



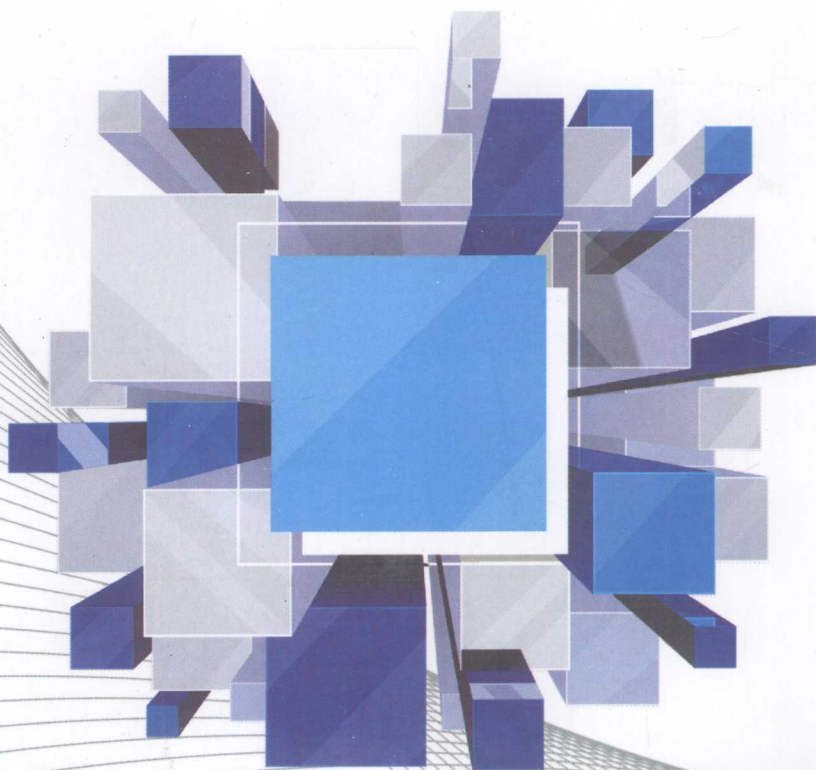
中国电子学会物联网专家委员会推荐

普通高等教育物联网工程专业“十二五”规划教材

无线传感器网络 原理与应用

Wireless Sensor Network Principle and Application

彭力 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

014031902

TN92-43
24

中国电子学会物联网专家委员会推荐

普通高等教育物联网工程专业“十二五”规划教材

无线传感器网络原理与应用

彭力 编著



西安电子科技大学出版社



TN92-43
24

0140180310

内 容 简 介

本书结合作者长期以来在该领域的教学、研究工作,比较全面、系统地阐述了在当前无线传感器网络研究领域中的关键技术问题、研究成果和应用技术。全书共分为9章,内容涉及无线传感器网络概述、拓扑控制、无线传感器网络关键技术、定位技术、目标跟踪技术、时间同步技术、安全技术、硬件平台设计以及无线传感器网络工程实验指导等。

本书既可作为物联网工程、传感器网络技术、通信工程等专业本科生和研究生的教材,也可供无线传感器网络研究领域的相关科研工作者及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络原理与应用/彭力编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2014.1
普通高等教育物联网工程专业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5606-3243-8

I. ① 无… II. ① 彭… III. ① 无线电通信—传感器—高等学校—教材 IV. ① TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 009831 号

策 划 刘玉芳

责任编辑 阎 彬 张俊利

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 17.5

字 数 411千字

印 数 1~3000册

定 价 30.00元

ISBN 978-7-5606-3243-8/TP

XDUP 3535001-1

如有印装问题可调换

普通高等教育物联网工程专业“十二五”规划教材 编审专家委员会名单

- 总顾问：姚建铨 天津大学、中国科学院院士 教授
- 顾问：王新霞 中国电子学会物联网专家委员会秘书长
- 主任：王志良 北京科技大学信息工程学院首席教授
- 副主任：孙小菡 东南大学电子科学与工程学院 教授
- 曾宪武 青岛科技大学信息科学技术学院物联网系主任 教授

委员：（成员按姓氏笔画排列）

- 王洪君 山东大学信息科学与工程学院副院长 教授
- 王春枝 湖北工业大学计算机学院院长 教授
- 王宜怀 苏州大学计算机科学与技术学院 教授
- 白秋果 东北大学秦皇岛分校计算机与通信工程学院院长 教授
- 孙知信 南京邮电大学物联网学院副院长 教授
- 朱昌平 河海大学计算机与信息学院副院长 教授
- 邢建平 山东大学电工电子中心副主任 教授
- 刘国柱 青岛科技大学信息科学技术学院副院长 教授
- 张小平 陕西物联网实验研究中心主任 教授
- 张 申 中国矿业大学物联网中心副主任 教授
- 李仁发 湖南大学教务处处长 教授
- 李朱峰 北京师范大学物联网与嵌入式系统研究中心主任 教授
- 李克清 常熟理工学院计算机科学与工程学院副院长 教授
- 林水生 电子科技大学通信与信息工程学院物联网工程系主任 教授
- 赵付青 兰州理工大学计算机与通信学院副院长 教授

- 武奇生 长安大学电子与控制工程学院自动化卓越工程师主任 教授
- 房 胜 山东科技大学信息科学与工程学院物联网专业系主任 教授
- 赵庶旭 兰州交通大学电信工程学院计算机科学与技术系副主任 教授
- 施云波 哈尔滨理工大学测控技术与通信学院传感网技术系主任 教授
- 桂小林 西安交通大学网络与可信计算技术研究中心主任 教授
- 秦成德 西安邮电大学教学督导 教授
- 黄传河 武汉大学计算机学院副院长 教授
- 黄 炜 电子科技大学通信与信息工程学院 教授
- 黄贤英 重庆理工大学计算机科学与技术系主任 教授
- 彭 力 江南大学物联网系副主任 教授
- 谢红薇 太原理工大学计算机科学与技术学院软件工程系主任 教授
- 薛建彬 兰州理工大学计算机与通信学院物联网工程系主任 副教授

项目策划：毛红兵

策 划：邵汉平 刘玉芳 王 飞

前 言

无线传感器网络是随着无线通信、嵌入式计算技术、传感器技术、微机电技术以及分布式信息处理技术的进步而发展起来的一种新兴的信息获取技术，是当前在国际上备受关注、涉及多学科、高度交叉、知识高度集成的前沿热点研究领域。无线传感器网络采用自组织方式配置大量的传感器节点，通过节点的协同工作来采集和处理网络覆盖区域中的目标信息，是一个集数据采集、数据处理、数据传输于一体的复杂系统，它能够通过各类集成化的微型传感器协作地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息，这些信息通过无线方式发送，并以自组多跳的无线传播方式传送到用户终端，从而实现物理世界、计算世界以及人类社会三元世界的连通。

无线传感器网络具有监测精度高、容错性能好、覆盖区域大、可远程监控等优点，已成为国内外研究的热点。随着传感器技术和通信技术的进一步发展，因其应用的广泛性和多样性越来越受到人们的高度重视，在军事和民用方面均有非常广阔的应用前景，可应用于军事侦察、环境监测、医疗监护、地震监测、气候预测及空间探索等诸多领域。

无线传感器网络潜在的实用价值，已引起许多国家学术界和工业界的高度重视，被认为是对 21 世纪产生巨大影响力的技术之一。早在 2003 年，美国商业周刊在其“未来技术专版”中指出，效用计算、传感器网络、塑料电子学和仿生人体器官是全球未来的四大高技术产业，它们将掀起新的产业浪潮。与此同时，MIT 技术评论 *Technology Review* 在预测未来技术发展的报告中指出，无线传感器网络将是未来改变世界的十大新兴技术之首。

本书作者有多年对无线传感器网络进行理论研究和教授研究生课程的经验，全书总结了当今无线传感器网络研究领域中的研究成果和应用技术，结合作者多年来在该领域取得的若干成果，详细阐述了无线传感器网络研究中的最新理论和最新方法。内容包括无线传感器网络的概念、组网通信技术、核心支撑技术、自组织管理技术以及应用开发实例等方面。全书结构合理、内容丰富，既可带领初学者迅速入门，也可为有基础的研究人员提供较为系统的参考文案。

如果本书能对该领域的研究工作和国内无线传感器网络技术的发展有一些帮助，这将对所有为本书的出版付出辛勤劳动的编写者最好的鼓励。

作为本书的编著者，我要诚挚地感谢参加本书资料收集和整理的老师和同学，感谢林柏、吴治海、闻继伟、杨乐、王华、李稳、冯伟等老师以及赵龙、张炜、马晓贤、戴菲菲、董国勇、吴凡、曹亚陆等研究生付出的辛勤劳动，同时感谢国家自然科学基金(60973095)、江南大学教学改革项目的资助，以及物联网技术应用教育部工程研究中心、轻工过程先进控制教育部重点实验室同事的帮助。

由于水平有限，加之时间仓促，对于书中的缺点和错误，我们真诚地期待读者给予批评和指正。

江南大学 彭力

2013年6月于无锡

目 录

第 1 章 无线传感器网络概述	1
1.1 无线传感器网络的体系结构	1
1.2 无线传感器网络的特征	3
1.2.1 与现有无线网络的区别	3
1.2.2 传感器节点的限制	4
1.2.3 无线传感器网络的特点	5
1.3 无线传感器网络的应用及关键技术	6
1.3.1 无线传感器网络的应用	6
1.3.2 无线传感器网络的发展现状	8
1.3.3 无线传感器网络的关键技术	8
1.3.4 面临的挑战	11
1.4 主流无线传感器网络仿真平台	11
1.4.1 基于通用网络的仿真平台	11
1.4.2 基于 TinyOS 的仿真平台	12
1.4.3 仿真平台比较	12
习题	13
第 2 章 拓扑控制	14
2.1 概述	14
2.2 功率控制	16
2.2.1 基于节点度的功率控制	16
2.2.2 基于方向的功率控制	16
2.2.3 基于邻近图的功率控制	16
2.2.4 XTC 算法	18
2.3 层次型拓扑结构控制	18
2.3.1 LEACH 算法	19
2.3.2 TopDisc 算法	20
2.3.3 GAT 算法	22
2.4 启发机制	23
2.4.1 STEM 算法	23
2.4.2 ASCENT 算法	24
2.5 传感器网络的覆盖控制	24
2.5.1 基于虚拟势场力的传感器 网络区域覆盖控制	25
2.5.2 基于市场竞争行为的无线传感器 网络连接与覆盖算法	26
2.6 小结	29
习题	30
第 3 章 无线传感器网络关键技术	31
3.1 无线传感器网络的路由技术	31
3.1.1 路由协议的分类	32
3.1.2 能量感知路由协议	34
3.1.3 基于查询路由	35
3.1.4 地理位置路由	39
3.1.5 基于 QoS 的路由	41
3.1.6 路由协议自主切换	43
3.1.7 小结	44
3.2 无线传感器网络的链路层技术	45
3.2.1 无线传感器网络 MAC 协议	47
3.2.2 基于竞争的 MAC 协议	47
3.2.3 基于时分复用的 MAC 协议	53
3.2.4 其他类型的 MAC 协议	57
3.2.5 小结	59
3.3 ZigBee	59
3.3.1 ZigBee 与 IEEE802.15.4 的分工	59
3.3.2 ZigBee 与 IEEE802.15.4 的区别	60
3.3.3 ZigBee 协议框架	61
3.3.4 ZigBee 技术的特点	62
3.3.5 网络层规范	63
3.3.6 应用层规范	67
3.4 小结	69
习题	69
第 4 章 定位技术	70
4.1 定位技术简介	71
4.1.1 定位技术的概念、常见算法和 分类	71
4.1.2 定位算法分类	73
4.2 基于距离的定位	73
4.2.1 基于 TOA 的定位	73
4.2.2 基于 TDOA 的定位	74
4.2.3 基于 AOA 的定位	74

4.2.4 基于 RSSI 的定位	76	第 7 章 安全技术	108
4.3 与距离无关的定位算法	77	7.1 概述	108
4.3.1 质心定位算法	77	7.2 无线传感器网络中的安全问题	108
4.3.2 DV-Hop 算法	78	7.3 无线传感器网络的安全性分析	110
4.3.3 APIT 算法	79	7.3.1 无线传感器网络的安全挑战	110
4.3.4 凸规划定位算法	82	7.3.2 无线传感器网络的安全策略	110
习题	83	7.4 无线传感器网络的安全管理体系	114
第 5 章 目标跟踪技术	84	7.4.1 预共享密钥分配模型	115
5.1 目标跟踪的基本原理及跟踪策略设计		7.4.2 随机密钥预分配模型	116
要考虑的问题	85	7.4.3 基于位置的密钥预分配模型	121
5.1.1 无线传感器网络中目标跟踪的		7.4.4 其他的密钥管理方案	122
基本原理	85	7.5 无线传感器网络的入侵检测技术	122
5.1.2 无线传感器网络跟踪策略设计		7.5.1 入侵检测技术概述	122
要考虑的问题	86	7.5.2 三种入侵检测方案的工作原理	123
5.2 点目标跟踪	86	7.6 小结	125
5.2.1 二元检测协作跟踪	86	习题	126
5.2.2 信息驱动协作跟踪	88	第 8 章 硬件平台设计	127
5.2.3 传送树跟踪算法	90	8.1 无线传感器网络的硬件开发概述	127
5.3 面目标跟踪	92	8.1.1 硬件系统的设计特点与要求	127
5.3.1 对偶空间转换	93	8.1.2 硬件系统的设计内容	128
5.3.2 对偶空间跟踪算法	93	8.2 节点的硬件设计	129
5.4 小结	94	8.2.1 处理器模块	129
习题	94	8.2.2 传感器模块	130
第 6 章 时间同步技术	95	8.2.3 通信模块	131
6.1 无线传感器网络的时间同步机制	95	8.2.4 电源模块	132
6.1.1 影响无线传感器网络时间同步的		8.2.5 外围模块	133
关键因素	95	8.3 传感器节点设计实例	133
6.1.2 无线传感器网络时间同步机制的		8.3.1 传感器节点系列简介	133
基本原理	96	8.3.2 Mica 系列传感器设计分析	137
6.2 现有时间同步技术分析	98	8.4 小结	138
6.2.1 基于接收者和接收者的		习题	139
时间同步机制	98	第 9 章 无线传感器网络工程	
6.2.2 基于发送者和接收者的		实验指导	140
双向时间同步机制	100	9.1 CC2530 芯片简介	140
6.2.3 基于发送者和接收者的		9.1.1 芯片内部框架结构	140
单向时间同步机制	103	9.1.2 芯片引脚和 I/O 端口配置	141
6.3 时间同步算法设计	105	9.1.3 特殊功能寄存器	142
6.4 小结	107	9.1.4 中断简介	147
习题	107	9.2 建立一个简单的实验工程	151

9.2.1	实验目的	151	9.7.3	实验条件	192
9.2.2	实验内容	151	9.7.4	实验原理	192
9.2.3	实验条件	151	9.7.5	实验步骤	196
9.2.4	实验原理	152	9.7.6	实验结果	196
9.2.5	实验步骤	152	9.8	实验七 定时器 1 输入捕获与 输出比较	196
9.2.6	实验结果	165	9.8.1	实验目的	196
9.3	实验二 通用 I/O 实验	165	9.8.2	实验内容	197
9.3.1	实验目的	165	9.8.3	实验条件	197
9.3.2	实验内容	166	9.8.4	实验原理	197
9.3.3	实验条件	166	9.8.5	实验步骤	205
9.3.4	实验原理	166	9.8.6	实验结果	205
9.3.5	实验步骤	170	9.9	实验八 外部中断	205
9.3.6	实验结果	170	9.9.1	实验目的	205
9.4	实验三 系统时钟源(主时钟源)的 选择	170	9.9.2	实验内容	205
9.4.1	实验目的	170	9.9.3	实验条件	205
9.4.2	实验内容	171	9.9.4	实验原理	205
9.4.3	实验条件	171	9.9.5	实验步骤	207
9.4.4	实验原理	171	9.9.6	实验结果	208
9.4.5	实验步骤	173	9.10	实验九 看门狗实验(看门狗模式和 定时器模式)	208
9.4.6	实验结果	174	9.10.1	实验目的	208
9.5	实验四 UART 串口通信实验	174	9.10.2	实验内容	208
9.5.1	实验目的	174	9.10.3	实验条件	208
9.5.2	实验内容	174	9.10.4	实验原理	208
9.5.3	实验条件	174	9.10.5	实验步骤	210
9.5.4	实验原理	175	9.10.6	实验结果	210
9.5.5	实验步骤	179	9.11	实验十 随机数产生器实验	211
9.5.6	实验结果	181	9.11.1	实验目的	211
9.6	实验五 ADC(单次转换)	182	9.11.2	实验内容	211
9.6.1	实验目的	182	9.11.3	实验条件	211
9.6.2	实验内容	182	9.11.4	实验原理	211
9.6.3	实验条件	182	9.11.5	实验步骤	213
9.6.4	实验原理	182	9.11.6	实验结果	213
9.6.5	实验步骤	189	9.12	实验十一 DMA 传输实验	214
9.6.6	实验结果	191	9.12.1	实验目的	214
9.7	实验六 定时器 1 定时的 配置和使用	191	9.12.2	实验内容	214
9.7.1	实验目的	191	9.12.3	实验条件	214
9.7.2	实验内容	191	9.12.4	实验原理	214

9.12.5	实验步骤	222	9.17.6	实验结果	243
9.12.6	实验结果	223	9.18	实验十七 温湿度传感器实验	245
9.13	实验十二 Flash 读写实验	223	9.18.1	实验目的	245
9.13.1	实验目的	223	9.18.2	实验内容	245
9.13.2	实验内容	223	9.18.3	实验条件	245
9.13.3	实验条件	223	9.18.4	实验原理	245
9.13.4	实验原理	223	9.18.5	实验步骤	249
9.13.5	实验步骤	228	9.18.6	实验结果	250
9.13.6	实验结果	228	9.19	实验十八 传感器数据读取实验	250
9.14	实验十三 功耗模式选择实验	230	9.19.1	实验目的	250
9.14.1	实验目的	230	9.19.2	实验内容	250
9.14.2	实验内容	230	9.19.3	实验条件	251
9.14.3	实验条件	230	9.19.4	实验原理	251
9.14.4	实验原理	230	9.19.5	实验步骤	256
9.14.5	实验步骤	234	9.20	实验十九 上位机通信实验	258
9.14.6	实验结果	235	9.20.1	实验目的	258
9.15	实验十四 供电电压监测实验	237	9.20.2	实验内容	258
9.15.1	实验目的	237	9.20.3	实验条件	259
9.15.2	实验内容	237	9.20.4	实验原理	259
9.15.3	实验条件	237	9.20.5	实验步骤	259
9.15.4	实验原理	237	9.21	实验二十 ZigBee 网络监控实验	260
9.15.5	实验步骤	237	9.21.1	实验目的	260
9.15.6	实验结果	239	9.21.2	实验内容	260
9.16	实验十五 获取芯片信息实验	239	9.21.3	实验条件	260
9.16.1	实验目的	239	9.21.4	实验原理	260
9.16.2	实验内容	239	9.21.5	实验步骤	263
9.16.3	实验条件	239	9.21.6	实验结果	263
9.16.4	实验原理	240	9.22	实验二十一 远程监控实验	263
9.16.5	实验步骤	242	9.22.1	实验目的	263
9.16.6	实验结果	242	9.22.2	实验内容	263
9.17	实验十六 外部扩展实验	243	9.22.3	实验条件	264
9.17.1	实验目的	243	9.22.4	实验原理	264
9.17.2	实验内容	243	9.22.5	实验步骤	264
9.17.3	实验条件	243	9.22.6	实验结果	265
9.17.4	实验原理	243	附录	USB 转串口模块驱动安装	266
9.17.5	实验步骤	243	参考文献		269

第1章 无线传感器网络概述

近年来,信息技术和网络技术的发展给人类社会和国民经济的各个领域带来了巨大而深刻的变化。以因特网为代表的信息网络对人们生活方式的影响越来越大,并且将在未来的各个领域继续持续发展并不断提高影响力。无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是一种集成了传感器技术、微机电系统技术、无线通信技术和分布式信息处理技术的新型网络技术。它通过节点间的协作,对监控区域的环境或检测对象的信息进行实时感知、采集和处理,并将处理后的信息传送到对此感兴趣的网络终端用户。WSN成为因特网从虚拟世界到物理世界的延伸,成为逻辑上的信息世界与真实物理世界的连接桥梁,将信息世界与物理世界融为一体。美国商业周刊和MIT技术评论在预测未来技术发展的报告中,分别将无线传感器网络列为21世纪最有影响力的21项技术和改变世界的十大技术之一。传感器网络、塑料电子学和仿生人体器官又被称为全球未来的三大高科技产业。

1.1 无线传感器网络的体系结构

无线传感器网络是由部署在监测区域内的大量的廉价微型传感器节点组成,通过无线通信的方式形成一个多跳的自组织的网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖的地理区域中感知对象的信息,并发布给观察者。

无线传感器网络由无线传感器、感知对象和观察者三个基本要素构成。无线是指传感器与观察者之间、传感器之间的通信方式,能够在传感器与观察者之间建立通信路径。无线传感器的基本组成包括如下几个单元:电源、传感部件、处理部件、通信部件和软件等。此外,还可以选择其他的功能单元,如定位系统、移动系统以及电源自供电系统等。图1-1所示为传感节点的物理结构。传感节点一般由传感单元、数据处理单元、定位装置(GPS)、移动装置、能源(电池)及网络通信单元(收发装置)等六大部件组成,其中传感单元负责被监测对象原始数据的采集,采集到的原始数据经过数据处理单元的处理之后,通过无线网络传输到一个数据汇聚中心节点(Sink),由Sink再通过因特网或卫星传输到用户数据处理中心。

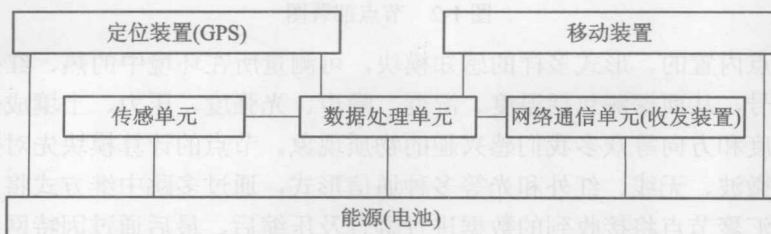


图 1-1 传感节点的物理结构

传感器节点的处理器一般选用嵌入式 CPU, 在存储计算时, 由于传感器节点的体积小, 必然导致其携带的处理器能力比较弱、存储器容量比较小。随着低功耗电路和系统设计技术以及电路加工工艺的提高, 目前已经开发出很多超低功耗微处理器, 如 Motorola 公司的 68HC16, ARM 公司的 ARM7 和 Intel 公司的 8086 等, 其计算能力得到了大幅度的提高。同时对存储技术的研究也使得 Flash 存储器等小体积、大容量、低电压操作、多次写、无限次读的非易失存储介质用于传感器节点制造。传感器节点的能量供应一般采用电池, 目前使用的大部分电池都是自身存储有限能源的化学电池, 并且节点能量在实施部署后很难进行有效的补充。随着光电转换理论的提出, 传统的电池被加入了许多新的元素, 太阳能电池、微光电池、生物能电池、地热能电池等一系列可以从自然界中汲取能量转换为电能的电池的出现, 使得能量的自补充成为可能。从理论上讲, 新型电池能持久供应能量, 但由于工程实践中生产这种微型化的电池还有相当的难度以及受到节点部署区域特定地理环境等限制, 其效果并不理想, 如何进一步缩小其体积是目前研究的重点。为了尽可能地延长整个传感器网络的生命周期, 在设计传感器节点时, 保证能量供应的持续性是一个重要的设计原则。传感器节点能量消耗的主要模块主要包括传感器模块、信息处理模块和无线通信模块, 而绝大部分的能量消耗集中在无线通信模块上, 约占整个传感器节点能量消耗的 80%。一旦节点的能量衰竭, 该节点即失效。因此, 在电池技术没有获得飞跃性的发展之前, 人们主要是从研究传感器的网络特性着手, 提出了各种用于传感器网络的分簇算法、路由协议等, 通过减少节点能量消耗的方式来延长网络生命周期。

传感器网络往往通过飞行器撒播、人工埋置和火箭弹射等方式部署, 当部署完成后, 如图 1-2 所示, 各节点任意分布在被监测区域内, 节点以自组织的形式构成网络。

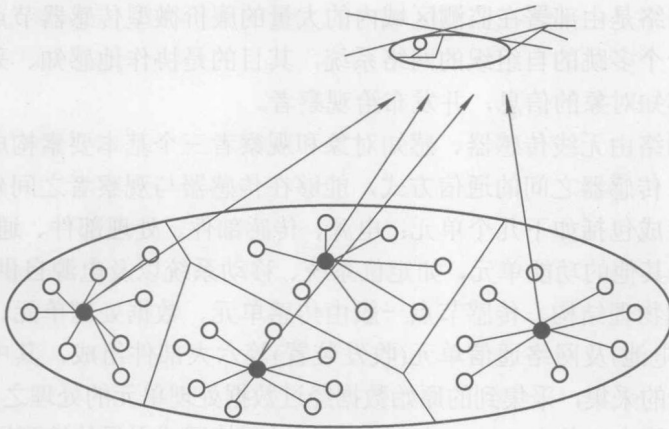


图 1-2 节点部署图

借助于节点内置的、形式多样的感知模块, 可测量所在环境中的热、红外、声纳、雷达和地震波信号, 从而探测包括温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分以及移动物体的大小、速度和方向等众多我们感兴趣的物质现象。节点的计算模块先对数据进行简单处理, 再采用微波、无线、红外和光等多种通信形式, 通过多跳中继方式将监测数据传送到汇聚节点。汇聚节点将接收到的数据进行融合及压缩后, 最后通过因特网或其他网络通信方式将监测信息传送到管理节点。同样的, 用户也可以通过管理节点进行命令的发布,

通知传感器节点收集指定区域的监测信息。图 1-3 给出了一个无线传感器网络的体系结构,图中,网络的部分节点组成了一个与 Sink 进行通信的数据链路,再由 Sink 把数据传送到卫星或者因特网,最后通过该链路和 Sink 进行数据交换并借此使数据到达最终用户手中。

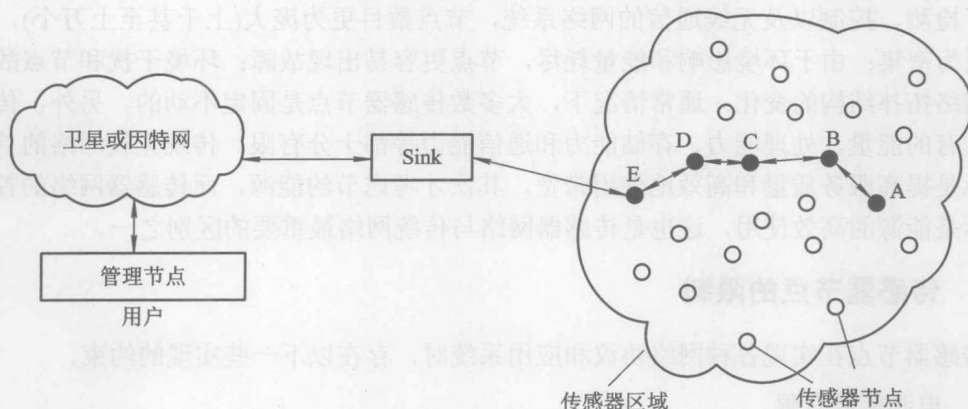


图 1-3 无线传感器网络的体系结构

依据传感器网络节点的连接特点,在研究中,一般利用图论的概念将传感器网络抽象成一种单位圆平面图(Unit-Disk Graph),即假设传感节点具有相同的有效传输半径 R ,则认为彼此处于传输半径范围内(半径为 R 的平面圆内)的节点之间存在一条单位长度的无向边。按照源节点的分布情况,传感器网络模型可分为事件半径模型和随机源节点模型两种。图 1-4 与图 1-5 分别给出了传感器网络的事件半径模型和随机源节点模型。

在图 1-4 所示的事件半径模型中,星形符号表示要监测的事件,在以该事件为圆心、半径为 R 的圆内的所有非 Sink 节点的传感节点被选择为数据源。而在图 1-5 所示的随机源节点模型中,随机选择 K 个非 Sink 节点的传感节点作为数据源。

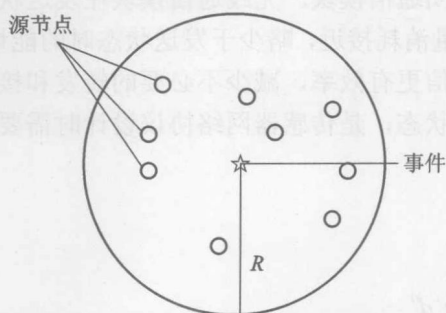


图 1-4 传感器网络的事件半径模型

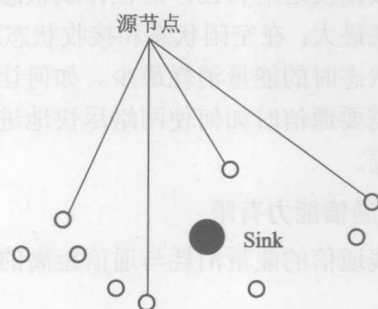


图 1-5 传感器网络的随机源节点模型

1.2 无线传感器网络的特征

1.2.1 与现有无线网络的区别

无线自组网(Mobile Ad-Hoc Network)是一个由几十到上百个节点组成的、采用无线通

信方式的、动态组网的多跳的移动性对等网络。它的目的是通过动态路由和移动管理技术传输具有服务质量要求的多媒体信息流,通常节点具有持续的能量供给。

传感器网络虽然与无线自组网有相似之处,但同时也存在很大的差别。传感器网络是集成了检测、控制以及无线通信的网络系统,节点数目更为庞大(上千甚至上万个),节点分布更为密集;由于环境影响和能量耗尽,节点更容易出现故障;环境干扰和节点故障易造成网络拓扑结构的变化;通常情况下,大多数传感器节点是固定不动的。另外,传感器节点具有的能量、处理能力、存储能力和通信能力等都十分有限。传统无线网络的首要设计目标是提高服务质量和高效地使用带宽,其次才考虑节约能源,而传感器网络的首要设计目标是能源的高效使用,这也是传感器网络与传统网络最重要的区别之一。

1.2.2 传感器节点的限制

传感器节点在实现各种网络协议和应用系统时,存在以下一些实现的约束。

1. 电源能量有限

传感器节点体积微小,通常只能携带能量十分有限的电池。由于传感器节点个数多、成本要求低廉、分布区域广,而且部署区域环境复杂,有些区域甚至人员不能到达,所以传感器节点通过更换电池的方式来补充能源是不现实的。如何高效地使用能量来最大化网络生命周期是传感器网络面临的首要挑战。

传感器节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块。随着集成电路工艺的进步,处理器和传感器模块的功耗变得很低,绝大部分能量消耗在无线通信模块上。

传感器节点传输信息时要比执行计算时更消耗电能。无线通信模块存在发送、接收、空闲和休眠4种状态。无线通信模块在空闲状态时,一直监测无线信道的使用情况,检查是否有数据发送给自己;而在休眠状态时,关闭通信模块。无线通信模块在发送状态时的能量消耗最大;在空闲状态和接收状态时的能量消耗接近,略少于发送状态时的能量消耗;在休眠状态时的能量消耗最少。如何让网络通信更有效率,减少不必要的转发和接收,以及在不需要通信时如何使网络尽快地进入休眠状态,是传感器网络协议设计时需要重点考虑的问题。

2. 通信能力有限

无线通信的能量消耗与通信距离的关系为

$$E = k \cdot d^n$$

其中,参数 n 满足关系 $2 < n < 4$ 。 n 的取值与很多因素有关,例如传感器节点部署贴近地面时,障碍物多、干扰大, n 的取值就大;天线质量对信号发射的影响也很大。考虑诸多因素,通常 n 取3,即通信消耗与距离的三次方成正比。随着通信距离的增加,能耗将急剧增加,因此,在满足通信连通度的前提下应尽量减少通信距离。一般而言,传感器节点的无线通信半径在100 m以内比较合适。

考虑到传感器节点的能量限制和网络覆盖区域范围大的特点,传感器网络通常采用多跳路由的传输机制。传感器节点的无线通信带宽有限,通常仅有每秒几百千位的传输速率。由于节点能量的变化受建筑物、障碍物等地势地貌以及风雨雷电等自然环境的影响,无线

通信性能可能经常变化, 频繁出现通信中断的现象。在这样的通信环境和节点有限通信能力的情况下, 如何使网络通信机制满足传感器网络的通信需求是传感器网络设计时面临的挑战之一。

3. 计算和存储能量有限

传感器节点是一种微型嵌入式设备, 要求它的价格低、功耗小, 这些限制必然导致其携带的处理器能力比较弱、存储器容量比较小。为了完成各种任务, 传感器节点需要完成监测数据的采集和转换、数据的管理和处理、应答汇聚节点的任务请求和节点控制等多种工作。如何利用有限的计算和存储资源完成诸多协同任务成为传感器网络设计的挑战之一。

随着低功耗电路和系统设计技术的提高, 目前已经开发出很多超低功耗微处理器。除了降低处理器的绝对功耗以外, 现代处理器还支持模块化供电和动态频率调节功能。利用这些处理器的特性, 传感器节点的操作系统设计了动态能量管理(Dynamic Power Management, DPM)和动态电压调节(Dynamic Voltage Scaling, DVS)模块, 可以更有效地利用节点的各种资源。动态能量管理是当节点周围没有感兴趣的事件发生时, 部分模块处于空闲状态, 把这些组件关掉或调到更低能耗的休眠状态。动态电压调节是当计算负载较低时, 通过降低微处理器的工作电压和频率来降低处理能力, 从而节约微处理器的能耗, 很多处理器, 如 Strong ARM 都支持电压频率调节。

1.2.3 无线传感器网络的特点

1. 计算和存储能力有限

传感器节点是一种微型嵌入式设备, 要求它的价格低、功耗小, 这些限制必然导致其携带的处理器能力比较弱, 存储器容量比较小。为了完成各种任务, 传感器节点需要利用有限的计算和存储资源完成监测数据的采集和转换、数据的管理和处理、应答汇聚节点的任务请求和节点控制等多种工作。

2. 动态性强

传感器网络的拓扑结构可能因为下列因素而改变: 环境因素或电能耗尽造成的传感器节点出现故障或失效; 环境条件变化可能造成无线通信链路带宽变化, 甚至时断时通; 传感器网络的传感器、感知对象和观察者这三个要素都可能具有移动性; 新节点的加入。这就要求传感器网络系统要能够适应这种变化, 具有动态的系统可重构性。

3. 网络规模大、密度高

为了获取尽可能精确、完整的信息, 无线传感器网络通常密集部署在大片的监测区域内, 传感器节点数量可能达到成千上万个, 甚至更多。大规模网络通过分布式处理大量的采集信息能够提高监测的精确度, 降低对单个节点传感器的精度要求; 通过大量冗余节点的协同工作, 使得系统具有很强的容错性并且增大了覆盖的监测区域, 减少了盲区。

4. 可靠性高

传感器网络特别适合部署在恶劣环境或人类不宜到达的区域, 传感器节点可能工作在露天环境中, 遭受太阳的暴晒或风吹雨淋, 甚至遭到无关人员或动物的破坏。传感器节点往往采取随机部署, 如通过飞机撒播或发射炮弹到指定区域进行部署。这些都要求传感器

节点非常坚固,不易损坏,能适应各种恶劣环境条件。由于监测区域环境的限制以及传感器节点数目巨大,不可能人工“照顾”到每一个传感器节点,因此网络的维护十分困难,甚至不可能。传感器网络的通信保密性和安全性也十分重要,要防止监测数据被盗取和获取伪造的监测信息。因此,传感器网络的软硬件必须具有鲁棒性和容错性。

5. 针对具体应用

不同的应用背景对传感器网络的要求不同,其硬件平台、软件系统和网络协议必然会有很大差别。只有让系统更贴近应用,才能做出最高效的目标系统。针对每一个具体应用来研究传感器网络技术,这是无线传感器网络设计不同于传统网络的显著特征。

6. 以数据为中心

在传感器网络中,人们只关心某个区域的某个观测指标的值,而不会去关心具体某个节点的观测数据,以数据为中心的特点要求传感器网络能够脱离传统网络的寻址过程,快速有效地组织起各个节点的信息并融合提取出有用信息,直接传送给用户。

例如,在应用于目标跟踪的传感器网络中,跟踪目标可能出现在任何地方,对目标感兴趣的用户只关心目标出现的位置和时间,并不关心是哪个节点检测到目标的。事实上,在目标移动的过程中,必然是由不同的节点提供目标的位置信息的。

1.3 无线传感器网络的应用及关键技术

1.3.1 无线传感器网络的应用

1. 军事方面的应用

在军事领域中,无线传感器网络将会成为 C4ISRT(Command, Control, Communication, Computing, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance and Targeting)系统不可或缺的一部分。C4ISRT 系统的目标是利用先进的高科技技术,为未来的现代化战争设计一个集命令、控制、通信、计算、智能、监视、侦察和定位为一体的战场指挥系统,受到了军事发达国家的普遍重视。传感器网络由密集型、低成本、随机分布的节点组成,自组织性和容错能力使其不会因为某些节点在恶意攻击中的损坏而导致整个系统的崩溃,这一点是传统的传感器技术无法比拟的,也正是这一点使传感器网络非常适合应用于恶劣的战场环境中,包括监控我军兵力、装备和物资,监视冲突区,侦察敌方地形和布防,定位攻击目标,评估损失和探测核、生物和化学攻击等。

2. 环境科学和预报系统方面的应用

随着人们对于环境的日益关注,环境科学所涉及的范围越来越广泛。传感器网络在环境研究方面可用于监视农作物灌溉情况、土壤空气情况、牲畜和家禽的环境状况和大面积的地表监测等,还可以通过跟踪鸟类、小型动物和昆虫进行种群复杂度的研究等。基于传感器网络的 ALERT 系统中就有数种传感器用来监测降雨量、河水水位和土壤水分,并依此预测爆发山洪的可能性。类似地,传感器网络可实现对森林环境监测和火灾报告,平常状态下定期报告森林环境数据,当发生火灾时,这些传感器节点通过协同合作会在很短的