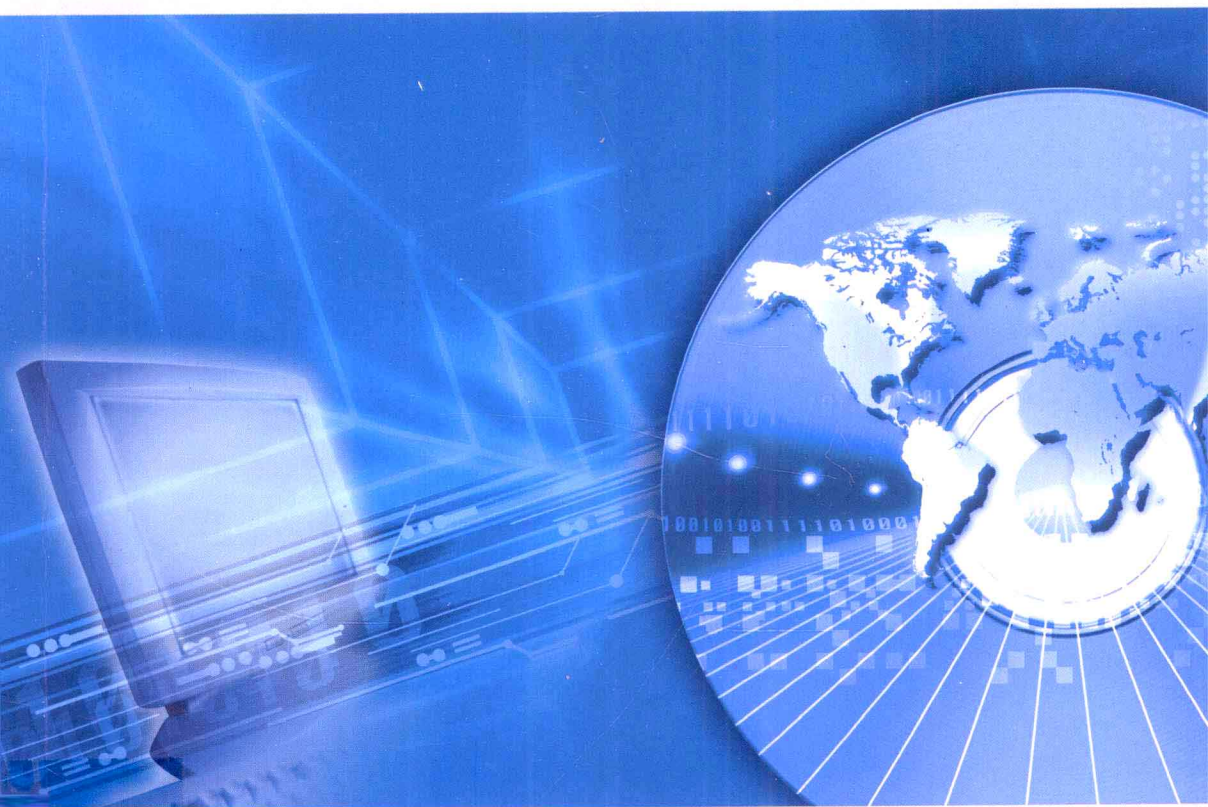


张德干 张晓丹 李 光 著

无线传感与路由技术



 科学出版社
www.sciencep.com

无线传感与路由技术

张德千 张晓丹 李 光 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要阐述了无线传感与路由若干关键技术中几个方面的内容:无线传感器网络拓扑演化模型,基于多尺度变换的图像压缩编码技术,无线传感信息融合模型及方法,适用于网络负载突变的 MAC 协议,基于前向感知因子的能量均衡路由策略,最小传输和自适应负载平衡路由方法,面向 WSN 的隐私保护方法,基于综合准则的无线 Mesh 网络路由方法等。这些技术可以促进物联网及 WSN 技术的发展及应用。

本书可供计算机、网络通信等相关方向的高年级本科生、研究生、教师学习和参考,也适合物联网、无线传感器网络技术以及相关领域的科研和工程开发技术人员阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感与路由技术/张德干,张晓丹,李光著. —北京:科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-036467-8

I. 无… II. ①张…②张…③李… III. ①无线电通信-传感器②计算机网络-路由选择 IV. ①TP212②TN915.05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 010763 号

责任编辑:张艳芬 张 宇 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:嘉华永盛

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:282 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



张德干,男,湖北黄冈英山县人,博士,教授,博导。研究方向为物联网、移动计算、智能控制、无线通信等。主持国家863计划项目、国家自然科学基金项目、教育部新世纪优秀人才计划项目十余项,在SCI和EI索引的计算机领域有影响的国内外期刊和会议上以第一作者发表论文近百篇。出版学术专著多部。获得专利多项。多次担任国际会议的大会主席。

E-mail: gandegande@126.com, zhangdegan@tsinghua.org.cn



张晓丹,女,吉林通化人,博士,副研究员。研究方向为信息融合、物联网、知识检索、无线通信等。主持或参与国家自然科学基金项目、科技部计划项目等多项,在SCI和EI索引的相关研究领域的国内外期刊或学术会议上发表论文近30篇。获得发明专利3项。出版专著2部。



李光,女,黑龙江大庆人,高级工程师。研究方向为信号处理、无线传感、信息融合、物联网、网络通信等。主持或参与科研项目二十余项,在SCI和EI索引的相关研究领域的国内外期刊或学术会议上发表论文多篇。获得专利多项。出版学术专著多部。获得科技奖励多项。

前 言

无线传感与路由技术是下一代互联网远景规划中较为重要的组成部分,是物联网的重要基础支撑技术。众多的无线传感器设备可以组织成无线传感器网络(wireless sensor network, WSN),这是一个由随机分布的密集型的低成本的传感器、数据处理单元和短程无线通信模块的微小节点通过自组织的方式构成的网络。WSN 是应用于人类生存的物理世界和计算机虚拟世界的一个桥梁,其在工农业、生物医疗、军事、国防、环境监测、抢险救灾等很多领域都拥有十分广阔的应用前景。WSN 可对人类生活的物理世界实现全方位地监测与控制,可有效地改变人们的工作和生活模式。无线传感与路由技术是 WSN 中至关重要的技术。

WSN 的网络层次结构宏观上和普通网络一致,都可以自下而上地分成物理层、数据链路层、网络层、传输层、应用层这五层。当前学术界对于 WSN 技术的研究涵盖了自物理层至应用层的各个层面,无线传感与路由技术是其中的一部分研究内容。本书主要阐述无线传感与路由若干关键技术中如下几个方面的内容:无线传感网络拓扑演化模型,基于多尺度变换的图像压缩编码技术,无线传感信息融合模型及方法,适用于网络负载突变的 MAC 协议,基于前向感知因子的能量均衡路由策略,最小传输和自适应负载平衡路由方法,面向 WSN 的隐私保护方法,基于综合准则的无线 Mesh 网络路由方法等。

本书共 10 章。第 1、2、5 章由张晓丹撰写,第 8、9、10 章由李光撰写,其余各章由张德干撰写。全书由张德干统稿。

本书得到国家 863 计划项目(No. 2007AA01Z188)、国家自然科学基金项目(No. 61170173、60773073、61001174)、教育部新世纪优秀人才计划项目(No. NCET-09-0895)、教育部科技计划重点项目(No. 208010)、天津市自然科学基金项目(No. 10JCYBJC00500)、天津理工大学计算机与通信工程学院“智能计算及软件新技术”天津市重点实验室和“计算机视觉与系统”省部共建教育部重点实验室相关基金的资助。

本书由郑刚教授和宁红云教授审阅。

在撰写本书的过程中,多位教授和专家学者提出了建设性意见,同时,得到了韩静、姜凯雯等同事,戴文博、康学净、程英、王冬、胡玉霞、刘朝敬、梁彦嫔、朱亚男、赵晨鹏、董丹超、曹洪星等研究生的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

真诚欢迎各位专家、读者批评指正。

作 者

2012 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 物联网应用背景	1
1.2 无线传感器设备	3
1.3 WSN	5
1.4 相关技术研究现状	8
1.5 深入研究的意义	11
第 2 章 WSN 概述	14
2.1 WSN 的特征	14
2.1.1 WSN 的特性	14
2.1.2 WSN 的受限性	15
2.2 WSN 的结构	17
2.2.1 WSN 的硬件体系结构	17
2.2.2 WSN 的能量体系结构	18
2.2.3 WSN 的软件体系结构	19
2.2.4 WSN 的通信体系结构	21
2.3 WSN 的 MAC 协议	22
2.4 WSN 的路由协议	23
2.4.1 以数据为中心的路由协议	23
2.4.2 基于层次结构的路由协议	24
2.4.3 基于地理信息的路由协议	25
2.4.4 基于多路径的路由协议	26
2.5 WSN 面临的挑战	27
2.6 本章小结	28
第 3 章 WSN 拓扑演化模型	29
3.1 BBV 加权网络模型	29
3.2 WSN 拓扑演化模型	32
3.2.1 拓扑演化模型	32
3.2.2 拓扑演化过程	35
3.3 理论数据验证和拓扑性质分析	37

3.3.1 理论数据的验证	37
3.3.2 拓补性质的分析	39
3.4 本章小结	41
第4章 基于多尺度变换的图像压缩编码技术	42
4.1 面向 WSN 的图像压缩编码技术概述	42
4.2 多尺度分析的理论基础	43
4.2.1 多尺度分析	44
4.2.2 双尺度方程	44
4.2.3 二维小波变换	45
4.2.4 Mallat 算法	45
4.3 传统图像压缩编码方法	46
4.3.1 DPCM 预测编码	46
4.3.2 EZW 编码	47
4.3.3 SPIHT 编码	50
4.4 改进的图像压缩编码算法	52
4.4.1 小波系数预处理	53
4.4.2 低频部分编码	55
4.4.3 改进的 SPIHT 编码	55
4.5 实验测试及性能比较一	58
4.5.1 小波分解尺度的选择	58
4.5.2 不同阈值化方法作用后的视觉效果图	59
4.5.3 不同阈值化方法在不同尺度下的运行时间	61
4.5.4 加入椒盐噪声的实验结果	62
4.6 实验测试及性能比较二	63
4.6.1 不同算法作用后的视觉效果图	64
4.6.2 不同算法编解码的运行时间	64
4.7 本章小结	66
第5章 无线传感信息融合模型及方法	67
5.1 无线传感信息融合的理论基础	67
5.1.1 简介	67
5.1.2 无线传感信息融合的基本方法	68
5.2 无线传感信息融合过程的结构及模型	70
5.3 无线传感信息融合新方法	75
5.3.1 技术背景	75
5.3.2 证据理论介绍	75

5.3.3 一种新的无线传感信息融合计算方法	76
5.4 无线传感信息融合测试示例	84
5.4.1 测试场景一	85
5.4.2 测试场景二	86
5.4.3 测试场景三	87
5.5 本章小结	87
第6章 适用于网络负载突变的 MAC 协议	89
6.1 WSN 中 MAC 协议设计需要考虑的特性	89
6.2 MAC 协议的分类及原理	90
6.2.1 基于竞争的 MAC 协议	90
6.2.2 基于固定分配的 MAC 协议	93
6.2.3 两者混合的 MAC 协议	94
6.3 面向网络负载突变的节能 MAC 协议	94
6.3.1 相关研究	95
6.3.2 节点分类的设计	96
6.3.3 新的节能 MAC 协议设计	98
6.4 MAC 协议仿真与性能分析	101
6.4.1 网络模拟工具	101
6.4.2 节能 MAC 协议仿真	102
6.5 本章小结	108
第7章 基于前向感知因子的能量均衡路由策略	109
7.1 WSN 路由协议的分类	109
7.2 典型的 WSN 路由协议	110
7.2.1 LEACH 协议	110
7.2.2 HEED 协议	111
7.2.3 TEEN 协议	111
7.2.4 PEGASIS 协议	112
7.2.5 EEUC 协议	112
7.3 基于前向感知因子的能量均衡路由协议	113
7.3.1 模型的建立	113
7.3.2 FAF-EBRP 协议的设计	117
7.3.3 基于 FAF-EBRP 协议和点强度的局部拓扑重构机制	120
7.4 FAF-EBRP 与其他路由策略的实验对比及分析	120
7.4.1 实验工具 OMNET++ 介绍	120
7.4.2 消息的设计	121

7.4.3 实验环境和参数设定	122
7.4.4 性能指标及实验结果分析	123
7.5 本章小结	126
第8章 最小传输和自适应负载平衡路由方法	127
8.1 简介	127
8.2 理论背景	128
8.3 分布式最小传输多播路由算法	129
8.3.1 网络模型的建立	129
8.3.2 协议描述和初始化	130
8.3.3 最小传输多播路由协议	131
8.3.4 仿真与性能分析	137
8.4 自适应负载平衡路由方法	141
8.4.1 无线网络分析模型	141
8.4.2 相关路由协议	142
8.4.3 自适应负载均衡多播路由方法	143
8.4.4 加权流量调度算法	148
8.4.5 维持和修复路由	150
8.4.6 通信延时	151
8.4.7 仿真及分析评价	152
8.5 本章小结	156
第9章 面向 WSN 的隐私保护方法及 LBS 系统	158
9.1 隐私保护相关理论及技术	158
9.1.1 位置 k -匿名模型	158
9.1.2 空间模糊算法简介	159
9.1.3 安全多方计算模型	161
9.2 面向 WSN 的隐私保护方法	161
9.2.1 位置隐私保护方法	161
9.2.2 最优匿名模糊空间的描述	162
9.2.3 最优匿名模糊空间的求解	163
9.2.4 实验验证和对比	166
9.3 查询内容的隐私保护	167
9.4 面向 WSN 的 LBS 系统设计及实现	169
9.4.1 Android 简介	170
9.4.2 系统的总体设计	171
9.4.3 系统实现流程	173

9.4.4 系统运行和测试	183
9.5 本章小结	187
第 10 章 基于综合准则的无线 Mesh 网络路由方法	189
10.1 概述	189
10.2 传统无线 Mesh 网络路由协议	191
10.2.1 DSDV	191
10.2.2 DSR	191
10.2.3 AODV	191
10.3 无线 Mesh 网络的优点及路由协议存在的不足	193
10.3.1 无线 Mesh 网络的优点	193
10.3.2 无线 Mesh 网络路由协议存在的不足	194
10.4 改进的无线 Mesh 网络路由协议基础	195
10.4.1 构建网络模型	195
10.4.2 相关定理及性质	197
10.5 基于综合准则的 EAODV 路由协议描述	198
10.6 仿真结果及性能分析	201
10.7 本章小结	205
参考文献	206

第 1 章 绪 论

1.1 物联网应用背景

自 20 世纪 80 年代桌面电脑进入普通人的生活,到如今全球数十亿用户通过个人电脑和智能设备在 Internet 上分享海量信息,三十多年间,互联网由桌面互联网、移动互联网发展到了一个新的阶段。信息化社会的飞速发展带给人们现实的需求,同时也提出了一个崭新的课题:事物与事物,人与事物乃至人与自然,能否像人与人之间那样通过无处不在的网络随时随地实现信息共享和远程控制?在这种背景之下,物联网作为互联技术进步的新一代产物应运而生。无线传感与路由技术是物联网技术的重要组成部分,它是伴随物联网应用需求的升级而不断发展的技术。

物联网(Internet of things, IOT)这一概念最早于 1999 年由美国麻省理工大学 Auto-ID 研究中心的 Ashton 教授提出,顾名思义,物联网就是“物与物相连的互联网”。在物联网环境下,物理世界中诸如移动电话、便携式计算机、电视、冰箱等电子电器设备,以及人本身,都与信息处理的数字世界相连接,从而提供了一个普适计算(ubiquitous computing)服务环境,而实现这种广泛互联的手段包括了无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)和射频识别(radio frequency identification, RFID)等关键技术。2005 年,国际电信联盟进一步将物联网定义为 4A(anytime, anywhere, anyone, anything)网络,这是科研者规划的蓝图,也是人类的美好愿景。2008 年,IBM 公司预言物联网与互联网结合的最终成果将是“智慧的地球”,随后,欧盟的“e-call”和物联网行动计划、日本的“E-Japan”和“I-Japan”以及韩国的“U-Korea”等国家计划相继上马。2009 年,温家宝总理在视察国内物联网产业时确立了“感知中国”的宏伟目标,同时物联网也被明确列入了国家科学技术长期发展规划,并制定了详细的产业路线图,“十二五”期间国内十大城市将全面部署城市物联网。与前几次科技革命中的后进步伐相比,在物联网这一新的浪潮中,中国保持了与世界领先水平的同步。

物联网的重要特征可总结为:①以服务为中心。从人的需求出发,建立面向服务的基础设施和应用架构,也就是说,物联网不仅要和其他网络一起构成泛在网(ubiquitous network),更应该提供泛在的服务(ubiquitous service)。②及时准确的信息感知。使用微型传感器、RFID、条形码等技术随时自发或可控地获取感兴趣的信息,并保证信息的有效性。③可靠高效的数据传输。通过末端网络与电

信网、互联网等主干网络的连接,将有用信息完整并及时地传送出去。④智能的信息自发处理。处于物联网环境中的人,需要的是特定的服务,而不是未经选择的海量信息。借助基于云计算平台和各种智能算法的应用,物联网不仅可以依据人的需求获取信息,同时能够自动处理和甄别信息,使人身处网络环境,可以随时随地得到想要的服务,却又感觉不到物联网的存在。

物联网的主要支撑技术有:①WSN。如果将泛在网比喻为人的神经系统,那么 WSN 无疑就是由遍布人身体表面的众多神经元细胞构成的末梢神经系统,它不仅可以对需求信息进行感知、判别和融合,还担当着末端传输网络的重要作用。②近距离通信技术。RFID 和蓝牙技术,分别用于用户身份的识别和近距离的数据传输,已经进入市场较长时间。NFC(near field communication),即近场通信技术,是近年来在移动设备尤其是手机上新兴的一种非接触式识别和互联技术,已经被应用于电子支付等特定领域。③嵌入式技术。当生活中如冰箱、空调等事物被植入了特定的嵌入式芯片,它们就成了物联网万千“智能体”中的一员,它们之间可以互相通信甚至合作完成人们需要的服务,这便是物联网现阶段应用最主要的表现形式:M2M(machine to machine)。图 1-1 中,泛在网内各个网络之间的关系得到了直观的体现。

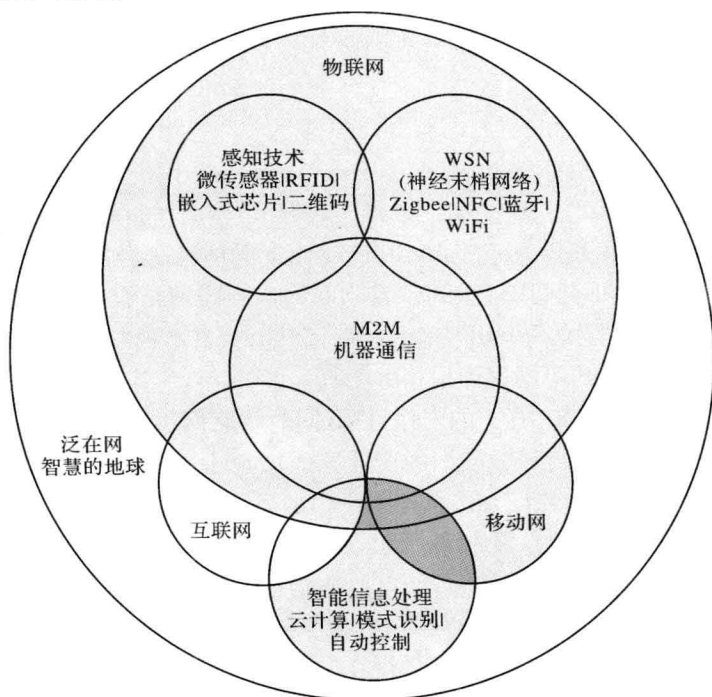


图 1-1 泛在网络构成示意图

物联网在现实生产生活中应用广泛,顾客用手机拍下超市商品包装上的条形码,可以在互联网上查阅该商品已经预存的重要信息;分布于城市各个角落的预警摄像头,具有敏感信息智能识别的功能,可以通过网络互连实现监控信息的共享,形成与报警系统和警员之间的联动;电信运营商和物联网企业推广的“数字家庭”计划,能够实现家庭中各类电子电器设备间的信息互通,并接入移动互联网和传统互联网,用户可以通过各种方式方便地对这些产品进行控制,实现传统家居向智能家居的转变。尽管现今物联网发展存在着诸如国家间技术标准不统一、网络协议通用性差、终端差异大、存在安全风险等问题和挑战,但是在产业化过程中,一些具体的标准已经得到业界的认同,并已经应用到实际的产品中,实现了商业化盈利。图 1-2 给出的是业界普遍接受的物联网网络三层体系结构。

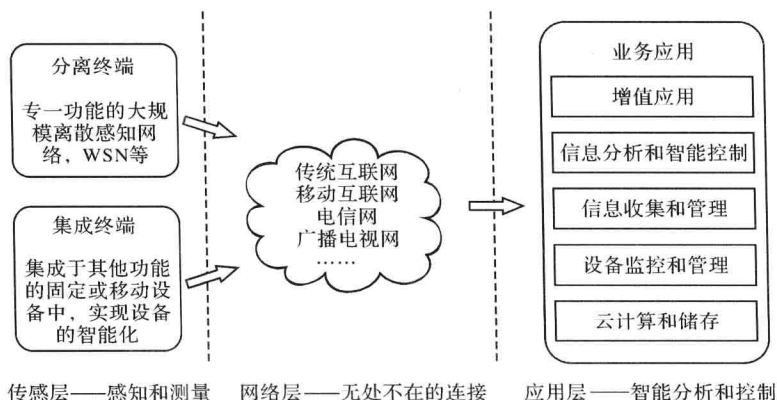


图 1-2 物联网网络体系结构图

移动物联网是基于物联网所提出的,两者概念差别不大,移动物联网更加强调其移动性,应用范围和物联网相同。移动物联网包含很多方面,与物联网一样,包含了 WSN、RFID、位置服务(location-based service, LBS)、M2M 等。随着它的推动和发展,应用领域也更加广泛,对于一些有危险性的工作地点,如煤矿矿井中,就可以建立传感器网络实施监督,也方便井下工作人员和外界的联系,更加能保证安全性;还有普通用户,通过移动物联网,使用移动智能设备,就可以随时随地获取想要的信息。

1.2 无线传感器设备

无线传感器设备由电源、感知部件、嵌入式处理器、存储器、通信部件和软件构成,它能够对所在周边环境中的热、红外、声呐、雷达和地震波等信号进行测量,持续探测包括温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分、移动物体的大小、速度和

方向等众多状况,最终对人类生活的物理世界实现全方位的监测与控制。它是下一代互联网远景规划中较为重要的组成部分,是物联网的重要基础支撑。

无线传感器设备种类繁多,如 RFID 传感设备、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等。其应用领域也是十分广泛,包括环境监测、资源探测、环境污染、公共安全与国防、健康医疗等。例如,为了降低足球比赛中的越位和进球中的误判,可借助无线传感器设备为足球裁判者提供辅助决策支持;在博物馆,在宝贵的艺术品或类似物品的反面或者底部安置无线传感器节点来进行安全报警,或通过无线传感器设备侦测灯光亮度是否变化,监测物品是否经受腐蚀等;为了观测孤岛上各种鸟的生活情况,通过红外、气压计、光、湿度传感器等无线传感器设备进行监测。

随着科学技术的不断发展,无线传感器的性能有了很大提高,从 21 世纪开始引起了世界各个国家的极大注意。美国很多学校都成立了研究无线传感器相关技术的小组,如康奈尔大学、麻省理工学院等,它们都开展了无线传感器技术方面的研究工作。英国、日本、德国和意大利等国的研究机构也先后进行了无线传感器的研究,欧盟的第 6 个框架计划将“信息社会技术”作为优先发展的领域之一,其中有很多涉及对无线传感器的研究。

图 1-3 为无线传感器设备的典型应用,它利用 WSN 检测冰河的变化情况,目的在于通过冰河环境的变化来推断地球气候的变化。



图 1-3 冰河检测示例

WSN 都是由大量的传感器节点构成的,每个节点都由感知、数据处理和通信三部分组成,如图 1-4 所示。传感器节点作为微型电子器件密集地部署在偏远甚至可能是敌对的区域,作为那里的监视器件,同时受能量约束和限制,通过自组织形式形成网络。在 WSN 中,传感器节点通过无线电、红外线或者光学介质进行相互通信。汇聚节点也是 WSN 的重要组成部分,它通过“询问”表示出感兴趣的数据流的特征,随后传感器节点检测事件和相关数据,将适当的信息传回给汇聚节点。汇聚节点通过网络或者卫星和用户进行通信。低成本的传感器节点可以用于各种应用领域,如医疗、军事、家庭等,实现了计算机、人和物理世界的连通。我们可以随时随地地获取有用而可靠的消息。

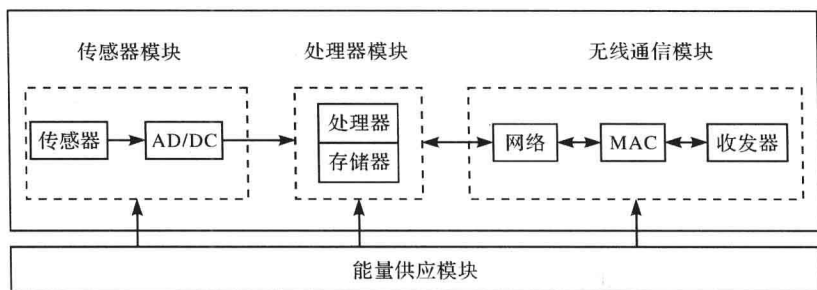


图 1-4 传感器节点的组成

传感器节点通常部署在比较偏远或者地势恶劣的地点,作为那里的监视器件,同时受能量约束和限制,而正是由于微小的传感节点自身能量的限制,因此传感器网络的生命时长成为其广泛应用的一个障碍。

1.3 WSN

WSN 是大量微传感器通过单跳和多跳的通信方式,自组织形成的无线网络系统,每个传感器均具有自我控制、传感、处理计算、无线通信的能力及有限的能量,通过相互关联、合作,将目标区域内感知的信息数据发送给观察者进行处理。典型的 WSN 的应用结构如图 1-5 所示,典型的工作场景如图 1-6 所示。WSN 作为物联网的重要支撑技术之一,充当了融合物理世界与信息世界的有效媒介。

Technology Review 杂志于 2003 年评选了未来将深刻改变人类生活的十大新技术,WSN 位列榜首,我国也已将其列入“十二五”期间优先发展的科学课题,并成立了专门的 WSN 标准项目组。进入 21 世纪后,微电子和通信技术的飞速发展引领了传感器技术的全面进步,与以往相比,传感器节点的体积变得更小,同时

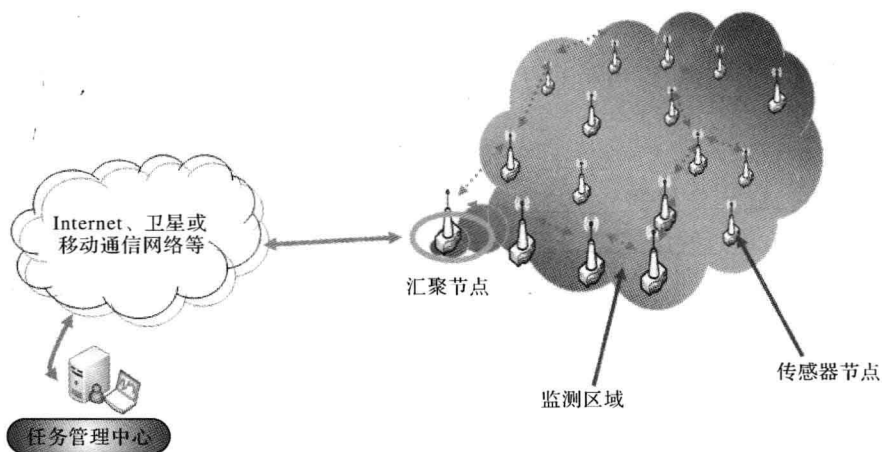


图 1-5 典型的 WSN 的应用结构

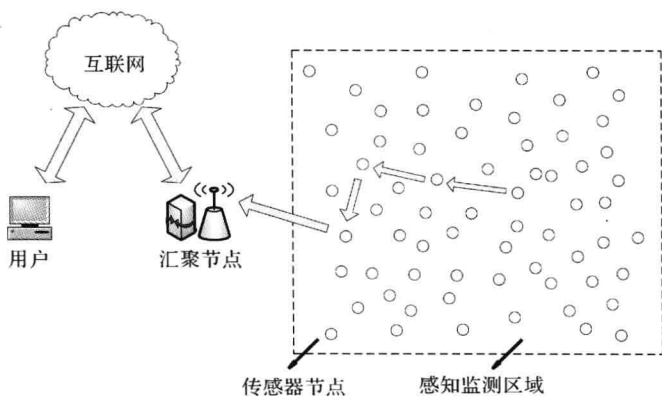


图 1-6 典型的 WSN 工作场景示意图

功能也趋于智能化。传感器节点可以感知周围环境中温度、湿度、声音、压力、震动、光线、图像乃至运动速度和方向等信息,并将这些模拟信号转换为数字信号,使信息在数字链路中传输成为可能。WSN 的布设简单,是不依赖于大型基础设施的 Ad Hoc 网络,有很强的环境适应能力,通过针对性的选材和设计,可以工作在如下多种不同的场景下:

(1) 军事应用。如同互联网的产生是出于军事的需求,WSN 第一次公开出现是在越战的战场上。越南复杂的丛林地形遮蔽和多雨云对卫星监测产生了干扰,美军不得不开发并在道路等关键的军事区域投放了数以万计具有音频和震颤感知功能的无线微传感器,这些传感器组成的网络成功监视和预警了敌方的动

向。1978年,美国国防部先进计划研究局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)在卡内基梅隆大学设立了分布式传感网络研究组,这可以看做是 WSN 系统研究的正式开端。如今,美军的沙线系统(a line in the sand)已经可由飞机从空中布撒大量微小且低成本的无线传感器在战场上,其组成一张监测网络来实现对大规模区域内敌我目标的感知、识别和跟踪。

(2) 环境监测。WSN 的一个重要应用就是对环境现象和行为的检测,传感器被布置在特定区域来搜集人们需要的信息。例如,厄瓜多尔在火山口布置了 WSN 来记录火山连续的次声信息,用来分析火山的活动规律,找出存在喷发危险的火山;美国在爱达荷州的森林和山脉中布置了大规模的无线传感器,其不仅可以监控天气,更可以对火灾进行预警;著名的大鸭岛实验中,动物学家虽然无法常驻气候恶劣且生态复杂的岛屿,但是借助于布设的 WSN 收集到的珍贵数据,完成了对海燕巢穴和习性的调查。1998年,加州大学伯克利分校得到 DARPA 的支持,开始进行智能微尘计划的研究,该计划试图将微传感器制作成灰尘大小,充满整个空间,实现无孔不入的监测和控制。

(3) 医疗应用。在健康监护中,个人传感器被用来实时监控病人的血压、脉搏、呼吸等生理特征和身体姿势,所有传感器都通过接入网络来实现这些信息的远程共享,医生和家属可以通过联网的移动智能设备或者个人电脑第一时间掌握病人的病理信息。随着老龄人口的逐年增多,医生可以通过这张网络对家中的病人提供诸如远程病情查看、紧急通信等医疗服务,为此哈佛大学已经开发出了一种先进的老年人医疗辅助系统。

(4) 工业应用。在工业控制管理方面,WSN 常被用来监控设备运行情况和采集故障数据,从而使设备稳定运行。相对人工监控,这不仅大大节约了成本,而且对于人无法进入的区域如设备内部,传感器可以实时监测机器的震动和润滑情况,从而可以得到更好的工业产品质量并保证生产的安全。大量的传感器节点不仅可以提早将警告信息发送给管理员以减少可能带来的损失,同时这些传感器得到的信息存入相关的数据库后,可以用来进行风险分析和资产管理,提高工业生产效率。

(5) 农业应用。图 1-7 是荷兰的 LOFAR(low frequency array)计划用于农田监测而布置的 WSN 节点。这个计划的目的是通过 WSN 获得特定农田的气候细节信息,经过科学分析后减少农药的使用量。同时;农民们可以通过了解 WSN 提供的天气、土壤和病虫害等信息来提高农产品的产量和品质。

(6) 智能环境。WSN 不仅可以布置在室外作为一个单独的系统存在,还可以嵌入到一个已有的系统中,通过多个系统的联动合作,实现环境的智能化。一辆高级的轿车中可能有数千个传感器遍布其中,如加速踏板传感器、刹车踏板传感器、阀门位置传感器、油量传感器等。这些传感器持续地监控汽车各种参数特