

传感网原理与技术

李士宁 等编著



机械工业出版社
China Machine Press

国家重点图书出版规划

物联网工程专业规划教材

传感网原理与技术

李士宁 等编著



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目(CIP)数据

传感网原理与技术 / 李士宁等编著. —北京: 机械工业出版社, 2014.4
(物联网工程专业规划教材)

ISBN 978-7-111-45968-2

I. 传… II. 李… III. 无线电通信 - 传感器 - 高等学校 - 教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 033981 号

本书根据《高等院校物联网工程专业发展战略研究报告暨专业规范(试行)》和物联网工程本科专业的教学需要, 结合传感网的最新发展及其应用现状编写而成。主要包括传感网的概述, 通信协议, 数据管理技术, 拓扑控制、能量管理、时间同步、节点定位等传感网关键技术, 应用开发技术和基于 TinyOS 的传感网实验。本书侧重介绍传感网的基本概念和关键技术, 力求做到理论联系实际、概念准确、图文并茂。

本书主要针对以下读者群体: ①普通高等院校学习传感网课程的本科生, 涉及物联网工程、计算机、电子、通信和自动化等信息技术类专业; ②开设传感网课程的高职高专生; ③普通高等院校的硕士生、博士生, 可将其作为了解传感网的入门参考; ④工程技术开发人员, 可将本书作为参考书。



出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 朱秀英

印 刷: 北京瑞德印刷有限公司

版 次: 2014 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 16

书 号: ISBN 978-7-111-45968-2

定 价: 39.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

物联网工程专业规划教材

编 委 会

编 委 会 主 任 邬贺铨（中国工程院院士）

编委会副主任 傅育熙（上海交通大学）

蒋宗礼（北京工业大学）

王志英（国防科技大学）

陈道蓄（南京大学）

编委（以姓氏拼音为序）

桂小林（西安交通大学）

黄传河（武汉大学）

蒋建伟（上海交通大学）

李士宁（西北工业大学）

秦磊华（华中科技大学）

王 东（上海交通大学）

温莉芳（机械工业出版社）

吴功宜（南开大学）

朱 敏（四川大学）

秘 书 朱 劼



前言

物联网被称为继计算机、互联网之后,世界信息产业的第三次浪潮。2012年,国务院将以物联网为代表的新一代信息技术列为重点培育和发展的战略性新兴产业。2013年,教育部将“物联网工程”专业(专业代码:080905)列入了计算机类专业。

“物联网工程”是一个新兴专业,这决定了专业建设没有成熟的、体系化的经验可以借鉴,专业建设极具探索性。为探讨并解决这些问题,在教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导分委员会(以下简称计算机教指委)的指导下,成立了“物联网工程专业教学研究专家组”(以下简称专家组),开始体系化地推进物联网工程专业建设和教学研讨工作,制定了《高等学校物联网工程专业发展战略研究报告暨专业规范(试行)》(以下简称“规范”),由机械工业出版社出版^①。规范定义了该专业核心课程的教学大纲及涵盖的知识单元。

“传感网原理与技术”是物联网工程专业的核心课程,本书按照“规范”的精神编写,便于在教学中与其他核心课程衔接。传感器网络(以下简称传感网)具有明显的多学科交叉特征,因此,原来从事计算机、通信、自动控制等专业领域研究的工作者纷纷从不同角度切入该领域,从不同技术层面开展传感网的研究工作。国内外研究者投入了大量精力,积极开展传感网标准、技术和应用方面的研究和开发工作。我国把传感网列入长期发展规划之中,特别是2010年远景规划和“十五”计划中已将无线传感网列为重点发展的产业之一。作者所在课题组从2003年开始从事传感网的研究,先后承担了与传感网相关的国家自然科学基金、国家重大专项、物联网专项、国家863计划等多项相关课题,在传感网研究与应用方面有较为深厚的技术积累,其中一项传感网应用成果入选国家“十一五”重大科技成就展。我们希望将传感网理论研究和工程实践方面的研究成果与大家共享,这

^① 该书已由机械工业出版社于2012年出版,书号为978-7-111-36803-8。——编辑注

正是编写此书的初衷。

本书系统地介绍了传感网的基本概念、基本理论和关键技术。全书共分 6 章。第 1 章主要介绍传感网的历史发展、基本概念和体系结构。第 2 章根据通信协议分层结构阐述了传感网各层协议的设计目标和典型的协议标准，特别对 6LoWPAN 标准进行了详细介绍，该标准允许在传感网中传输 IPv6 数据包。第 3 章介绍传感网的数据管理技术，特别介绍了加州大学伯克利分校研发的传感网数据管理系统 TinyDB。第 4 章介绍了传感网的关键技术，包括拓扑控制、能量管理、时间同步、节点定位技术等，是传感网的重要内容。第 5 章以几个典型应用为案例，介绍了传感网应用设计的基本原理，应用开发、部署与维护阶段的关键技术。第 6 章介绍了适用于传感网的操作系统 TinyOS，以几个案例为基础阐述了如何利用 TinyOS 对传感网的应用进行实验或仿真。各章最后附有参考文献，以供读者进一步学习研究。

本书是西北工业大学计算机学院传感网课题组共同努力的结果，李志刚、杨丽娜、张羽、马峻岩、裘莹、李君伟、张振海、夏先进、段嘉奇、詹东昀、罗国佳等老师与同学参与了编写，感谢他们对本书付出的辛勤劳动。书中引用了其他同行的研究成果，在此表示感谢。最后要特别感谢机械工业出版社华章公司在组织出版和编辑工作中所给予的支持，感谢他们为本书出版付出的辛勤劳动。

由于作者水平有限，书中难免存在疏误之处，希望得到广大读者的指正。在吸取大家意见和建议的基础上，我们会不断修正和完善本书内容，为推动传感网基础理论和技术的进步略尽微薄之力。

李士宁



教学建议

“传感网原理与技术”是物联网工程专业的核心课程，也是计算机、电子、通信和自动化等信息技术类专业的专业课程。本书根据《高等学校物联网工程专业发展战略研究报告暨专业规范（试行）》中对“传感网原理与技术”课程的建议而编写，便于在教学中与其他专业课程的内容相衔接，可作为普通高等院校物联网工程专业以及相关专业的教材，也可作为高职高专学校相关专业的教材。

对于同一本教材，教学对象不同，教学内容也会有所不同。针对不同类型的院校，建议列入教学计划的内容见下表，这些内容可根据实际课时加以调整。

教学对象		普通高校物联网工程专业本科生	普通高校相关专业本科生	高职高专生
第1章 绪论		★	★	★
第2章 传感网通信协议	2.1～2.4节	★	★	★
	2.5、2.6节	◆	◆	◆
第3章 传感网数据管理	3.1、3.2节	★	★	
	3.3节	◆	◆	
第4章 传感网关键技术	4.1、4.2和4.4节	★	★	★
	4.3节	◆		
	4.5节	★		
第5章 传感网应用	5.1～5.3节	★	★	★
	5.4～5.7节	◎	◎	◎
	5.8节	◆	◆	
第6章 基于TinyOS的传感网应用开发	6.1节	◆	◆	★
	6.2～6.3节	★	★	★
	6.5～6.7节	◎	◎	◎
	6.4、6.8节	◆	◆	◆

注：★表示必讲；◎表示任选其中的几节介绍；◆表示自学。

目 录



前言

教学建议

第1章 绪论 /1

- 1.1 传感网的起源与发展 /1
- 1.2 传感网的体系结构 /3
 - 1.2.1 传感器节点体系结构 /3
 - 1.2.2 传感网的网络结构 /4
- 1.3 传感网的核心技术 /5
- 1.4 传感网的主要特点 /7
- 1.5 传感网的应用 /8
 - 1.5.1 军事应用 /8
 - 1.5.2 环境监测 /10
 - 1.5.3 医疗卫生 /12
 - 1.5.4 智能家居 /12
 - 1.5.5 其他方面 /13
- 1.6 传感网与物联网的关系 /13
- 1.7 本章小结与进一步阅读的文献 /14
- 习题1 /14
- 参考文献 /14

第2章 传感网通信协议 /16

2.1 物理层的协议设计 /16

- 2.1.1 IEEE 802.15.4 物理层标准 /17
- 2.1.2 868/915 MHz 频段物理层 /18
- 2.1.3 2.4 GHz 物理层描述 /19
- 2.1.4 各频段通用规范 /20

2.2 MAC 层协议 /21

- 2.2.1 传感网 MAC 协议设计原则 /21
- 2.2.2 IEEE 802.15.4 MAC /21
- 2.2.3 S-MAC /22
- 2.2.4 B-MAC /24
- 2.2.5 RI-MAC /25
- 2.2.6 实例: TinyOS MAC 层协议分析 /26

2.3 路由协议 /29

- 2.3.1 路由协议简介 /29
- 2.3.2 分发协议 /30
- 2.3.3 汇聚协议 /32

2.4 传输层 /42

- 2.4.1 传输层的挑战 /43
- 2.4.2 可靠多段传输协议 (RMST) /44
- 2.4.3 慢存入快取出协议 (PSFQ) /45
- 2.4.4 拥塞检测和避免协议 (CODA) /48

2.4.5 可靠的事件传输协议

(ESRT) /50

2.5 6LoWPAN 标准 /52

2.5.1 6LoWPAN 简介 /52

2.5.2 6LoWPAN 协议栈体系

结构 /53

2.5.3 6LoWPAN 适配层 /54

2.5.4 6LoWPAN 路由协议 /55

2.5.5 6LoWPAN 传输层 /55

2.6 ZigBee 标准 /56

2.7 本章小结与进一步阅读的

文献 /58

习题 2 /58

参考文献 /59

第3章 传感网数据管理 /60

3.1 概述 /60

3.1.1 传感网数据管理系统的体系

结构 /61

3.1.2 传感网数据管理系统的数

据模型 /63

3.2 数据管理技术 /64

3.2.1 数据查询 /64

3.2.2 数据索引 /68

3.2.3 网络数据聚合 /72

3.3 实例: TinyDB 系统 /77

3.3.1 TinyDB 系统简介 /77

3.3.2 TinyDB 的系统结构 /78

3.3.3 TinyDB 系统组成 /78

3.3.4 查询语言 /80

3.3.5 TinyDB 系统仿真 /80

3.4 本章小结与进一步阅读的

文献 /84

习题 3 /85

参考文献 /85

第4章 传感网关键技术 /87

4.1 命名与寻址 /87

4.1.1 基本原理 /87

4.1.2 地址管理 /88

4.1.3 地址分配 /89

4.1.4 基于内容和地理位置寻址 /90

4.2 拓扑控制 /90

4.2.1 概述 /91

4.2.2 功率控制 /92

4.2.3 层次拓扑 /96

4.3 能量管理 /101

4.3.1 概述 /101

4.3.2 能耗优化策略 /102

4.4 时间同步 /107

4.4.1 概述 /108

4.4.2 事件同步 /113

4.4.3 局部同步 /115

4.4.4 全网同步 /118

4.5 节点定位 /121

4.5.1 概述 /121

4.5.2 节点位置的基本计算方法 /124

4.5.3 测距定位 /125

4.5.4 非测距定位 /132

4.6 本章小结与进一步阅读的

文献 /136

习题 4 /139

参考文献 /140

第5章 传感网应用 /144

5.1 概述 /144

5.2 传感网应用设计基本原理 /144

5.2.1 设计因素 /145

5.2.2	架构设计	/146
5.2.3	硬件设计	/147
5.2.4	软件设计	/150
5.3	应用开发、部署与维护技术	/150
5.3.1	开发技术	/151
5.3.2	部署技术	/156
5.3.3	维护技术	/156
5.4	环境监测类案例：精准农业应用	/158
5.4.1	概述	/158
5.4.2	系统架构	/158
5.4.3	软硬件介绍	/159
5.5	事件检测类案例：反狙击系统	/162
5.5.1	概述	/162
5.5.2	系统架构	/163
5.5.3	软硬件介绍	/163
5.6	目标追踪类案例：警戒网	/165
5.6.1	概述	/165
5.6.2	系统架构	/166
5.6.3	软硬件介绍	/166
5.7	案例分析：金门大桥震动监测	/168
5.7.1	应用需求	/168
5.7.2	系统架构	/168
5.7.3	硬件设计	/169
5.7.4	软件设计	/171
5.8	光纤传感技术	/173
5.8.1	光纤传感器	/173
5.8.2	光纤传感系统组成	/174
5.8.3	光纤传感技术的应用	/175
5.9	本章小结与进一步阅读的文献	/175
习题 5		/176

参考文献 /177

第 6 章 基于 TinyOS 的传感网应用开发 /180

6.1	典型的无线传感网开发套件	/180
6.1.1	MICA 系列节点	/180
6.1.2	MICA 系列处理器 / 射频板	/183
6.1.3	MICA 系列传感器板	/185
6.1.4	编程调试接口板	/186
6.1.5	国内外其他典型的无线传感网节点	/187
6.2	nesC 语言基础	/188
6.2.1	简介	/188
6.2.2	术语	/190
6.2.3	接口 (interface)	/192
6.2.4	组件 (component)	/194
6.2.5	模块 (module)	/197
6.2.6	配件 (configuration)	/202
6.2.7	应用程序样例	/207
6.3	TinyOS 操作系统	/210
6.3.1	组件模型	/211
6.3.2	事件驱动的并发执行模型	/211
6.3.3	通信模型	/212
6.4	TinyOS 开发环境搭建	/214
6.4.1	创建 Ubuntu 虚拟机	/215
6.4.2	安装 Java 编译运行环境	/216
6.4.3	安装必备工具	/217
6.4.4	下载并编译安装 nesC 编译器	/217
6.4.5	下载并安装 TinyOS	/218
6.4.6	下载并安装 AVR 交叉编译工具链	/218

6.4.7 测试 TinyOS 开发环境 /218	TOSSIM /235
6.5 简单无线传输 /221	6.8.1 TOSSIM 简介 /236
6.5.1 BlinkToRadio 依赖的其他 组件 /222	6.8.2 仿真库的编译 /236
6.5.2 BlinkToRadio 的执行过程 /224	6.8.3 仿真脚本的编写 /236
6.5.3 内存所有权 /226	6.8.4 仿真例子 /238
6.6 简单数据分发 /227	6.8.5 高级功能简介 /240
6.6.1 数据分发依赖的组件 /227	6.9 本章小结与进一步阅读的 文献 /241
6.6.2 数据分发例程 /228	习题 6 /241
6.7 简单数据汇聚 /230	参考文献 /242
6.7.1 数据汇聚依赖的组件 /231	
6.7.2 数据汇聚例程 /232	
6.8 TinyOS 仿真平台—— TOSSIM /235	
	附录 《传感网原理与技术》实践教学 大纲 /243

第 1 章 绪 论

20 世纪计算机科学的一项伟大成果是计算机网络技术,以互联网为代表的计算机网络技术是人类通信技术的一次革命。互联网发展迅速,早已超越了当初 ARPANET (阿帕网) 的军事和技术目的,已经渗透到人们工作、生活的方方面面,并对企业发展和 社会进步产生了巨大影响。2012 年 7 月,中国互联网络信息中心 (CNNIC) 发布了《第 30 次中国互联网络发展状况统计报告》,该报告指出:截至 2012 年 6 月底,中国网民数量达到 5.38 亿,互联网普及率为 39.9%^[1]。但是,互联网这种虚拟的网络世界与人们所生活的现实世界还是有极大区别的,在网络世界中,很难感知现实世界,时代在呼唤着新网络技术的出现。进入 21 世纪以来,随着感知识别技术的快速发展,以传感器和智能识别终端为代表的信息自动生成设备可以实时地对物理世界感知、测量和监控^[2]。微电子技术、计算机技术和无线通信技术的发展推动了低功耗、多功能传感器的快速发展,现已研制出了具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器。物理世界的联网需求和信息世界的扩展需求催生出一类新型网络——传感器网络(简称传感网)。

传感网集成了传感器、嵌入式计算、微机电、现代网络与无线通信、信息处理等技术,跨越了计算机、半导体、嵌入式、网络、通信、光学、微机械、化学、生物、航天、医学、农业等众多领域,可以使人们在任何时间、地点和任何环境下获取大量翔实可靠的信息,从而真正实现无处不在的计算理念。传感网是一种新型的信息获取和处理技术,它改变了人类与自然界的交互方式,扩大了人类认知世界的能力。美国《商业周刊》认为传感网是全球未来四大高新技术产业之一,是 21 世纪最具有影响力的 21 项技术之一。2003 年,麻省理工学院的《技术评论》杂志在预测未来技术发展的报告中,将传感网列为对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术之首^[3]。

1.1 传感网的起源与发展

传感网的概念起源于 1978 年美国国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 资助卡内基梅隆大学 (Carnegie Mellon University, CMU) 进行分布式传感



网的研究项目,主要研究由若干具有无线通信能力的传感器节点自组织构成的网络。这被看成是无线传感网的雏形。1980年,DARPA的分布式传感网项目开启了传感网研究的先河;20世纪80~90年代,研究主要在军事领域,成为网络中心战的关键技术,拉开了无线传感网研究的序幕;从20世纪90年代中期开始,美国和欧洲等发达国家和地区先后开始了大量的关于无线传感网的研究工作。

进入21世纪,随着无线通信、微芯片制造等技术的进步,无线传感网的研究取得了重大进展,并引起了军方、学术界以及工业界的极大关注。美国军方投入了大量经费进行了在战场环境应用无线传感网的研究。工业化国家和部分新兴的经济体都对传感网表现出了极大的兴趣。美国国家科学基金会(NSF)也设立了大量与其相关的项目,2003年制定了无线传感网研究计划,并在加州大学洛杉矶分校成立了传感网研究中心;2005年对网络技术和系统的研究计划中,主要研究下一代高可靠、安全可扩展、可编程的无线网络及传感器系统的网络特性。此外,美国交通部、能源部、美国国家航空航天局也相继启动了相关的研究项目。

目前,美国许多著名大学都设有专门从事无线传感网研究的课题研究小组,如麻省理工学院、加州大学伯克利分校等。

欧洲、大洋洲和亚洲的一些工业化国家(如加拿大、英国、德国、芬兰、日本、意大利等)的高等院校、研究机构和企业也积极进行无线传感网的相关研究。欧盟第六个框架计划将“信息社会技术”作为优先发展的领域之一,其中多处涉及对无线传感网的研究。日本总务省在2004年3月成立了“泛在传感器网络”调查研究会。

同时,许多大型企业也投入巨资进行无线传感网的产业化开发。目前,已经开发出一些实际可用的传感器节点平台和面向无线传感网的操作系统及数据库系统。比较有代表性的产品包括加州大学伯克利分校和Crossbow公司联合开发的MICA系列传感器节点,加州大学伯克利分校开发的TinyOS操作系统和TinyDB数据管理系统。

我国对无线传感网的研究起步较晚,1999年中国科学院《知识创新工程重点领域方向研究》的“信息与自动化领域研究报告”的推出标志着无线传感网研究的启动,也是该领域的五大重点项目之一。2001年,中国科学院依托上海微系统与信息技术研究所成立微系统研究与发展中心,主要从事无线传感网的相关研究工作。国家自然科学基金已经审批了与无线传感网相关的多项课题。2004年,将一项无线传感网项目“面向传感器网络的分布自治系统关键技术及协调控制理论”列为重点研究项目。2005年,将网络传感器中的基础理论和关键技术列入计划。2006年,将水下移动传感网的关键技术列为重点研究项目。国家发展和改革委员会下一代互联网(CNGI)示范工程中,也部署了无线传感器网络相关的课题。2006年年初发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》为信息技术定义了三个前沿方向,其中的两个方向(即智能感知技术和自组织网络技术)都与无线传感网的研究直接相关。我国2010年远景规划和“十五”计划中,也将无线传感器网络列为重点发展的产业之一。

总之,技术的成熟和硬件成本的降低推动着传感网向大规模、低功耗方向发展。传感网的发展跨越了4个阶段^[4]。

第1阶段:冷战时期的军事传感器网络

冷战时期,美国使用昂贵的声传感网(acoustic networks)监视潜艇,同时美国国家海洋和大气管理局也使用其中的一部分传感器监测海洋的地震活动。

第2阶段：国防高级研究计划局的倡议

20世纪80年代初，在美国国防部高级研究计划局（DARPA）资助项目的推动下，传感网的研究取得了显著进步。在假设存在许多低成本空间分布传感器节点的前提下，分布式传感网（DSN）以自组织、合作的方式运作，旨在判定是否可以在传感网中使用新开发的TCP/IP协议和ARPA网（互联网的前身）的方式来通信。

第3阶段：20世纪80年代、90年代的军事应用开发和部署

20世纪80年代和90年代，以DARPA-DSN研究和实验平台为基础，在军事领域采用传感网技术，使其成为网络中心战的关键组成部分。传感网可以通过多种观察、扩展检测范围以及加快响应时间等方式，提高检测和跟踪性能。

第4阶段：现今的传感网研究

20世纪90年代末和21世纪初，计算与通信的发展推动传感网新一代技术的产生。标准化是任何技术大规模部署的关键，其中包括无线传感网。随着IEEE 802.11a/b/g的无线网络和其他无线系统（如ZigBee）的发展，可靠连接变得无处不在。低功耗、低价格处理器的出现，使传感器可部署于更多的应用程序之中。

1.2 传感网的体系结构

传感器网络由大量部署在作用区域内的、具有无线通信与计算能力的传感器节点组成，这些节点通过自组织方式构成传感器网络，其目的是协作感知、采集和处理网络覆盖地理区域中的感知对象信息并发布给观察者^[5]。本节从节点和网络结构两个方面介绍传感网的体系结构。

1.2.1 传感器节点体系结构

传感器节点是无线传感网的一个基本组成部分。根据应用需求的不同，传感器节点必须满足的具体要求也不同。传感器节点可能是小型的、廉价的或节能的，必须配备合适的传感器，具有必要的计算和存储资源，并且需要足够的通信设施^[6,7]。一个典型的传感器节点由感知单元、处理单元（包括处理器和存储器）、通信单元、能量供给单元和其他应用相关单元组成，传感器节点的体系结构如图1-1所示。

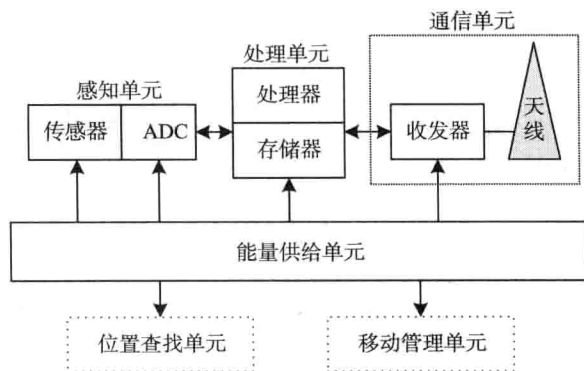


图 1-1 传感器节点的体系结构

在图1-1中，感知单元主要用来采集现实世界的各种信息，如温度、湿度、压力、声

音等物理信息,并将传感器采集到的模拟信息转换成数字信息,交给处理单元进行处理。处理单元负责整个传感器节点的数据处理和操作,存储本节点的采集数据和其他节点发来的数据。通信单元负责与其他传感器节点进行无线通信、交换控制消息和收发采集数据。能量供给单元提供传感器节点运行所需的能量,是传感器节点最重要的单元之一。另外,为了对节点精确定位以及对移动状态进行管理,传感器节点需要相应的应用支持单元,如位置查找单元和移动管理单元。

传感器节点通常是一个微型嵌入式系统,它的处理能力、存储能力和通信能力是受限的。节点要正常工作,需要软硬件系统的密切配合。硬件系统的组成参照图 1-1。软件系统由 5 个基本的软件模块组成,分别是操作系统(OS)微码、传感器驱动、通信处理、通信驱动和数据处理 mini-app 软件模块^[3]。OS 微码控制节点的所有软件模块以支持节点的各种功能。TinyOS 就是一种专为嵌入式无线传感网设计的操作系统。传感器驱动模块管理传感器收发器的基本功能;此外,传感器的类型可能是模块或插件式的,根据传感器的不同类型和复杂度,该模块也要支持对传感器进行的相应配置和设置。通信处理模块管理通信功能,包括路由、数据包缓冲和转发、拓扑维护、介质访问控制、加密和前向纠错等。通信驱动模块管理无线电信道传输链路,包括时钟和同步、信号编码、比特计数和恢复、信号分级和调制。数据处理 mini-app 模块支持节点的数据处理,包括信号值的存储与操作或其他的基本应用。

1.2.2 传感网的网络结构

传感网由大量的传感器节点组成,节点之间通过无线传输方式通信。一个典型的传感网的体系结构如图 1-2 所示,通常包括传感器节点、汇聚节点和任务管理节点。传感器节点分散在监测区域内,这些节点能够采集数据、分析数据并且把数据路由到一个指定的汇聚节点。传感器节点之间通过自组织方式构成网络,可以根据需要智能地采用不同的网络拓扑结构。传感器节点的监测数据可能被多个节点处理,通常以多跳的方式沿着其他节点逐跳传输,经过路由到其他中间节点进行数据融合和转发后到达汇聚节点,最后通过互联网或者卫星到达用户可以操作的任务管理节点,任务管理节点可以对传感网进行配置和管理。

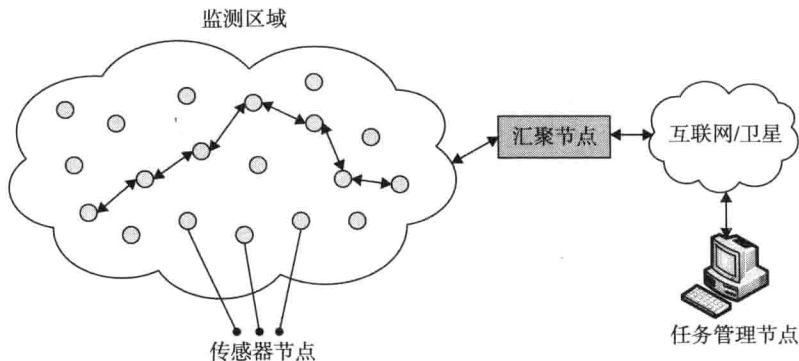


图 1-2 传感网的体系结构

传感器节点的计算能力、存储能力较弱,通信带宽窄,由自身携带的电池供电,因此能量有限。传感器节点不仅要对本地区信息进行数据处理,还要对其他节点转发的数据进行

存储、管理、融合和转发。汇聚节点的处理能力、存储能力和通信能力相对较强,主要负责发送任务管理节点的监测任务,收集数据并转发到互联网等外部网络上,实现传感网和外部网络之间的通信。汇聚节点可以是一个具有增强功能的传感器节点,具有较多的内存、计算资源和能量供给,也可以是一个仅带有无线通信接口的特殊网关设备。

传感网通常部署在无人照料的恶劣环境中或身体遥不可及的地区,因此网络需要具有自维护^[8]的特性。当网络的部分节点因入侵、故障或电池耗竭而失效时,不能影响数据传输和网络监控^[9]等主要任务。

1.3 传感网的核心技术

传感网是当今信息领域新的研究热点,是微机电系统、计算机、通信、自动控制、人工智能等多学科交叉的综合性技术。目前的研究涉及通信、组网、管理、分布式信息处理等多个方面。具体而言,传感网的关键技术包括路由协议、MAC协议、拓扑控制、定位、时间同步、数据管理等。

1. 路由协议

路由协议负责将数据分组从源节点通过网络转发到目的节点,协议的主要功能是寻找源节点和目的节点间的优化路径,将数据分组沿着优化路径正确转发。在根据传感网的具体应用设计路由机制时,要满足下面的要求:

1) 能量高效。传感网路由协议不仅要选择能量消耗小的消息传输路径,而且要从整个网络的角度考虑,选择使整个网络能量均衡消耗的路由。由于传感器节点的资源是有限的,因而传感网的路由机制要能够简单而且高效地实现信息传输。

2) 可扩展性。在传感网中,检测区域范围或节点密度不同,网络规模会有所不同;节点失败、新节点加入以及节点移动等,也会使得网络拓扑结构动态地发生变化,这就要求路由机制具有可扩展性,能够适应网络结构的变化。

3) 鲁棒性。能量耗尽或环境因素造成的传感器节点失效,周围环境影响无线链路的通信质量以及无线链路本身的缺点等,这些传感网的不可靠特性要求路由机制具有一定的容错能力。

4) 快速收敛性。传感网的拓扑结构动态变化,节点能量和通信带宽等资源有限,因此要求路由机制能够快速收敛,以适应网络拓扑的动态变化,减少通信协议开销,提高消息传输的效率。

2. MAC 协议

在传感网中,介质访问控制(MAC)协议决定无线信道的使用方式,在传感器节点之间分配有限的无线通信资源,用来构建传感网系统的底层基础结构。MAC协议处于传感网协议的底层部分,对传感网的性能有较大影响,是保证传感网高效通信的关键网络协议之一。传感器节点的能量、存储、计算和通信带宽等资源有限,单个节点的功能比较弱,而传感网的强大功能是由众多节点协作实现的。多点通信在局部范围需要MAC协议协调无线信道分配,在整个网络范围内需要路由协议选择通信路径。在设计传感网的MAC协议时,需要着重考虑以下几个方面。

1) 节省能量。传感器节点一般是由电池提供能量,而且电池能量通常难以进行补充,为了长时间保证传感器网络的有效工作,MAC协议在满足应用要求的前提下,应尽量节省

节点的能量。

2) 可扩展性。由于传感器节点数目、节点分布密度等在传感网生存过程中不断发生变化,节点位置也可能移动,还有新节点加入网络的问题,因此传感网的拓扑结构具有动态性。MAC 协议也应具有可扩展性,以适应这种动态变化的拓扑结构。

3) 网络效率。网络效率包括网络的公平性、实时性、网络吞吐量以及带宽利用率等。

3. 拓扑控制

传感网拓扑控制主要研究的问题是在满足网络覆盖度和连通度的前提下,通过功率控制和骨干网节点选择,剔除节点之间不必要的通信链路,形成一个数据转发的优化网络结构。具体地讲,传感网中的拓扑控制按照研究方向可以分为两类:节点功率控制和层次型拓扑控制。功率控制机制调节网络中每个节点的发射功率,在满足网络连通度的前提下,均衡节点的单跳可达邻居数目。层次型拓扑控制利用分簇机制,让一些节点作为簇头节点,由簇头节点形成一个处理并转发数据的骨干网,其他非骨干网节点可以暂时关闭通信模块,进入休眠状态以节省能量。

4. 定位

对于大多数应用,不知道传感器位置而感知的数据是没有意义的。传感器节点必须明确自身位置才能详细说明“在什么位置或区域发生了特定事件”,实现对外部目标的定位和追踪;另一方面,了解传感器节点位置信息还可以提高路由效率,为网络提供命名空间,向部署者报告网络的覆盖质量,实现网络的负载均衡以及网络拓扑的自配置。而人工部署和为所有网络节点安装 GPS 接收器都会受到成本、功耗、扩展性等问题的限制,甚至在某些场合可能根本无法实现,因此必须采用一定的机制与算法实现传感网的自身定位。

5. 时间同步

在传感网中,单个节点的能力非常有限,整个系统所要实现的功能需要网络内所有节点相互配合共同完成。很多传感网的应用都要求节点的时钟保持同步。

在传感网的应用中,传感器节点将感知到的目标位置、时间等信息发送到网络中的汇聚节点,汇聚节点对不同传感器发送来的数据进行处理后便可获得目标的移动方向、速度等信息。为了能够正确地监测事件发生的顺序,要求传感器节点之间必须实现时间同步。在一些事件监测的应用中,事件自身的发生时间是相当重要的参数,这要求每个节点维持唯一的全局时间以实现整个网络的时间同步。

时间同步是传感网的一个研究热点,在传感网中起着非常重要的作用,国内外的研究者已经提出了多种传感网时间同步算法。

6. 数据管理

传感网本质上是一个以数据为中心的网络,它处理的数据为传感器采集的连续不断的数据流。由于传感网能量、通信和计算能力有限,因此传感网数据管理系统通常不会把数据都发送到汇聚节点进行处理,而是尽可能在传感网中进行处理,这样可以最大限度地降低传感网的能量消耗和通信开销,延长传感网的生命周期。现有的数据管理技术把传感网看作来自物理世界的连续数据流组成的分布式感知数据库^[10],可以借鉴成熟的传统分布式数据库技术对传感网中的数据进行管理。由于传感器节点的计算能力、存储容量、通信能力以及电池能量有限,再加上 Flash 存储器以及数据流本身的特性,给传感网数据管理带来了不同于传统分布式数据库系统的一些新挑战。