



“高等学校本科计算机类专业应用型人才培养研究”项目规划教材

无线传感器网络

Wireless Sensor Network

白跃彬 程 琨 编著

高等教育出版社

“高等学校本科计算机类专业应用型人才培养研究”项目规划教材

无线传感器网络

Wuxian Chuanganqi Wangluo

白跃彬 程 琨 编著

高等教育出版社·北京

内容提要

本书介绍了无线传感器网络研究领域的前沿研究成果和应用技术。全书按照“总—分”结构组织,可分为三部分内容。第一部分介绍了无线传感器网络的基本知识和体系结构,重点包括 MAC 协议、路由协议、拓扑控制等内容。第二部分是无线传感器网络的相关支持技术,包括定位、时间同步、数据管理、网络安全。第三部分是无线传感器网络的应用技术,包括主流的操作系统、控制软件,以及相关应用实例分析。选材上,本书大量吸收了无线传感器网络领域近年来的高水平研究成果,基本反映出了当前无线传感器网络的发展趋势。

本书内容丰富、覆盖面广,可作为高等学校计算机、网络、通信等专业的教材或参考书,对于相关工程技术人员亦有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络 / 白跃彬, 程琨编著. —北京:
高等教育出版社, 2015. 6
ISBN 978-7-04-042413-3

I. ①无… II. ①白… ②程… III. ①无线电通信-
传感器-高等学校-教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 067416 号

策划编辑 韩 飞 责任编辑 韩 飞 封面设计 张 志 版式设计 杜微言
插图绘制 杜晓丹 责任校对 陈 杨 责任印制 张泽业

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 中国农业出版社印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 16
字 数 350 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2015 年 6 月第 1 版
印 次 2015 年 6 月第 1 次印刷
定 价 23.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 4241300

出版说明

信息化社会需要大量的计算机类专业人才。据统计,目前我国计算机类专业布点总数已逾2800个,这些专业点为国家的现代化建设培养了大批计算机类专业人才,其中绝大多数是应用型人才。如何按照社会需求,确定合理的人才培养目标,并在其制导下培养特色突出的应用型人才,是提高教育质量和水平的重要任务。

为了更好地引导高校计算机类各专业点构建有特色的培养方案,例如,能够体现行业特色、区域需求,同时建设体现这些特色的学科基础课和专业课,促进本科计算机类专业应用型人才培 养,出版一批体现应用型人才培 养特色的新形态教材,教育部高等学校计算机类专业教学指导委员会、全国高等学校计算机教育研究会与高等教育出版社联合组建了“高等学校本科计算机类专业应用型人才培 养研究”课题组,基于《计算机类专业教学质量国家标准》,围绕软件工程、网络工程、物联网工程等专业应用型人才培 养的研究展开相关工作。

在研究的基础上,课题组汇聚80多所高校的教学经验,协同创新,开展了核心课程教学资源建设以及教材建设,这套教材作为课题研究的重要成果之一,具有以下几个显著特点。

- 以课题研制的《高等学校本科计算机类专业应用型人才培 养指导意见》为指导,委托有丰富教学实践经验的教师编写,内容覆盖了不同专业的学科基础课、专业核心课及专业方向课。

- 教材内容基于理论适用,突出理论与实践相结合,强调“做中学”,引入丰富的实验案例,摒弃大而全、重理论轻实践的做法,结构新颖、努力突出专业特色。

- 采用纸质教材与数字资源相结合的形式,将教学内容与课程建设充分展示出来,使教师和学生借助网络实现全方位的个性化教学。

相信这套教材的出版能够起到推动各高校计算机类专业建设、提高教学水平和人才培养质量的作用。希望广大教师在教学过程中对教材提出宝贵的意见和建议,使其在使用过程中不断完善。

教育部高等学校计算机类专业教学指导委员会

全国高等学校计算机教育研究会

高等教育出版社

2015年3月

前言

长久以来，无线传感器网络一直是计算机网络与嵌入式系统等领域的研究热点。近年来随着物联网的兴起，无线传感器网络又迎来了新一轮的研究、应用热潮。本书对与无线传感器网络有关的新技术和新方法进行了梳理，结合经典研究成果，对无线传感器网络的研究现状和趋势进行了论述与分析。在成文过程中，本书借鉴了大量高水平研究文献及国内外相关著作、教材，吸取它们的优点，并对这些知识进行了有机的融合。

本书从无线传感器网络的基本概念出发，按照“总—分”结构对其应用、研究现状、体系结构等进行了详细介绍。在内容安排上，第1章对无线传感器网络的基本概念、发展、研究历史、应用等内容进行了介绍。第2章从总体上对无线传感器网络的体系结构、设计方法、相关标准进行了总结与阐述。第3章围绕无线传感器网络的MAC协议，对这一领域的研究现状进行了分类和总结，着重介绍了其中的典型MAC协议。第4章对路由协议进行了详细的分类与论述，并分析对比了典型的研究成果。针对无线传感器网络的拓扑控制问题，第5章阐述了这一领域关注的主要问题与取得的研究成果。第6章针对无线传感器网络的目标定位与跟踪问题介绍了常用的定位方法与跟踪手段。第7章针对时间同步问题探讨了基本的时间同步方法，并对常用的时间同步协议进行了介绍。第8章从网络中数据的存储、查询、融合处理等问题出发，阐述了数据管理对于无线传感器网络的重要性。第9章从安全角度出发，在分析安全问题的基础上，对无线传感器网络的安全保护技术进行了介绍，包括如何应对攻击、典型的安全协议以及相关的安全管理技术。第10章对无线传感器网络的典型操作系统或控制软件进行了梳理与介绍，重点关注这些软件的设计思想与基本结构。第11章从四个典型应用的设计与实验出发，力图通过典型的例子将无线传感器网络的“理论”与“实践”结合起来，使读者对其应用与研究有更直观的认识。

本书写作过程中参考了大量国内外研究文献、专著与教材，并尽可能地详细罗列出了相关引用文献，在此谨向其作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

作者
2015年元月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目录

第 1 章 无线传感器网络概述	1
1.1 无线传感器网络的概念	1
1.2 无线传感器网络的特征	2
1.3 常见的无线传感器网络	5
1.3.1 无线传感器-执行器网络	5
1.3.2 多媒体无线传感器网络	6
1.3.3 水下无线传感器网络	8
1.3.4 地下无线传感器网络	10
1.4 无线传感器网络的发展	11
1.5 无线传感器网络评价指标	12
1.6 无线传感器网络的应用	13
1.6.1 工业应用	14
1.6.2 军事应用	15
1.6.3 医疗应用	15
1.6.4 家庭与环境应用	16
1.7 无线传感器网络与物联网	16
1.7.1 物联网的概念	16
1.7.2 物联网与无线传感器网络	17
1.8 无线传感器网络面临的挑战	18
习题	19
参考文献	20
第 2 章 无线传感器网络的体系结构与设计	21
2.1 无线传感器网络体系结构概述	21
2.1.1 无线传感器网络的拓扑结构	22
2.1.2 无线传感器网络的体系结构	23
2.1.3 网络协议栈	24
2.1.4 无线传感器网络的部署	26
2.2 无线传感器节点的设计	26
2.2.1 硬件设计	26
2.2.2 操作系统	30
2.3 无线传感器网络设计的影响因素	31
2.3.1 制约设计的因素	31
2.3.2 硬件限制	31
2.3.3 网络设计	31
2.3.4 功耗	32
2.4 无线传感器网络的跨层设计	32
2.4.1 跨层设计的概念	33
2.4.2 常见的跨层设计方法	33
2.5 无线传感器网络的相关标准	35
2.5.1 IEEE 802.15.4	35
2.5.2 ZigBee	37
习题	39
参考文献	39
第 3 章 MAC 协议	41
3.1 MAC 协议概述	41
3.2 CSMA 机制	42
3.3 基于竞争的 MAC 层协议	44
3.3.1 以 S-MAC 协议为代表的同步协议	44
3.3.2 以 B-MAC 协议为代表的	

异步协议	52	4.6.4 SPEED 协议	92
3.4 基于保留时隙的 MAC 层协议	58	4.7 路由协议的对比	97
3.4.1 TRAMA 协议	59	4.8 其他路由协议	99
3.4.2 TSMP 的 MAC 协议	64	习题	100
3.5 差错控制	66	参考文献	102
3.5.1 传输能量控制	66	第 5 章 拓扑控制	104
3.5.2 自动重传请求	66	5.1 网络部署	105
3.5.3 前向纠错	67	5.2 功率控制	106
3.5.4 混合式自动重传请求	67	5.2.1 基于节点度的方法	106
习题	67	5.2.2 基于临近图的方法	107
参考文献	69	5.2.3 其他方法	108
第 4 章 路由协议	71	5.3 活动调度	110
4.1 路由协议概述	71	5.3.1 基于连通度的方法	110
4.2 能量感知路由	72	5.3.2 基于网络容量的方法	113
4.2.1 能量路由	73	5.3.3 自适应方法	114
4.2.2 能量多径路由	74	5.3.4 STEM 协议	116
4.3 以数据为中心的路由协议	76	5.4 聚簇管理	117
4.3.1 SPIN 协议	77	5.4.1 基本的层次分簇	118
4.3.2 定向扩散协议	78	5.4.2 混合式分簇	118
4.4 分层路由协议	80	5.4.3 其他方法	119
4.4.1 LEACH 协议	81	习题	120
4.4.2 PEGASIS 协议及其改进	82	参考文献	121
4.4.3 TEEN 协议	83	第 6 章 定位与目标跟踪	123
4.4.4 CTP 协议	85	6.1 定位技术简介	123
4.5 基于地理位置的路由协议	87	6.2 测距方法	126
4.5.1 GEAR 协议	87	6.2.1 基于信号的相关测距方法	126
4.5.2 PRADA 路由协议	88	6.2.2 基于时间的测距方法	127
4.5.3 其他转发机制	88	6.3 常用定位方法	129
4.6 基于 QoS 的路由协议	89	6.3.1 基于距离的定位方法	129
4.6.1 SAR 协议	89	6.3.2 距离无关的定位方法	132
4.6.2 最小代价路径转发协议	90	6.4 目标跟踪	134
4.6.3 多路径可靠路由	90	6.4.1 跟踪滤波技术	135
		6.4.2 跟踪算法	136

习题	138	第 9 章 无线传感器网络安全	175
参考文献	139	9.1 无线传感器网络面临的安全	
第 7 章 时间同步	140	问题	175
7.1 时间同步概述	140	9.1.1 安全目标	176
7.2 时间同步技术	141	9.1.2 网络攻击与防御	177
7.3 时间同步协议	142	9.2 SPINS 安全协议	184
7.3.1 TPSN 协议	143	9.2.1 SNEP 协议	185
7.3.2 RBS 协议	144	9.2.2 μ TESLA 协议	186
7.3.3 FTSP 协议	147	9.3 无线传感器网络安全管理技术	189
7.3.4 其他协议	147	9.3.1 密钥管理	190
习题	149	9.3.2 攻击检测	193
参考文献	149	9.3.3 路由安全	195
第 8 章 数据管理	151	9.3.4 数据融合安全	196
8.1 数据管理概述	152	习题	196
8.1.1 数据模型	152	参考文献	197
8.1.2 系统结构	154	第 10 章 面向无线传感器网络的操作	
8.2 数据存储	156	系统	200
8.2.1 数据命名	157	10.1 TinyOS 简介	200
8.2.2 以数据为中心的		10.1.1 TinyOS 的设计思想	201
存储	158	10.1.2 TinyOS 的组件	202
8.2.3 数据索引	161	10.1.3 TinyOS 的通信模型和	
8.3 数据查询	162	网络协议	205
8.3.1 查询处理的一般流程	163	10.1.4 TinyOS 的事件驱动与	
8.3.2 查询处理	163	任务调度	207
8.4 数据融合	167	10.1.5 对实时应用的支持	209
8.4.1 数据融合的意义	168	10.2 Contiki 简介	209
8.4.2 数据融合的分类	169	10.2.1 Contiki 的体系结构	210
8.4.3 协议栈中的数据融合	169	10.2.2 Contiki 的进程模型	
8.4.4 数据融合的时间控制	170	和调度	211
8.4.5 与 QoS 相关的数据		10.2.3 通信与网络协议	211
融合	171	10.3 OpenWSN 简介	213
8.4.6 其他数据融合技术	171	10.3.1 OpenWSN 的设计	
习题	172	定位	213
参考文献	173	10.3.2 OpenWSN 的软硬件	
		架构	214

171	10.3.3 OpenWSN 的网络	216	应用概述	223
	协议栈	216	11.1.1 军事应用	223
172	10.4 其他操作系统简介	216	11.1.2 生态监测	224
176	10.4.1 MANTIS	216	11.1.3 城市应用	225
177	10.4.2 Nano-RK	218	11.2 无线传感器网络应用实例	
181	10.4.3 LiteOS	219	分析	226
182	10.5 总结与展望	220	11.2.1 火山监测系统	226
186	参考文献	222	11.2.2 住宅能耗监测	230
	第 11 章 无线传感器网络的典型应用	223	11.2.3 水生环境监测	235
190	11.1 无线传感器网络典型实际		11.2.4 数据中心温度监测	237
192	安全应用		参考文献	242
196	公共安全应用			
196	工业应用			
197	农业应用			
	第 10 章 无线传感器网络应用案例			
200	案例			
200	10.1 TinyOS 应用案例			
201	10.1.1 TinyOS 的硬件			
202	10.1.2 TinyOS 的软件			
202	10.1.3 TinyOS 的通信			
202	10.1.4 TinyOS 的事件驱动			
207	10.1.5 TinyOS 的定时器			
209	10.1.6 TinyOS 的内存管理			
210	10.1.7 TinyOS 的串口			
210	10.1.8 TinyOS 的无线通信			
211	10.1.9 TinyOS 的功耗			
211	10.1.10 TinyOS 的扩展			
213	10.2 Contiki 简介			
214	10.2.1 Contiki 的硬件			
214	10.2.2 Contiki 的软件			
214	10.2.3 Contiki 的通信			
214	10.2.4 Contiki 的事件驱动			
214	10.2.5 Contiki 的定时器			
214	10.2.6 Contiki 的内存管理			
214	10.2.7 Contiki 的串口			
214	10.2.8 Contiki 的无线通信			
214	10.2.9 Contiki 的功耗			
214	10.2.10 Contiki 的扩展			
214	10.3 OpenWSN 简介			
214	10.3.1 OpenWSN 的硬件			
214	10.3.2 OpenWSN 的软件			
214	10.3.3 OpenWSN 的通信			
214	10.3.4 OpenWSN 的事件驱动			
214	10.3.5 OpenWSN 的定时器			
214	10.3.6 OpenWSN 的内存管理			
214	10.3.7 OpenWSN 的串口			
214	10.3.8 OpenWSN 的无线通信			
214	10.3.9 OpenWSN 的功耗			
214	10.3.10 OpenWSN 的扩展			

第1章 无线传感器网络概述

随着科学技术的发展,信息的获取、处理、传输、存储和利用已广泛应用到各个领域。无线传感器网络作为信息获取的一种重要手段,伴随着物联网技术研究和应用的热潮再度受到人们的广泛关注。

单纯从字面上理解,无线传感器网络是使用无线通信方式的传感器网络,是传感器网络的延伸。传感器网络被认为是本世纪最重要的技术之一,2003年2月,美国《麻省理工技术评论》(Technology Review)评出对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术,传感器网络位居第一;《商业周刊》同年撰文指出无线传感器网络是未来四大高新技术产业之一;2005年,世界经济论坛《2005全球议程》发表《智能传感器如何拯救地球》一文;2008年,《福布斯》预测“未来的传感器网络将比现在的Internet大得多”。

无线传感器网络综合了传感器技术、微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)^①技术、无线通信技术和分布式信息处理技术等,将信息世界与物理世界紧密地结合起来,从而实现“无处不在”且“不知不觉”的计算模式。无线传感器网络正逐渐走进日常应用,人们可以通过传感器网络直接感知自然世界,极大地扩展了网络的功能和人类获取信息的手段。它的发展和应用将对人类的日常生活和产业变革带来极大的影响,产生巨大的推动力。

1.1 无线传感器网络的概念

目前的无线传感器网络是由大量传感器节点组成并部署在一定范围内的多跳自组织网络。近年来随着微机电系统技术的发展,智能传感器技术不断进步。相比传统的传感器,这些智能传感器体积更小、成本更低、计算能力更强。它们能探测周边环境、收集数据,再根据预定的决策处理过程,将感知到的数据传回给用户。

无线传感器网络属于无基础设施网络的一种。无基础设施网络不像手机通信使用的蜂窝网络需要固定基站,也不像无线局域网那样需要无线接入点。无线传感器网络的节点多是依靠无线电收发装置进行短距离的点对点通信,其他节点也可以帮助进行信号中继,从而使得两个相隔较远的节点可以通信。因此,现阶段的无线传感器网络多为无线多跳网络,如Ad hoc网络^②

^① 微机电系统(MEMS)一般指尺寸在几厘米以下乃至更小的小型装置,是一个独立的智能系统,主要由传感器、执行器和微能源三大部分组成。

^② Ad hoc网络是一种没有有线基础设施支持的移动网络。在Ad hoc网络中,所有的节点都是被允许移动的。Ad hoc网络最初是应用于军事领域,其前身是分组无线网(Packet Radio Network, PRNET)。

等，并且无线传感器网络的节点多被认为是静止的或者移动性不高。

由于无线传感器网络在发展过程中经历了不同的阶段，从而造成网络的形态存在差异，因此要给出一个一般性的定义并不是一件容易的事。从功能角度来说，无线传感器网络是一个集信息感知、信息处理、信息传递和信息提供为一体的网络。无线传感器网络通常包括一个或多个汇聚节点（Sink Node）、网关和大量微型传感器节点，这些传感器节点组成集中式网络或无线多跳自组织网络，其网络拓扑结构多种多样。一般来说，传感器节点组成各种形态的网络，相互协作完成信息搜集和初步处理，再将初步结果发送给汇聚节点；汇聚节点在大多数网络中承担网关功能，即负责和其他网络（如因特网、卫星网络）等进行交互，将数据送达用户。如图 1.1 所示，部署在一定区域的无线传感器节点组成一个无线多跳网络，采集到的数据以多跳的形式发送给汇聚节点，汇聚节点通过 Internet 或卫星将数据传输给用户。任务管理节点通过互联网或卫星与汇聚节点相连。

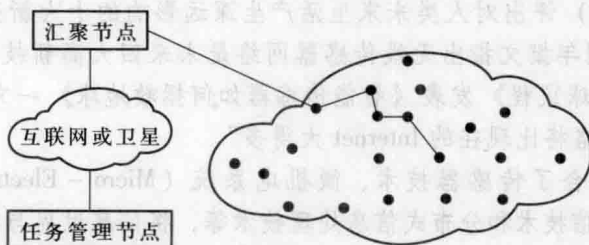


图 1.1 无线传感器网络示意图

按照部署方式的不同，无线传感器网络可分为结构化和非结构化两种^[1]。在非结构化无线传感器网络中，大量传感器多以 Ad hoc 模式随机部署，部署之后无需人员操作即可开始执行监视或数据搜集工作；而在结构化无线传感器网络中，部分或全部节点的部署方式是预先规划好的。相比较而言，结构化无线传感器网络在执行同样的功能时所需的节点较少，维护也比较方便。然而，非结构化无线传感器网络却具有快速部署及可在不安全的环境（如战场）下快速开展工作的优势，从而在军事、区域监控等随机、突发状况环境中应用广泛。

时至今日，无线传感器网络在军事、工业、医疗、家庭和环境保护等领域都有着广泛应用。例如，利用无线传感器网络来监视空气质量、水文特征，或者用来帮助医生监测患者的生命体征。网络将收集到的数据实时传回到终端用户以供进一步整理和分析。应用的日趋复杂对无线传感器网络的通信、处理能力提出了更加苛刻的要求，因此，无线传感器网络的设计也别具一格。

1.2 无线传感器网络的特征

无线传感器网络是多种信息技术的交叉领域，综合了计算机、通信、网络、分布式处理、传感器、嵌入式系统等多个领域。其由大量传感器组成自治网络实现对物理世界的感知与信息

获取。与传统的无线网络（如 WLAN、蜂窝移动电话网络）相比，当前的无线传感器网络表现出节点资源受限、网络规模大、自组织网络、以数据为中心和专用网络的特点。

1. 节点资源受限

无线传感器网络的节点资源受限主要表现为以下几点。

• 节点能量有限

无线传感器节点通常使用电池供电。并且由于体积微小，因此只能依靠小体积、低电量的电池进行供电。一般来说，无线传感器网络由于较低的制造成本、大规模分布区域和庞大的部署规模，节点数量众多，因此在很多场合不太可能对节点的电池进行更换。因此，无线传感器网络首要考虑的一点是如何能让节点尽可能长时间地工作。在某些场合下，也有使用太阳能电池或安装独立的供电装置，这种供电方式多见于持久性的无线传感器网络应用中。

如图 1.2 所示，传感器节点消耗能量最多的模块是无线通信模块、处理器模块和传感器模块，这其中又以无线通信模块消耗的能量最多。无线传感器节点执行通信任务时远比计算任务耗能，在 100 m 距离上传输 1 bit 信息的能量大约相当于执行 3000 条计算指令消耗的能量。

• 计算、存储能力有限

从构成上来说，无线传感器节点属于典型的嵌入式设备。受到体积、成本的限制（如图 1.3 所示的 MicaZ 传感器，其尺寸为 5.7 cm × 3.2 cm × 0.6 cm），节点的计算能力一般也不强。如 Mica 系列传感器节点^[2]，采用 RISC 结构的 Atmel ATmega 128L CPU，其计算能力与 1988 年生产的 8088CPU 相当，并且内存只有 4 KB。除此之外，ARM 系列芯片也多用于制造传感器节点。

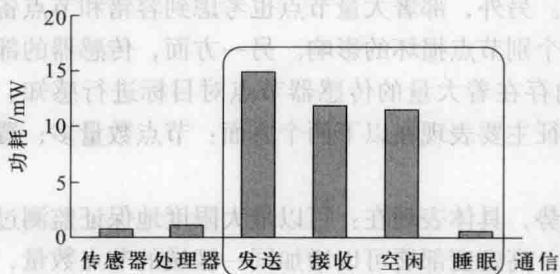


图 1.2 无线传感器网络功耗分析^[13]

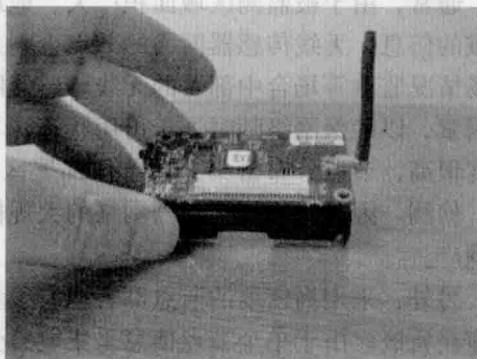


图 1.3 MicaZ 传感器

同样，无线传感器节点的存储能力也远不如其他嵌入式设备，大部分无线传感器节点的存储能力都不足 1 MB。为了完成既定的任务，无线传感器需要进行数据感知、数据存储和处理、响应汇聚节点的任务请求、进行节点管理控制等多种任务。因此，如何提高能量利用效率成为了这一过程的关键。

除了降低传感器节点的能耗,传感器操作系统还设计了动态能量管理(Dynamic Power Management, DPM)和动态电压调节(Dynamic Voltage Scaling, DVS)功能。动态能量管理是当部分硬件模块空闲时(比如没有感兴趣的事件发生时),将它们关闭或调整进入睡眠模式,进一步降低能量消耗;动态电压调节是指当微处理器的计算负载较低时,通过调节其工作电压和频率来降低处理能力,从而节省能量消耗。

• 通信能力有限

无线传感器节点的通信能力受限表现为通信距离受限、带宽受限和通信质量受限。一般地,无线通信的能量消耗与通信距离之间的关系如下:

$$E = k \times d^n \quad (1.1)$$

在式(1.1)中, E 表示能量消耗, k 为系数, d 为通信距离, n 通常满足 $2 < n < 4$ 。 n 的取值受环境因素影响,如通信距离上地形复杂、障碍物多,造成的干扰就大。此外,天线质量也会影响信号发射。综合考虑下通常取 n 为3,即通信能量消耗与距离的三次方成正比,并且随着距离增大,通信的能量消耗将急剧提高。因此,无线传感器网络节点的通信范围多为几十米到一百米。

当前无线传感器网络多采用多跳通信机制,通信带宽也受到很大限制,通常传输速率不超过几百 Kbps。此外,受环境因素,如复杂地形、高山、建筑物、风雨雷电等自然现象的影响,无线通信质量会受到很大的干扰,频繁出现通信中断现象。因此在通信能力受限的情况下,如何设计网络的通信机制来满足应用的需求是无线传感器网络设计的重点。

2. 网络规模大

通常,由于被监测区域面积广大、地理环境复杂,一方面,为了能够更精确地获取被监测区域的信息,无线传感器网络的节点少则几十,多则成千上万,例如在进行森林消防、环保、战场情况监测等场合中部署的无线传感器网络。另外,部署大量节点也考虑到容错和节点备份等因素,以确保网络随时处于可用状态,不受个别节点损坏的影响。另一方面,传感器的部署密度很高,节点分布密集,在单位部署区域内存在着大量的传感器节点对目标进行感知、识别、侦测。因此,无线传感器网络的大规模特征主要表现在以下两个方面:节点数量多;覆盖范围广。

另外,采用高密度的节点部署也有很多优势,具体表现在:可以最大限度地保证监测过程不存在盲区;由于单个节点信息采集能力受限,高密度部署可以增加同一区域的节点数量,弥补这一缺陷;大量冗余节点的存在保证了网络的容错能力,使得网络具有较高的生存期。

3. 自组织网络

在典型的无线传感器网络应用中,节点通常被随机部署,节点位置事先无法精确确定,因此节点间的邻居关系也就无法确定;随着网络的运行,部分节点会损坏而退出网络,后备节点会唤醒而加入网络,并且在某些网络中其节点可以移动,因此,网络的拓扑结构始终处于动态变化中,这就要求节点必须能自动进行自我管理、组成可用的通信网络进行消息和数据的传递。

受限于成本和电池容量，节点不大可能采用大功率、远距离的无线通信模块。单个节点的通信距离有限，因此采取中间节点转发的方式与通信覆盖范围以外的目的节点进行通信。但与移动自组织网络（Mobile Ad hoc NETWORKS, MANET）等相比，无线传感器网络的特别之处在于：节点数量与密度更大；节点不可靠，可能会损毁；拓扑变化更频繁；通常没有全局标识；节点资源受限。

4. 以数据为中心

无线传感器网络是一个以数据为中心的网络。当用户希望查询某些感兴趣的事件信息时，查询请求一般会被转发到每一个节点，而不是一个特定的节点；节点在本地完成相关事件信息的查询和处理后再将结果返回用户。这与因特网中依赖 IP 地址进行资源访问的方式存在本质上的不同。

无线传感器网络类似于一个分布式数据库，但又和传统分布式数据库有着非常大的差别。其网络本身的存在意义也是以搜集感兴趣事件的数据为主，或者说为基础。因此，可以称无线传感器网络是一个以数据为中心的网络。

5. 专用网络

无线自组织网络通常被设计、部署用于特定应用。不同的传感器关注、搜集的信息不同，因此在网络设计之初，根据应用目的的不同选取专用的传感器，从而使得网络的应用范围比较狭窄，几乎不可能用作其他用途或回收再次使用。

另外，由于应用背景不同，不同目的的无线传感器网络的软件系统和通信协议也可能存在差别。对于一个传感器网络而言，让软件设计实现更贴近应用，有针对性地进行设计和优化，才能以最高效的方式完成既定目标。尽管如此，不同无线传感器网络仍存在共性，这也是本书所关注的。

1.3 常见的无线传感器网络

按照无线传感器网络的形态与应用场合的不同，可以将无线传感器网络分为无线传感器-执行器网络（Wireless Sensor and Actor Network, WSAN）、多媒体无线传感器网络（Wireless Multimedia Sensor Network, WMSN）、水下无线传感器网络（Wireless Underwater Sensor Network, UWSN）、地下无线传感器网络（Wireless Underground Sensor Network, WUSN）^[4]。

1.3.1 无线传感器-执行器网络

无线传感器-执行器网络是由执行信息感知的传感器和执行控制任务的执行器节点构成的无线传感器网络^[3]。其典型的应用场合是楼宇内的火灾监控，传感器节点负责监视烟雾、温度等，一旦检测到火灾发生，则将信息报告给相应区域的执行器，执行器控制屋顶的消防喷头，打开并喷水灭火。

如图 1.4 所示, 在无线传感器-执行器网络中, 负责信息搜集的传感器节点一般是采用低功耗、计算存储能力有限的微型传感器; 而执行器相比之下则有更多的能量、更强的计算处理能力。在网络中, 大多数情况下还会有控制中心 (如图 1.4 中的任务管理节点), 负责整个网络的监控与管理。

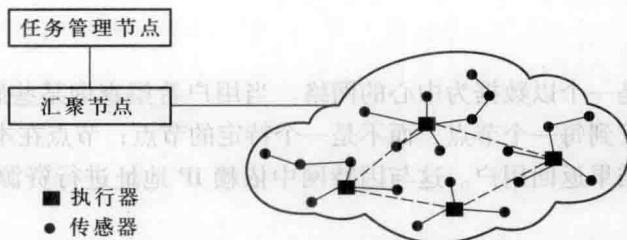


图 1.4 无线传感器-执行器网络示意图

在网络工作过程中, 传感器搜集信息和数据并传送至执行器, 后者对获取的信息进行处理并根据预先设定的处理规则执行相应的控制动作。在这种工作模式下, 网络自动执行控制动作, 无需管理员介入。而且由于数据直接在执行器中进行处理并进行动作执行, 因此这种模式的实时性较好。这种工作模式被称为自动模式。

在半自动模式中, 传感器将信息传给基站, 基站对信号分析处理后再将控制命令发送给执行器, 最后由执行器执行。整个工作过程需要管理员进行一定程度的参与, 相比于上一种模式, 这种网络更加集中化。

无线传感器-执行器网络具有以下特点: ① 实时性高, 网络中传感器节点的信息只需传递给相应执行器节点, 网络的丢包和延时都比较小; ② 网络寿命长, 由于大部分工作由执行器完成, 因此节省了传感器的能量; ③ 信息融合, 相比普通的无线传感器网络, 无线传感器-执行器网络自身可实现从信息搜集到信息融合和利用的过程; ④ 协同执行, 无线传感器-执行器网络中涉及传感器与传感器、传感器与执行器以及执行器与执行器之间的协同。无线传感器-执行器网络不同于普通无线传感器网络的另一点在于, 在设计普通无线传感器网络时, 能量消耗是首要考虑因素, 而在无线传感器-执行器网络中, 更多地考虑网络的实时性和可靠性。

无线传感器-执行器网络目前广泛应用于火警监测、智能家居, 并在军事等领域也有大量应用。

1.3.2 多媒体无线传感器网络

多媒体无线传感器网络 (Wireless Multimedia Sensor Network, WMSN) 是在无线传感器网络基础上, 利用配备有摄像头、话筒等视频、音频采集设备的传感器节点来获取实时多媒体信息的一种新型传感器网络, 如图 1.5 所示。多媒体无线传感器网络对网络和传感器节点都提出了更高的要求 and 更大的挑战, 目前针对该网络的研究热点集中于网络协议、服务质量 (Quality

of Service, QoS) 保障、数据处理以及无线多媒体传感器平台设计与实现等方面。

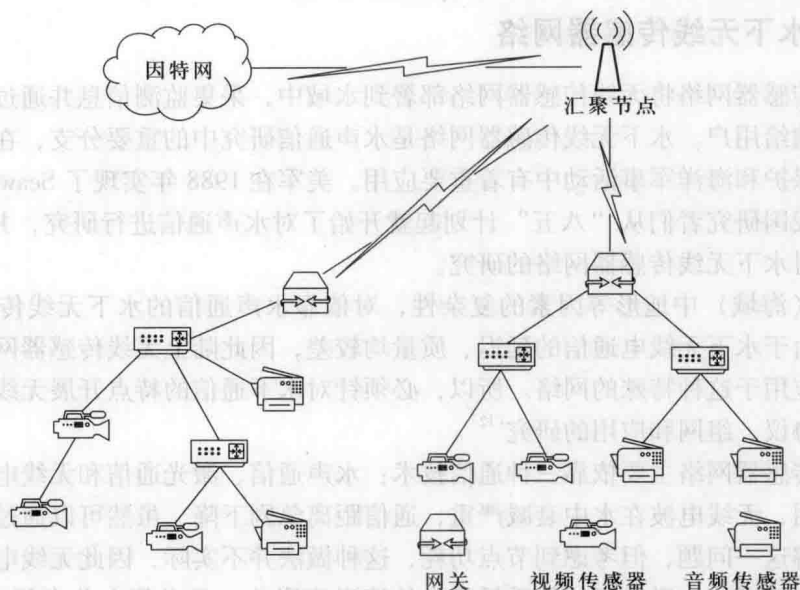


图 1.5 多媒体无线传感器网络示意图

多媒体无线传感器网络设计的挑战主要来自多媒体编解码、网络带宽和相关上层应用提出的 QoS 保障。传感器搜集到的原始音、视频流媒体信息通常很庞大，而传感器本身又没有足够的空间来存储流媒体信息，通常这些流媒体信息需要被快速处理后发送给网络的使用者。多媒体编解码及压缩技术决定了传回的流媒体信息的质量，考虑到有限的网络带宽，必须在保证回传信息质量的前提下尽可能减少流媒体的体积；同时，编解码和压缩的过程必须迅速，以满足实时性等 QoS 要求，因为没人愿意看一顿一顿的视频或者听断断续续的声音。同时，尽管传感器节点的设计与实现（编解码、压缩等）已经尽可能地减少了数据传输量，但是网络本身的设计过程中还应当预留足够的带宽，并在路由协议等设计上保证数据传输的实时性。

在多媒体无线传感器网络的设计与实现中，另一个矛盾的焦点在于功耗与节点性能。一般来说，采用了更高效、更强大的音、视频编解码和压缩算法需要节点具备更高的计算能力，而计算能力需求又导致使用功耗更高的芯片；同时，网络长时间运行也会导致节点耗能增加。因此，在这种网络中要最大限度的追求功耗与性能之间的完美平衡。

近年来，分布式信源编码（Distributed Source Coding, DSC）^[14] 为解决以上问题的一个重要研究方向。其最主要的特点如下：第一，编码计算非常简单，解码相对比较复杂；第二，互不通信但信息相关的信源（信源节点不能直接通信，但其数据有相关性）压缩可以达到信源间有互相通信情况下的压缩效率。采用这种技术，使得多个传感器节点只需采集信息，然后将信息发送到一个接收节点统一进行处理。在这种模式下，可以在各个传感器不互相通信的前