .....	123
5.1.2	WSN 时间同步分类 .....	124
5.2	时间同步模型 .....	125

5.2.1	时钟模型	126
5.2.2	通信模型	127
5.2.3	时间同步的误差源	130
5.3	无线传感网时间同步机制	132
5.3.1	时间同步的性能指标和技术挑战	132
5.3.2	RBS 时间同步协议	133
5.3.3	TPSN 时间同步协议	135
5.3.4	LTS 时间同步协议	137
5.4	时间同步协议的分析比较	139
	习题	141
<b>第 6 章</b>	<b>无线传感网数据感知与融合技术</b>	<b>142</b>
6.1	无线传感网节点	142
6.1.1	Mcia 系列感知节点	143
6.1.2	其他感知节点	144
6.1.3	传感器与传感器板	146
6.1.4	网关节点	148
6.2	节点数据感知与采集	149
6.2.1	节点数据采集模块的构成	149
6.2.2	A/D 与 D/A 转换	149
6.2.3	A/D 转换芯片 ADC0809	152
6.3	无线传感网数据融合技术	153
6.3.1	数据融合的定义和必要性	153
6.3.2	无线传感网数据融合的分类	154
6.3.3	簇内数据融合技术	157
6.3.4	网络层数据融合技术	159
6.4	无线传感网数据采集实例	162
6.4.1	数据采集系统组成	162
6.4.2	数据采集系统的功能实现	163
	习题	169
<b>第 7 章</b>	<b>无线传感网其他核心技术</b>	<b>170</b>
7.1	能量管理	170
7.1.1	节点级低功耗技术	171
7.1.2	网络级能量管理	172
7.1.3	应用级能量管理	173
7.2	拓扑控制	175
7.2.1	分层拓扑控制	175
7.2.2	功率调节拓扑控制	178

7.3	定位技术 .....	180
7.3.1	GPS 定位系统 .....	181
7.3.2	基于距离的定位技术 .....	184
7.3.3	距离无关的定位技术 .....	187
7.4	网络安全 .....	188
7.4.1	无线传感网的安全威胁 .....	188
7.4.2	两类密码体制 .....	190
7.4.3	无线传感网路由安全 .....	192
	习题 .....	193
<b>第 8 章</b>	<b>微操作系统 TinyOS .....</b>	<b>195</b>
8.1	TinyOS 概述 .....	195
8.1.1	TinyOS 简介 .....	195
8.1.2	TinyOS 体系结构 .....	196
8.1.3	TinyOS 的安装 .....	197
8.2	内核调度机制 .....	198
8.2.1	任务 .....	198
8.2.2	事件 .....	199
8.2.3	任务调度模型 .....	201
8.2.4	调度器的实现 .....	202
8.3	TinyOS 的启动 .....	207
8.3.1	内核启动的过程 .....	207
8.3.2	应用组件初始化 .....	213
8.4	TinyOS 的网络协议栈 .....	214
8.4.1	TinyOS 网络协议栈概述 .....	214
8.4.2	主动消息机制 .....	216
8.4.3	相关访问接口 .....	217
8.5	TinyOS 的资源管理 .....	220
8.5.1	资源概述 .....	220
8.5.2	资源的访问接口 .....	223
8.5.3	微控制器电源管理 .....	227
8.5.4	通信模块电源管理 .....	231
8.5.5	外设电源管理 .....	232
	习题 .....	233
<b>第 9 章</b>	<b>NesC 程序设计语言 .....</b>	<b>234</b>
9.1	NesC 语言概述 .....	234
9.2	NesC 语言程序的组成 .....	235
9.2.1	接口 .....	235

9.2.2	组件	236
9.2.3	配置	238
9.2.4	模块	239
9.3	NesC 程序的运行模型	241
9.3.1	任务	241
9.3.2	原子代码	242
9.3.3	内部函数	243
9.3.4	代码的同步和异步	243
9.4	NesC 语言程序设计	245
9.4.1	可视化的组件组织	245
9.4.2	定时器应用	247
9.4.3	模拟量采集	250
9.5	NesC 通信程序设计举例	254
	习题	258
<b>第 10 章</b>	<b>无线传感网应用开发</b>	<b>259</b>
10.1	基于 RSSI 的节点位置识别	259
10.1.1	基于 RSSI 的距离测量原理	259
10.1.2	三角测量法与 Location Engine	261
10.1.3	节点类型初始化和位置识别过程	263
10.1.4	功能实现	264
10.1.5	代码编译与运行测试	273
10.2	利用 Tree 路由的多跳传输	274
10.2.1	Tree 路由实现的原理	274
10.2.2	TestTreeApp 配置文件和模块文件	275
10.2.3	TreeRouting 配置文件和模块文件	279
10.2.4	TestTree 与 TreeRouting 头文件	287
10.2.5	代码编译与运行测试	288
	习题	289
	参考文献	290

本章介绍无线传感网的发展概况、场景应用和发展趋势,并简要描述无线传感网的开发平台,包括节点硬件、传感网微操作系统和节点开发语言等。

## 1.1 无线传感网发展概况

无线传感网(Wireless Sensor Networks, WSNs)简称无线传感网,其综合了传感器技术、嵌入式计算、短距离无线网络通信、分布式信息处理以及微机电技术等,能够协作实时监测、感知和采集监测对象信息,通过节点嵌入式系统对信息进行处理,以及通过自组织网络多跳中继方式将信息传送到终端用户,从而实现“无处不在的计算”理念。

### 1.1.1 无线传感网简介

无线传感网是一种新型短距离无线通信网络,对其最早的研究来源于美国军方项目,作为新一代通信网络,具有广泛的应用前景,各国都非常重视无线传感网的发展和应用。无线传感网是继 Internet 之后,将对 21 世纪的人类生活方式产生重大影响的 IT 技术之一,美国的《商业周刊》杂志将无线传感网列为 21 世纪高新技术领域的 4 大支柱型产业之一。同时,MIT 的《技术评论》2003 年在论述未来新兴十大技术时,更是将无线传感网列为第一。此外,美国《今日防务》杂志认为无线传感网的应用和发展将引起一场划时代的军事技术革命和未来战争变革。因此,如果说 Internet 构成了逻辑上的信息世界,改变了人与人之间的沟通方式,那么,无线传感网就是将逻辑的信息世界与客观的物理世界紧密融合在一起,改变了人与自然界的交互方式。从而,未来人们将通过普遍的传感器网络直接感知物理世界,极大地扩展网络功能和人类对世界的认知能力。

2009 年,美国 IBM 公司提出的“智慧地球”计划正是构建在无线传感网之上;同年,温家宝对无锡“感知中国”项目做出重要指示,将以传感网为基础的物联网作为我国战略性产业重点支持。因此,可以预计,无线传感网的广泛应用将是一种必然趋势,它的出现和广泛应用将给人类社会带来极大变革。随着传感器技术、无线通信技术与嵌入式计算技术等不断进步,低功耗、多功能、智能化的传感器将得到快速发展,这些传感器在微小体积内能够集成信息采集、数据处理和无线通信等多种功能,由其构成的无线传感网将普遍存在。无线传感网节点之间通过无线通信方式,形成一个多跳自组织网络系统,其目的是协作感知、自动采集和智能处理网络覆盖区域内被感知对象的信息,并发送给后端用户。无线传感网所

属传感器节点类型众多,可用来探测包括地震、电磁、温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分、物体大小、移动速度和方向等环境信息。这些传感器节点以随机投放方式部署在监控区域内,通过无线信道相连,自组织构成一个多跳无线网络。用户使用无线传感网来检测监控环境,自动收集感知数据,然后通过无线收发模块,采用多跳转发方式将数据发送给远程汇聚节点(即 Sink 节点),再通过汇聚节点连接 Internet 将数据传送到远程后端用户,从而达到对目标区域的远程监控。该监控方式通过各类集成化的微型传感器智能协作,实时监测、自动感知、可靠传输各种感兴趣的监测信息,最终实现物理世界、信息空间和人类社会的高效融合。

### 1.1.2 无线传感网发展的几个阶段

无线传感网是集信息采集、传输、处理于一体的综合智能网络信息系统,具有广阔的应用前景,通常由成千上万的微型传感器节点构成一种具有动态拓扑结构的自组织网络。随着网络通信和传感器相关技术的不断发展,无线传感网的发展也经历了三个阶段。

#### 1. 传感器网络发展的第一阶段

无线传感网的研究和使用最早可追溯到冷战时期,美国在其战略区域内布置了声学监视系统,用于监测和跟踪静默下的苏联潜艇,SOSUS(SOund SUrveillance System)就是这样一种声学传感器水下测声仪系统,安装在海底。之后,美国军方又开发了其他较复杂的声学监测网络,用于海底潜艇监视,随后又进一步建立了雷达防空网络用于保护美国大陆和加拿大。1978年,为使传感器网络能在军事和民用领域被广泛应用,美国国防高级研究计划局(DARPA)发起了分布式传感器网络研讨会。随着无线传感网在军用监视系统的应用,人们开始逐步对传感器网络在普适环境下的应用展开研究。1980年,DARPA又提出了“分布式传感器网络计划(DSN)”,确定了DSN项目的技术组成,包括声学传感器、通信协议、信号处理技术和算法、分布式软件等,人们把这个阶段归结为第一代传感器网络发展阶段。

#### 2. 传感器网络发展的第二阶段

20世纪80年代至20世纪90年代,美国海军研制了协同交战能力系统(Cooperative Engagement Capability, CEC)、用于反潜的确定性分布系统(Fixed Distributed System, FDS)、高级部署系统(Advanced Deployment System, ADS),以及远程战场传感器网络系统(Remote Battlefield Sensor System, REMBASS)等无人看管的传感器网络系统。这个阶段,传感器网络具备获取多种信号信息的综合能力,采用丰富的接口与传感控制器相连,构成了具有信息综合和处理能力的传感器网络。1994年,加州大学洛杉矶分校的William J. Kaiser向DARPA提交建议书*Low Power Wireless Integrated Microsensors*,这是一个里程碑事件,大大促进了无线传感网的进一步发展。1998年,Gregory J. Pottie阐释了无线传感网的科学意义,同时,DARPA投巨资启动了SensorIT项目,目标是实现“超视距”的战场监测,该计划的发起使得人们对无线传感网系统的兴趣持续增长。SensorIT主要研究用于大型分布式军用传感器系统的无线Ad Hoc网络,在此计划中由25个机构资助了总计29个研究项目。这些项目的根本目的是研究无线传感网的理论和实现方法,并在此基础上研制如何具体使用,这些研究为后来无线传感网的发展打下了重要基础,具有重大意义。

1999年9月,商业周刊将无线传感网列为21世纪最重要的21项技术之一。此外,美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)提出了“网络就是传感器”的论断。

在美国自然科学基金委员会的推动下,美国加州大学伯克利分校、麻省理工学院、康奈尔大学、加州大学洛杉矶分校等开始了无线传感网的基础理论和关键技术研究,英国、日本、意大利等国家的一些大学和研究机构也纷纷开展该领域的研究工作,我国中国科学院、清华大学、上海交通大学等也较早开展了这方面研究。这些国内外机构针对不同方向,开展了不同的研究,先后提出了拓扑控制协议、功率控制机制、数据融合方法、路由协议、介质访问协议、传感网安全机制等一系列成果,极大地推动了无线传感网的发展。

### 3. 传感器网络发展的第三阶段

进入21世纪后,传感器网络在得到各国政府和研究机构的普遍重视后,发展更为迅猛。2004年,国际 *IEEE Spectrum* 杂志发表一期专辑文章,名为传感器的国度,集中论述了 WSNs 的发展和可能的广泛应用。2006年,我国发布了《国家中长期科学与技术发展规划纲要》,为信息技术确定了三个前沿方向,其中有两个与 WSNs 的研究直接相关,即智能感知技术和自组织网络技术。随着无线传感网的迅速发展,普适计算的技术理念在无线传感网平台上也得到了很好的实践和延伸,未来的泛在传感器网络(Ubiquitous Sensor Networks, USNs)必将为普适计算提供良好支撑。作为实现普适计算的一个重要途径,泛在传感网能够很好地实现环境信息感知、多通道交互;同时,通过现有的网络基础,比如小型局域网、Internet、3G/4G/5G等,以实现服务数据的远程传输,最后,终端用户利用普适设备随时随地获取服务信息。借助于大量分布在我们四周的无线传感网,可以实时检测周围物理环境变化,将物理现象信息化,从而把逻辑上的信息世界与真实的物理世界融合在一起,将深刻影响和改变人类与自然的交互方式。

## 1.1.3 无线传感网的主要特点

相比较于传统无线自组网(Ad Hoc Networks),无线传感网与之具有相似之处,但是,更存在明显不同和特殊的应用目标。无线自组网主要以传输数据为目标,关注不依赖于任何基础设施的移动自组织行为,为用户提供高质量的数据传输服务;而无线传感网以数据为中心,将能量的高效性作为首要设计目标,专注于从监测环境获取有效信息。无线传感网具有如下主要特点。

### 1. 网络规模大

为了使获取的信息尽可能完整、精确,同时,克服节点资源受限带来的脆弱性,通常在监测区域内高密度部署大量传感器节点,节点数量巨大,可能达到成千上万。传感器网络规模大包含两方面含义,一方面是传感器节点分布在很广的地理区域内;另一方面,传感器节点部署很密集,单位面积内所拥有的网络节点数量较多。这种大规模部署使得无线传感网通过不同空间视角获得更大信噪比的信息,分布式大批量信息采集与处理能够提高检测的精度,降低对单个传感器节点的精度要求。此外,大量冗余节点的存在使得网络系统具有良好的容错性能,减少监测盲区。

## 2. 拓扑结构易变

无线传感网节点可能会因为环境因素或能量耗尽而出现故障,导致节点死亡失效、退出网络运行,从而改变感知网络结构。为了弥补失效节点,需要适时补充新节点进入网络。此外,部分节点的移动性和无线通信链路质量的改变,也会使网络结构易于变化。因此,要求传感器网络能够适应拓扑结构的变化,具有动态的网络拓扑组织能力。

## 3. 自组织性

在典型无线传感网中,所有节点地位平等,没有预设的网络中心,各节点通过分布式算法相互协调,在没有人工干预和任何其他预置网络设施的情况下,各节点自组织构成网络。由于无线传感网没有严格的中心控制节点,网络通常不存在单点失效问题,使得无线传感网具有良好的抗毁性和鲁棒性。在具体应用无线传感网时,通常情况下传感器节点被放置在没有基础设施的地方,且多数传感器节点的位置无法预先精确获得,节点之间的相互邻近关系也难以预先掌握。因此,要求传感器节点具有自组织能力,能够自动进行配置和管理,通过拓扑控制机制和网络协议自动形成多跳无线网络。

## 4. 以数据为中心

无线传感网是一个任务型网络,由于传感器节点随机部署,构成的网络系统与节点编号之间的关系完全动态,表现为节点编号与节点位置没有必然联系。用户使用传感器网络查询感兴趣的事件时,直接将所关心的事件通告给网络,而不是通告给某个确定编号的节点,网络在获得指定事件信息后将其反馈给用户。这种以数据本身作为查询目的的工作机制,更接近于我们用自然语言交流的习惯,因此,传感器网络是一个以数据为中心的网络。

## 5. 节点资源受限

传感器节点主要依靠电池供电,其携带的电池容量相当有限,因此,节点的主要目标之一是如何在完成任务的情况下,尽可能延长寿命。作为一种弱化的嵌入式计算设备,且考虑到成本因素,节点上的处理器核心单元通常选用功能较弱的处理芯片,节点的处理速度相对较慢,存储容量偏小。此外,节点的通信模块占到节点能耗的很大一部分,同样是为了降低能耗,节点的通信能力往往也受到一定限制,考虑到通常节点通信能耗与通信距离的三次方成正比关系,因此,其通信距离一般限制在较小范围内。

## 6. 应用相关性

客观世界的物理量异常丰富、种类繁多,不同的传感器网络应用关心不同的物理量,因此,对该网络应用系统也有不同需求。在不同的应用场景下,系统对传感器的要求往往不相同,其节点硬件平台、软件系统和网络协议实现也必然存在很大差异。因此,传感器网络不会像 Internet 一样有统一的通信协议标准,对于不同的传感器网络应用,虽然存在一些共性问题,但在开发传感器网络应用时,需要更加关注传感器网络应用的差异性。



## 1.2 无线传感网的应用

无线传感网由具有感知、计算和通信能力的传感器节点以无线通信方式构成一种多跳、自组织网络,通过大量节点间的分工协作,实现实时监测、感知以及采集监控区域内各种环境或监测对象的数据,并将获得的感知数据发送给所需用户。无线传感网的应用前景非常广阔,在军事、环境、医疗、家居和其他商业、工业领域均有广泛应用;另外,在空间探索和反恐、救灾等特殊领域也具有明显的技术优势。随着无线传感网的深入研究,无线传感网将逐渐深入到人们生活的许多领域。

### 1. 军事应用

无线传感网的相关研究最早起源于军事领域,其具有可快速部署、自组织、隐蔽性强和容错性高的特点,易于实现对敌军地形和兵力布放及装备监控、战场实时监控、目标定位、战场评估等功能。

通过飞机或其他手段在敌方阵地大量部署各种传感器,对潜在的地面目标进行探测与识别,可以使己方以远程、精确、低代价、隐蔽的方式近距离观察敌方布防,迅速、全方位地收集利于作战的信息,并根据战况快速调整和部署新的无线传感网,从而及时发现敌方企图和对我方的威胁程度。传感器网络节点随机布设,且数量大,即使一部分传感器节点被敌方破坏,剩下的节点依然能够自组织地形成网络。传感器网络可以通过对目标的可见光、无线电通信、人员部署等信息进行收集、传输,并经过后台管理节点进行相关指标分析,一方面使得作战指挥员能够及时准确地进行战场目标毁伤效果评估,为实施正确的决策提供科学依据;另一方面,也可以最大限度地依据对方兵力部署优化打击火力的配置,大大提高作战资源利用率。在核生化战争中,对爆炸中心附近及时、准确的数据采集工作非常重要且危险,能否在最短时间内监测到爆炸中心的相关参数、判断爆炸类型,并对产生的破坏情况进行估算,这些都是快速采取应对措施的关键,因此,常常需要专业人员携带特殊装备进入危险区进行探测。但是,通过无人机、火箭弹等方式向爆炸中心附近布设传感器网络节点,依靠节点的自组织工作,WSN 系统自动进行数据采集,则可以快速获取爆炸现场精确的探测数据,从而避免核反应环境下探测数据受到核辐射的威胁。

目前,传感器网络已经成为军事 C4ISRT 系统不可或缺的重要组成部分,受到军事发达国家的普遍重视,各国均投入大量人力和财力进行研究和应用。美国 BAE 系统公司应美国军方之邀,为提高美军的电子战能力而研发了“狼群”地面无线传感网系统,是一个典型的无线传感器电子信号检测网络,具有多功能电子战能力,不仅可以监听敌方雷达和通信、分析敌方的网络信号,还可以干扰敌方电子设备、渗透计算机。美国科学应用国际公司采用无线传感网构建了一个电子周边防御系统,为美国军方提供军事防御和情报信息。在此系统中,采用多枚微型磁力计传感器节点探测是否有人携带枪支,以及是否有车辆驶来;同时,利用声音传感器,该系统还可以检测车辆或移动人群的存在。

### 2. 环境应用

随着人们对环境的日益关注,无线传感网由于部署简单、布置密集、低成本、无须现场维