



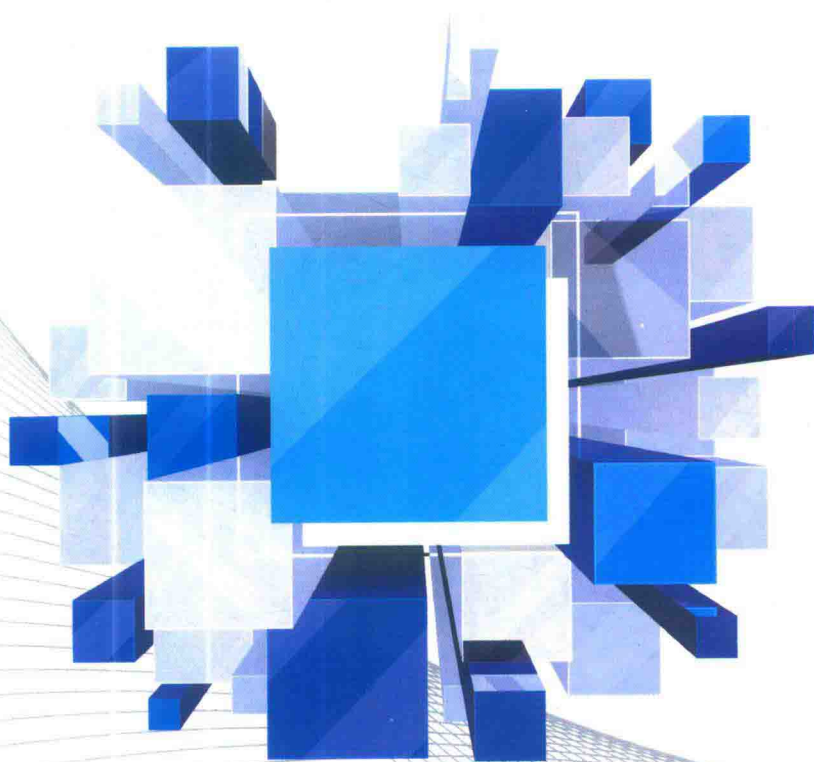
中国电子学会物联网专家委员会推荐

普通高等教育物联网工程专业“十三五”规划教材

无线传感器网络

Wireless Sensor Networks

主编 冯涛 郭显



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

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“十三五”规划教材

无线传感器网络

主编 冯涛 郭显

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了无线传感器网络的基本概念、Contiki 操作系统、应用层协议、运输层协议、网络层协议、数据链路层协议、物理层、定位技术、时钟同步、能量管理,对各部分现有的经典协议做了详细阐述。本书还介绍了无线传感器网络标准协议 ZigBee 协议和 6LoWPAN 协议,并通过 Contiki 操作系统下的简单仿真实例讲解了无线传感器网络的基本工作机制。

本书内容丰富、语言简练,理论叙述深入浅出。本书可作为高等院校物联网工程、通信工程、计算机科学与技术及相关专业的本科生和研究生教材,也可供从事相关领域工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络/冯涛,郭显主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.6
普通高等教育物联网工程专业“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5606-4415-8

I. ①无… II. ①冯… ②郭… III. ①无线电通信—传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 064034 号

策 划 刘玉芳

责任编辑 刘玉芳 马武装

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 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西大江印务有限公司

版 次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 12.25

字 数 283 千字

印 数 1~3000 册

定 价 23.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4415 - 8/TP

XDUP 4707001-1

如有印装问题可调换

普通高等教育物联网工程专业“十三五”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
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
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系主任 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院长 副教授

前 言

随着物联网技术的不断发展,无线传感器网络已成为研究热点领域之一。传感器技术、微机电系统、现代网络和无线通信等技术的进步,为建立低功耗、低成本的无线传感器网络提供了有利条件。无线传感器网络为日益增加的应用需求提供了足够的发展空间和有效的解决方案,扩展了人们获取物理世界信息的能力。无线传感器网络作为边缘网络,将客观世界的物理信息同传输网络连接在一起,将在下一代互联网、物联网中为人们提供最直接、最有效和最真实的信息。无线传感器网络具有十分广泛的应用前景,将在智慧城市、智慧医疗、精细农业、智能能源、环境监测、抢险救灾等领域发挥巨大潜力。

无线传感器网络可以自组织组网,与传统网络相比具有许多优势。然而,无线传感器网络是资源受限的网络,其硬件平台、网络协议、应用设计都需考虑其资源受限的特点,以满足特殊的通信和应用需求。

本书结合无线传感器网络的特点,采用自顶向下的方法,首先介绍广泛使用的无线传感器网络操作系统 Contiki,然后按照网络协议栈的应用层、运输层、网络层、数据链路层和物理层的顺序逐层介绍各层的经典技术,这样做的好处是便于读者在阅读本书时能够进行实验操作,做到理论与实践相结合。本书也对无线传感器网络的支撑技术、定位技术、时钟同步技术和能量管理技术做了介绍。最后,介绍了两种无线传感器网络的标准协议 ZigBee 协议和 6LoWPAN 协议。

在本书的编写过程中,主编冯涛研究员、郭显副教授对本书做了全面统筹规划以及全书内容的审校工作,方君丽讲师编写了第7章物理层内容,张恩展讲师编写了第11章 ZigBee 协议部分的内容。除第7章和第11章外,其他内容由郭显、冯涛编写。此外,特别感谢兰州理工大学网络与信息安全研究所的王晶、鲁烨博士,硕士陈成、郭嘉琦、汪燕、赵炯等对本书中的资料整理做了大量工作。

本书得到了国家自然科学基金项目 61461027、61462060 和兰州理工大学校级规划教材项目的资助。

编 者

于 2016 年 10 月 5 日

目 录

第 1 章 绪论.....	1	3.1.1 Sensor LZW	33
1.1 传感器节点结构.....	1	3.1.2 分布式源编码机制.....	34
1.1.1 传感器节点特点.....	2	3.2 查询处理.....	35
1.1.2 软件系统.....	3	3.2.1 查询描述方法.....	36
1.2 传感器网络结构和协议栈.....	3	3.2.2 数据融合.....	40
1.2.1 传感器网络结构.....	3	3.3 数据管理系统.....	41
1.2.2 传感器网络协议栈.....	4	3.3.1 Cougar.....	43
1.3 标准协议.....	6	3.3.2 TinyDB.....	43
1.4 传感器网络特征及应用.....	7	3.3.3 Antelope.....	44
1.4.1 传感器网络特征.....	7	3.4 网络管理.....	45
1.4.2 传感器网络应用.....	8	3.4.1 MANNA 体系结构.....	47
1.5 本书结构安排.....	10	3.4.2 SNMS 体系结构.....	48
参考文献.....	11	参考文献.....	49
第 2 章 Contiki 操作系统.....	12	第 4 章 运输层协议.....	51
2.1 概述.....	12	4.1 RMST 协议.....	51
2.2 特点.....	12	4.2 CODA 协议.....	53
2.3 安装.....	14	4.2.1 基于接收者的拥塞检测.....	54
2.3.1 ubuntu 系统下 Contiki 安装.....	14	4.2.2 开放环逐跳反压.....	54
2.3.2 Windows 系统下 Contiki 安装.....	15	4.2.3 封闭环多源调整.....	55
2.3.3 Cooja 仿真工具.....	16	4.3 PSFQ 协议.....	55
2.4 Contiki 目录结构.....	17	4.3.1 注入操作.....	55
2.5 Contiki 操作系统运行原理.....	20	4.3.2 提取操作.....	56
2.5.1 Protothread.....	21	4.3.3 状态报告.....	57
2.5.2 进程控制块.....	21	4.4 GARUDA 协议.....	57
2.5.3 进程调度.....	22	4.4.1 单个/首个分组传输机制.....	58
2.5.4 事件调度.....	24	4.4.2 核心节点构造.....	59
2.5.5 定时器.....	26	4.4.3 两阶段丢包恢复机制.....	59
2.6 Cooja 仿真工具举例.....	27	参考文献.....	60
参考文献.....	32	第 5 章 网络层协议.....	62
第 3 章 应用层协议.....	33	5.1 数据为中心平面结构路由协议.....	62
3.1 信源编码.....	33	5.1.1 洪泛机制.....	63

5.1.2 闲聊路由.....	64	参考文献.....	112
5.1.3 SPIN 协议.....	64		
5.1.4 定向扩散.....	66	第 8 章 定位技术.....	113
5.1.5 谣传路由.....	67	8.1 测距技术.....	113
5.2 位置感知路由协议.....	68	8.1.1 到达时间 ToA.....	113
5.2.1 MECN 协议.....	69	8.1.2 到达时间差 TDoA.....	114
5.2.2 有损链路位置转发机制.....	70	8.1.3 到达角度 AoA.....	114
5.2.3 GAF 协议.....	72	8.1.4 接收信号强度.....	115
5.2.4 GEAR 协议.....	73	8.2 基于距离的定位.....	115
5.3 基于 QoS 的路由协议.....	74	8.2.1 三边测量法.....	115
5.3.1 SAR 协议.....	74	8.2.2 三角测量法.....	115
5.3.2 SPEED 协议.....	75	8.2.3 迭代多边定位和协作多边定位.....	116
5.4 层次化路由协议.....	77	8.2.4 基于 GPS 的定位.....	117
5.4.1 LEACH 协议.....	77	8.3 距离无关定位.....	118
5.4.2 PEGASIS 协议.....	79	8.3.1 Ad Hoc 定位系统 APS.....	119
参考文献.....	81	8.3.2 APIT.....	119
		参考文献.....	120
第 6 章 数据链路层协议.....	83		
6.1 CSMA 机制.....	83	第 9 章 时钟同步.....	121
6.2 基于竞争的 MAC 协议.....	86	9.1 时钟同步基础.....	121
6.2.1 S-MAC 协议.....	87	9.1.1 同步消息.....	121
6.2.2 B-MAC 协议.....	91	9.1.2 通信时延.....	123
6.3 基于预约的 MAC 协议.....	93	9.2 时钟同步协议.....	123
6.4 混合 MAC 协议.....	96	9.2.1 NTP 协议.....	123
参考文献.....	99	9.2.2 TPSN 协议.....	124
		9.2.3 RBS 协议.....	126
第 7 章 物理层.....	101	9.2.4 LTS 协议.....	127
7.1 无线通信系统组成.....	101	9.2.5 FTSP 协议.....	128
7.2 信源编码.....	102	9.2.6 TDP 协议.....	130
7.2.1 模拟数据数字化.....	102	9.2.7 Mini-Sync 和 Tiny-Sync 协议.....	132
7.2.2 脉码调制和增量调制.....	102	参考文献.....	132
7.3 信道编码.....	103		
7.3.1 信道类型.....	105	第 10 章 能量管理.....	134
7.3.2 信道信息传输.....	106	10.1 局部能量管理.....	135
7.3.3 差错检测与纠正.....	106	10.1.1 处理器子系统.....	135
7.4 调制.....	106	10.1.2 通信子系统.....	135
7.4.1 调制类型.....	106	10.1.3 总线频率和内存时序.....	136
7.4.2 模拟幅度调制.....	107	10.1.4 活动存储器.....	136
7.4.3 数字调制.....	108	10.1.5 电源子系统.....	137

10.2 动态电源管理.....	138	12.2 6LoWPAN 网络体系结构.....	161
10.2.1 动态操作模式.....	138	12.2.1 6LoWPAN 网络的优势.....	163
10.2.2 动态调度.....	140	12.2.2 6LoWPAN 网络的关键技术.....	163
10.2.3 节能模式.....	141	12.2.3 6LoWPAN 网络面临的问题.....	164
10.3 概念架构.....	141	12.2.4 6LoWPAN 网络解决方案.....	164
参考文献.....	143	12.3 6LoWPAN 适配层技术.....	166
第 11 章 ZigBee 协议	144	12.3.1 6LoWPAN 协议栈.....	166
11.1 物理层协议.....	144	12.3.2 适配层基本功能.....	166
11.2 MAC 层协议.....	145	12.3.3 适配层数据帧结构.....	167
11.2.1 超帧结构.....	145	12.3.4 适配层分片和重组.....	168
11.2.2 MAC 层帧结构.....	146	12.3.5 适配层报头压缩.....	169
11.3 网络层协议.....	149	12.3.6 6LoWPAN 网络路由.....	169
11.3.1 网络层功能.....	149	12.4 RPL 路由协议.....	172
11.3.2 网络拓扑结构.....	150	12.4.1 RPL 协议概述.....	172
11.3.3 数据传播.....	150	12.4.2 RPL 协议功能和原理.....	174
11.4 路由.....	151	12.4.3 DODAG 的构建.....	174
11.4.1 路由代价.....	151	12.4.4 RPL 协议路由过程.....	175
11.4.2 路由表.....	151	12.4.5 环路避免和环路检测.....	177
11.4.3 路由发现.....	152	12.5 CoAP 协议.....	177
11.4.4 路由维护和修复.....	153	12.5.1 CoAP 协议栈.....	178
11.4.5 网络层服务.....	154	12.5.2 CoAP 协议特点.....	178
11.4.6 网络层分组结构.....	154	12.5.3 CoAP 协议消息类型.....	179
11.5 应用层协议.....	155	12.5.4 CoAP 协议的 URI.....	180
11.5.1 应用层架构.....	155	12.5.5 CoAP 协议交互模型.....	180
11.5.2 应用层帧结构.....	156	12.5.6 CoAP 协议安全问题.....	181
11.6 ZigBee 协议安全机制.....	157	12.5.7 CoAP 协议安全模式.....	181
11.6.1 加密.....	157	12.5.8 CoAP 协议总结.....	181
11.6.2 授权.....	158	12.6 6LoWPAN 网络举例.....	182
11.6.3 APS 子层安全命令.....	158	12.6.1 星型网通信仿真.....	182
参考文献.....	159	12.6.2 多跳网通信仿真.....	184
第 12 章 6LoWPAN 协议	160	12.6.3 CoAP 应用仿真.....	185
12.1 6LoWPAN 概述.....	160	参考文献.....	186

第1章 绪 论

随着无线通信技术、数字电子技术和网络技术的飞速发展,极小的传感器节点具备了较强的数据感知、数据处理和通信能力,使得基于大规模传感器节点协作的无线传感器网络的实现和部署成为可能。无线传感器网络具有广泛的应用领域,如智慧城市、智能医疗、智能建筑、智能车以及各种监控应用等,逐渐成为人们生活的一部分。

为了实现传感器网络现有的和未来的应用,需要先进、高效的通信协议。无线传感器网络由大规模的传感器节点构成,传感器节点以高密度的形式部署在感知区域(感知某种物理现象的区域)或接近感知区域的位置。为了实现可靠、有效的观察并启动正确的处理行为,要求传感器节点采集的信息中能够提供正确检测/估计出现象的物理特征^[1],如感知区域的温度值等。然而,由于节点采集的信息具有时域和空域的相关性,要求数据的源节点不是直接发送采集数据,而是将采集的数据在本地做简单计算后仅发送要求的数据和经过处理的数据。因此,无线传感器网络的这些特性给通信协议的设计提出了特殊的挑战。

在能耗方面,单个传感器节点的本质特征对通信协议的设计提出了挑战,即无线传感器网络的应用和通信协议要能够实现高效节能。传感器节点一般是电池供电,能量有限,传统网络协议设计主要考虑改进吞吐量、时延等性能指标,而无线传感器网络协议设计则主要考虑节能问题。无线传感器网络部署是设计无线传感器网络协议时必须考虑的另一个因素,传感器节点的位置不需要事先规划,它允许在不可达的位置或灾难救援中随机部署,然而,这种随机部署要求设计自组织的协议。传感器节点传输范围小,大规模传感器节点高密度部署时,节点可能相互靠近,因此,节点间的通信可利用多跳通信方式,因为多跳通信的能耗低于传统的单跳通信。而且,由于高密度的部署,传感器节点的感知物理现象可能在时域和空域上具有相关性。为了改进无线传感器网络的效率,研究者设计了基于时-空域相关性的无线传感器网络协议^[2-4]。

1.1 传感器节点结构

传感器节点一般由传感器模块、处理器模块、无线通信模块和能量供应模块四个基本模块组成,如图 1-1 所示。传感器模块负责监测区域内信息的采集和数据转换;处理器模块负责整个传感器节点的操作,包括存储和处理本身采集的数据以及其他节点发来的数据;无线通信模块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;能量供应模块为传感器节点提供运行所需的能量,通常采用微型电池。

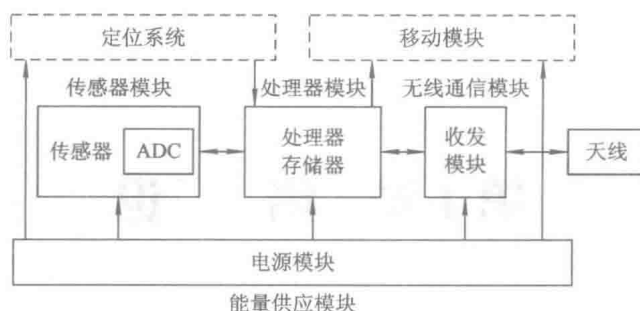


图 1.1 传感器节点结构

另外，有一些应用可能会要求传感器节点具有定位和移动功能，这些传感器节点还需要携带定位模块和移动管理模块。

1.1.1 传感器节点特点

传感器节点在实现各种网络协议和应用系统时，需考虑以下一些现实特点。

1. 电源能量有限

传感器节点一般由电池供电，但传感器节点体积微小，能够携带的电池有限。在大规模传感器网络中，传感器节点个数多、成本低廉、分布区域广，而且有可能部署环境复杂，人员不易到达，难以更换电池。如何高效使用能量实现最大化网络生命周期是传感器网络所面临的首要挑战。根据图 1-2，在传感器节点的各组成模块中，绝大部分能量消耗在无线通信模块上，而且在无线通信模块的发送、接收、空闲和睡眠四种状态中，空闲侦听与收发数据消耗的能量相当，睡眠状态消耗的能量最少。因此，采用占空比技术是传感器网络协议中节能的最有效技术。

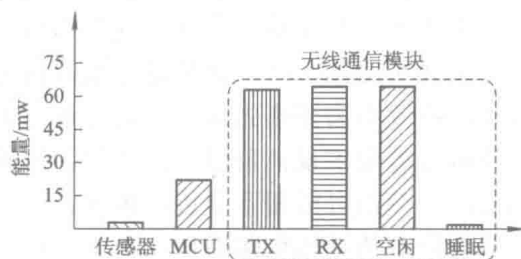


图 1.2 传感器节点能量消耗情况

2. 通信能力有限

无线通信的能量消耗 E 与通信距离 d 的关系为

$$E = kd^n$$

其中，参数 n 满足关系 $2 < n < 4$ ， k 为常量。因此，在满足通信连通度的前提下应尽量减少单跳通信距离。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。在大规模的传感器网络中，通常采用多跳路由的传输机制。此外，传感器节点的无线通信带宽有限，通常仅有几百 kb/s 的速率。

3. 计算和存储能力有限

传感器节点是一种微型嵌入式设备，其体积小、成本和功耗低，因此传感器节点的计

算和存储能力有限。

1.1.2 软件系统

由于传感器节点具有电源能量有限、通信能力有限、计算和存储能力有限的特点，目前通用的操作系统如 Windows、Linux 等不适用于传感器网络应用的开发。目前已有的适合于无线传感器网络的操作系统有 Contiki 操作系统^[5]、TinyOS^[6]等。本书第2章重点介绍了目前广泛使用的无线传感器网络操作系统——Contiki。

Contiki 操作系统^[5]是一个开源的、可高度移植的多任务操作系统，适用于互联网嵌入式系统和无线传感器网络，由瑞典计算机科学学院的 Adam Dunkels 博士和他的团队开发，2015年8月推出了最新的3.0版本，该团队的目的是把 Contiki 操作系统设计成未来的物联网操作系统。Contiki 完全采用 C 语言开发，可移植性好，对硬件要求极低，能够运行在各种类型的微处理器及电脑上，目前已经移植到 8051 单片机、MSP430、AVR、ARM、PC 机等硬件平台上。Contiki 适用于存储资源受限的嵌入式单片机系统，典型的配置下 Contiki 只占用约 2K 字节的 RAM 和 40K 字节的 Flash 存储器。

Contiki 是开源操作系统，适用于 BSD 协议，即可以任意修改和发布，无需任何版权费用，因此已经应用在许多项目中。Contiki 操作系统是基于事件驱动内核的操作系统，在此内核上，应用程序可以在运行时动态加载，非常灵活。在事件驱动内核的基础上，Contiki 实现了由一种轻量级的、名为原线程 Protothread 的线程模型来实现线性的、类似于线程的编程风格。该模型类似于 Linux 和 Windows 中线程的概念，多个线程共享同一个任务栈，从而减少 RAM 占用。

Contiki 操作系统提供可选的任务抢占机制，基于事件和消息传递的进程间通信机制。Contiki 操作系统中还包括一个可选的 GUI 子系统，可以提供对本地串口终端、基于 VNC 的网络化虚拟显示或者远程登录 Telnet 的图形化支持。Contiki 操作系统内部集成了两种类型的无线传感器网络协议栈：uIP^[7]和 Rime^[8]。uIP 是一个小型的符合 RFC 规范的 TCP/IP 协议栈，使得 Contiki 可以直接与 Internet 通信，包含 IPv4 和 IPv6 两种协议栈版本，支持 TCP、UDP、ICMP 等协议，但是编译时只能二选一，不可以同时使用。Rime 是一个为轻量级、低功耗无线传感器网络设计的协议栈，该协议栈提供了大量的通信原语，能够实现从简单的一跳广播通信到复杂的、可靠的多跳数据传输等通信功能。

最重要的是，Contiki 操作系统提供了一款非常直观的无线传感器网络仿真软件——Cooja 仿真器，可用于仿真不同平台、不同类型的无线传感器节点的实时通信过程，方便科研人员研究无线传感器网络的各层协议，也方便开发者在仿真环境下测试开发中的应用系统。

1.2 传感器网络结构和协议栈

1.2.1 传感器网络结构

传感器节点通常部署在感知区域，如图 1-3 所示，这些分散的传感器节点具有采集数

据并向汇聚节点/网关和终端用户路由数据的能力。数据通过多跳、无基础设施的自组织传感器网络到达汇聚节点，再由汇聚节点传输到终端用户。汇聚节点与终端用户间的通信可通过互联网、卫星网络或任何无线网络(如 WiFi、mesh 网络、蜂窝移动网络 3G/4G 以及 WiMAX 网络等)进行，在没有这些网络的环境中，汇聚节点可以直接和终端用户连接。需要注意的是，在图 1-3 中，可能有多个汇聚节点和多个终端用户。

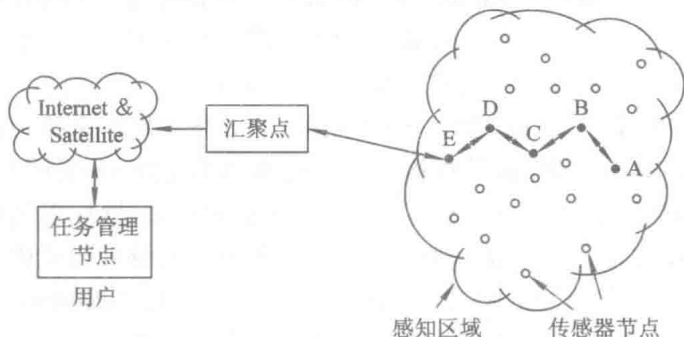


图 1-3 无线传感器网络结构

在传感器网络中，传感器节点承担数据源和路由器两种角色，因此，有两种执行通信的原因：数据源功能和路由器功能。拥有事件信息的数据源节点执行通信功能把生成的数据分组发送给汇聚节点，这种节点称为数据源；传感器节点也承担路由器功能，即把接收到的来自其他节点的分组转发给到达汇聚节点多跳路径上的下一个目标节点。

1.2.2 传感器网络协议栈

传感器网络是自组织的多跳通信网络，数据源与汇聚节点间通常需要中间节点来转发数据。根据开放系统互连 OSI 标准，共有七层网络协议，即应用层、会话层、表示层、运输层、路由层、数据链路层和物理层。然而，一般无线传感器网络不需要表示层和会话层，如图 1-4 所示，在汇聚节点和传感器节点间仅需要以下五层协议就能够实现数据的采集、处理及传输。除了五层协议外，传感器网络可能还需要考虑能量管理、移动管理、任务管理、定位、同步、拓扑管理等问题。

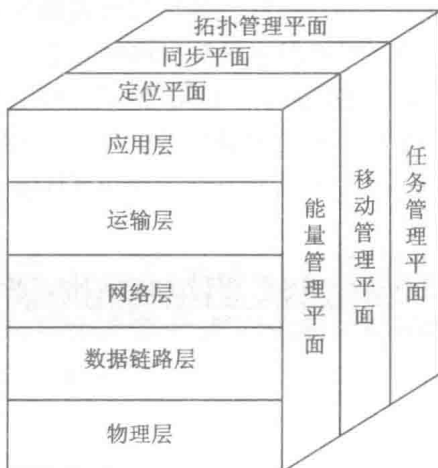


图 1-4 无线传感器网络协议栈

(1) 应用层：应用层包括主要的应用和几个管理功能，为用户提供通过无线传感器网络与物理世界交互的必要接口。应用层定义了数据的表示方法、查询处理方法以及数据和网络管理等功能。

(2) 运输层：当无线传感器网络与互联网或其他外部网络互联时，运输层提供的功能是必需的。传统计算机网络采用的 TCP 协议不能解决无线传感器网络环境面临的挑战，与传统网络协议不同的是，传感器网络中端到端机制不是基于全球寻址机制的，这些机制必须考虑基于“数据或位置”的寻址机制，这些数据或位置可用于表示数据分组的目的地。能耗、可扩展性以及以数据为中心路由的特征等因素意味着传感器网络运输层需要不同的处理机制，因此，这些要求决定了传感器网络需要新的运输层协议。

(3) 网络层：传感器节点以高密度形式部署于感知区域中(如图 1-3 所示)，它需要把感知到的与物理现象相关的信息转发给汇聚节点。然而，传感器节点的通信能力使得传感器节点和汇聚节点之间无法直接通信，它们之间需要高效的多跳无线路由协议，利用中间传感器节点作为中继节点。现有的为无线自组织网络设计的路由技术不适合传感器网络，通常根据以下原则设计传感器网络网络层的协议：

- ① 节能总是考虑的重要因素之一；
- ② 传感器网络是以数据为中心的网络；
- ③ 除了路由之外，通过本地处理，中继节点可以融合来自多个邻居节点的数据；
- ④ 由于传感器网络中节点的数量多，给每个节点唯一的标识符是不可能的，节点可能需要基于它们的数据或位置寻址。

(4) 数据链路层：数据链路层负责封装成帧、差错检测和媒体接入等，它用于确保通信网络中可靠的点到点和点到多点的连接，本书主要讨论传感器网络中的媒体接入策略。无线多跳自组织传感器网络中，媒体接入控制(MAC)协议必须完成两个目标：一是网络基础设施的建立，因为成千上万的传感器节点以高密度的形式分散在感知区域中，MAC 机制必须建立数据传输的通信链路，这样就形成了逐跳通信所必需的基本设施并且提供自组织的能力；二是公平和有效地共享传感器节点间的通信资源，这些资源包括时间、能量和频率。目前提出的一些 MAC 协议已经解决了这些需求。

就媒体接入机制而言，节能仍是需要考虑的重要因素，MAC 协议必须支持传感器节点的节能模式，而节能最有效的方法是没有数据传输时关闭收发装置。尽管这种节能方法可能提供最好的节能效果，但它也可能破坏网络的连通性。一旦收发设备关闭，传感器节点就不能接收来自邻居节点的任何分组，实际上中断了与网络的连接，并且，就节能而言，收发设备的打开与关闭同样需要消耗能量。事实上，如果在每个空闲间隙盲目地关闭收发设备，对整个时间周期而言，传感器节点最终消耗的能量可能比不关闭收发设备消耗的能量更多。因此，仅当在节能模式花费的时间比某个门限值更大时，节能模式才可能是有效的。对无线传感器节点而言，可能有多种运行模式，这些模式依赖于微处理器、内存、A/D 转换器和收发设备的状态数量。

(5) 物理层：物理层负责频率选择、载波频率生成、信号监测、调制和数据加密等问题，本书主要介绍信号传播、调制等。

(6) 时钟同步：除了协议栈中的通信功能外，无线传感器网络还需要装备一些辅助设备以完成提出方案的功能模块。在无线传感器网络中，每个传感器设备需要配置用于内部

运行的本地时钟,与传感器设备感知、处理和通信相关的每个事件与本地时钟控制的定时信息相关联。因为用户对来自多个传感器节点的协同信息感兴趣,与每个传感器设备数据相关的定时信息需要一致。而且,传感器网络应该能够对分布式传感器节点的感知事件正确排序,以精确建立物理环境的模型。这些定时需求决定了设计无线传感器网络时钟同步协议的必要性。

(7) 传感器定位:除了时间信息外,与物理现象的密切交互需要相关的位置信息,无线传感器网络与周围环境的物理现象相关联,为了提供观察的感知区域的精确视图,采集的信息需要和传感器节点的位置相联系。而且,监控应用中无线传感器网络可能用于跟踪某种对象,这也要求位置信息和跟踪算法相结合,更进一步说,基于位置的服务和通信协议需要位置信息,因此,定位协议应该与通信协议栈相结合。

(8) 能量管理:无线传感器节点一般采用电池供电,节点能量非常有限,所以能量消耗是无线传感器网络重点关注的问题。无线传感器节点的体积非常小,难以容纳大容量电源。另外,无线传感器网络由大量节点组成,通过人工方式更换节点电池或给电池充电几乎不可能,节点太小也会限制可再生能源和自动充电机制的使用。最后,少数几个节点的失效可能会导致整个网络完全被分割成孤立的子网,因此无线传感器网络各层协议设计中都应考虑能量管理问题。

(9) 拓扑管理:为了维护传感器网络的连通性和覆盖范围,需要几种拓扑管理方案。拓扑管理算法为具有长生命周期网络的部署提供了有效的方法,而且,拓扑控制协议有助于确定收发功耗级别以及传感器节点的活动周期,以便在保持网络连通的同时能量消耗最小。

1.3 标准协议

可用传感器平台的异构性导致了应用实现的兼容问题,因此,通信协议标准化是必要的。为此,提出了面向长电池寿命、低复杂性的低数据率无线收发技术规范 IEEE 802.15.4 标准^[9],该标准可以选择三种不同的通信频率,如 2.4 GHz、915 MHz 和 868 MHz。同时,在 868 MHz 和 915 MHz 频带上使用二进制相移键控 BPSK,而在 2.4 GHz 频带上使用偏移正交相移键控 O-QPSK,MAC 层可以提供星型、Mesh 和基于分簇树的拓扑结构,节点的传输范围为 10~100 m,而数据传输速率为 20~250 kb/s。实际上,IEEE 802.15.4 标准已经成为低功耗通信物理层和 MAC 层事实上的标准,它允许具有不同功能和能力的平台整合到同一网络中。

在 IEEE 802.15.4 标准之上,已经提出了两个重要的标准协议:Zigbee 标准协议^[10]和 6LoWPAN 标准协议^[11]。Zigbee 标准是由 Zigbee 联盟提出的,该标准的目的是通过无线个域网提出支持低数据率、低功耗、安全和可靠的低成本、基于标准的无线网络方案。Zigbee 标准不同于 IEEE 802.15.4 标准,IEEE 802.15.4 标准仅定义了物理层和 MAC 层,而 Zigbee 标准定义了网络层和应用框架,应用对象由用户定义。

基于 IEEE 802.15.4 标准的协议与 IP 网络不兼容,因此,无线传感器网络难以与互联网相整合。这样导致传感器难以与基于 Web 的设备、服务器或浏览器通信,因而要求网关

从无线传感器网络收集信息并与互联网通信,但这种方法在网关节点存在单点故障问题且增加了与网关相邻的节点的压力。为了使无线传感器网络与互联网技术相结合,IETF提出了6LoWPAN标准,该标准定义了IPv6协议栈在IEEE 802.15.4上的实现。6LoWPAN标准使得任何设备都能与互联网互联互通,极大地方便了无线传感器网络的部署。本书第12章将详细介绍6LoWPAN标准。

1.4 传感器网络特征及应用

1.4.1 传感器网络特征

1. 大规模网络

为了获取感知区域的精确信息,通常要求部署大量的传感器节点。传感器网络的大规模特征可能包括两方面的含义:一方面在森林防火、精细农业、智能电网以及环境检测等应用中要求传感器节点部署在很大的地理区域内;另一方面要求高密度部署传感器。传感器网络的大规模特征具有以下优点:通过不同空间视角获得的信息具有更大的信噪比;通过分布式处理大量的采集信息能够提高检测的精确度,降低单个节点传感器的精度要求;大量冗余节点的存在,使得系统具有很强的容错性能;大量节点能够增大覆盖的检测区域,减少洞穴或者盲区。

2. 自组织网络

传感器节点通常部署在没有网络基础设施的环境中,大规模的传感器节点通过飞机播撒等手段随机部署到检测区域中,传感器节点的位置及其相邻的节点无法事先确定,这就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建立转发检测数据和控制指令的多跳无线网络系统。另外,传感器网络的网络拓扑结构经常发生变化,自组织特性要能够适应这种变化。

3. 动态性网络

传感器网络的拓扑结构可能由于以下原因而经常发生变化:环境因素或能量耗尽而造成节点“死亡”;风吹、水冲等外界因素导致节点移动或传感器节点本身移动;新节点的加入;无线通信链路中断;等等。这就要求传感器网络对这种动态变化具有自适应性。

4. 可靠的网络

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,遭受太阳的曝晒或风吹雨淋,甚至遭到无关人员或其他破坏;传感器节点往往随机部署,如通过飞机撒播或发射炮弹到指定区域;这些都要求传感器节点非常坚固,不易损坏,适应各种恶劣环境条件。

由于检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”每个传感器节点,网络的维护十分困难,甚至不可维护。传感器网络的通信保密性和安全性也十分重要,要防止检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. 应用相关的网络

传感器网络用来感知物理世界的物理现象,不同传感器网络应用关心不同的物理现象,因此对传感器的应用系统也有多种多样的要求。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,所以传感器网络不能像 Internet 一样,有统一的通信协议平台。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的应用中,更关心的是传感器网络的差异。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. 以数据为中心的网络

目前互联网中,网络设备用网络中唯一的 IP 地址标识,资源定位和信息传输依赖于终端、路由器和服务器等网络设备的 IP 地址。如果想访问互联网中的资源,首先需知道存放资源的服务器 IP 地址,可以说目前的互联网是一个以地址为中心的网络。

传感器网络是任务型网络,脱离传感器网络谈论传感器节点没有任何意义,传感器网络中的节点采用节点编号标识,节点编号是否需要全网唯一取决于网络通信协议的设计。由于传感器节点随机部署,构成的传感器网络与节点编号之间的关系是完全动态的,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的信息后汇报给用户。这种以数据本身作为查询或传输线索的思想更接近于自然语言交流的习惯,所以通常说传感器网络是一个以数据为中心的网络。

1.4.2 传感器网络应用

1. 军事领域的应用

在军事领域,由于无线传感器网络具有密集型、随机分布的特点,使其非常适合应用于恶劣的战场环境。利用无线传感器网络能够实现监测敌军区域内的兵力和装备、实时监控战场状况、定位目标、监测核攻击或者生物化学攻击等目的。

2. 辅助农业生产

无线传感器网络特别适用于以下几个方面的生产和科学研究:例如,大棚种植室内及土壤的温度、湿度、光照监测、珍贵经济作物生长规律的分析与测量、农作物优质育种和生产等,可为农村发展与农民增收带来极大的帮助。采用无线传感器网络建设农业环境自动监测系统,用一套网络设备完成风、光、水、电、热和农药等的数据采集和环境控制,可有效提高农业集约化生产程度,提高农业生产种植的科学性。

3. 生态监测与灾害预警

无线传感器网络可以广泛应用于生态环境监测、生物种群研究、气象和地理研究、洪水监测、火灾监测等。环境监测为环境保护提供科学的决策依据,是生态保护的基础。在野外或者人工不宜监测的区域布置无线传感器网络可以长期进行无人值守的不间断监测,为生态环境的保护和研究提供实时的数据资料。具体的应用包括:通过跟踪珍稀鸟类等动物的栖息、觅食习惯进行濒危种群的研究;在河流沿线区域布置传感器节点,随时监测水

位及水资源被污染的情况；在泥石流、滑坡等自然灾害易发的地区布置节点，可提前发出灾害预警，及时采取相应的抗灾措施；可在重点保护林区布置大量节点随时监控内部火险情况，一旦发现火情，可立刻发出警报，并给出具体位置及当前火势的大小；可将节点布置在易发生地震、水灾等灾害的地区、边远山区或偏僻野外地区，用于临时应急通信。

4. 基础设施状态监测系统

无线传感器网络技术对于大型工程的安全施工以及建筑物安全状况的监测有积极的帮助作用。通过布置传感器节点，可以准确地观察大楼、桥梁和其他建筑物的状况，及时发现险情，及时维修，避免造成严重后果。

5. 工业领域的应用

在工业安全方面，传感器网络技术可用于危险的工作环境，例如在煤矿、石油钻井、核电厂和组装线上布置传感器节点，可以随时监测工作环境的安全状况，为工作人员的安全提供保证。另外，传感器节点还可以代替部分工作人员到危险的环境中执行任务，不仅降低了危险程度，还提高了对险情的反应精度和速度。

由于无线传感器网络部署方便、组网灵活，其在仓储物流管理和智能家居方面的所作优势也逐渐显现出来。无线传感器网络使传感器形成局部物联网，实时交换和获得信息，并最终汇聚到物联网，形成物联网重要的信息来源和基础应用。

6. 智能交通中保障安全畅通

智能交通系统(ITS)是在传统交通体系的基础上发展起来的新型交通系统，它将信息、通信和控制和计算机技术以及其他现代通信技术综合应用于交通领域，并将“人—车—路—环境”有机地结合在一起。在现有的交通设施中增加一种无线传感器网络技术，能够从根本上缓解困扰现代交通的安全、通畅、节能和环保等问题，同时还可以提高交通工作效率。因此，将无线传感器网络技术应用于智能交通系统已经成为近几年的研究热点。

智能交通系统主要包括交通信息的采集、交通信息的传输、交通控制和诱导等几个方面。无线传感器网络可以为智能交通系统的信息采集和传输提供一种有效手段，用来监测路面与路口各个方向的车流量、车速等信息。

智能交通系统主要由信息采集输入、策略控制、输出执行、各子系统间的数据传输与通信等子系统组成。信息采集子系统主要通过传感器采集车辆和路面信息，然后由策略控制子系统根据设定的目标，并运用计算方法计算出最佳方案，同时输出控制信号给执行子系统，以引导和控制车辆的通行，从而达到预设的目标。

无线传感器网络还可以用于交通信息发布、电子收费、车速测定、停车管理、综合信息服务平台、智能公交与轨道交通、交通诱导系统、路况检测和维护综合信息平台等技术领域。

7. 医疗系统的应用

近年来，无线传感器网络在医疗系统和健康护理方面已有很多应用，例如，监测人体的各种生理数据，跟踪和监控医院中医生和患者的行动，以及医院的药物管理等。如果在住院病人身上安装特殊用途的传感器节点，例如心率和血压监测设备，医生就可以随时了解被监护病人的病情，在发现异常情况时能够迅速实施抢救。