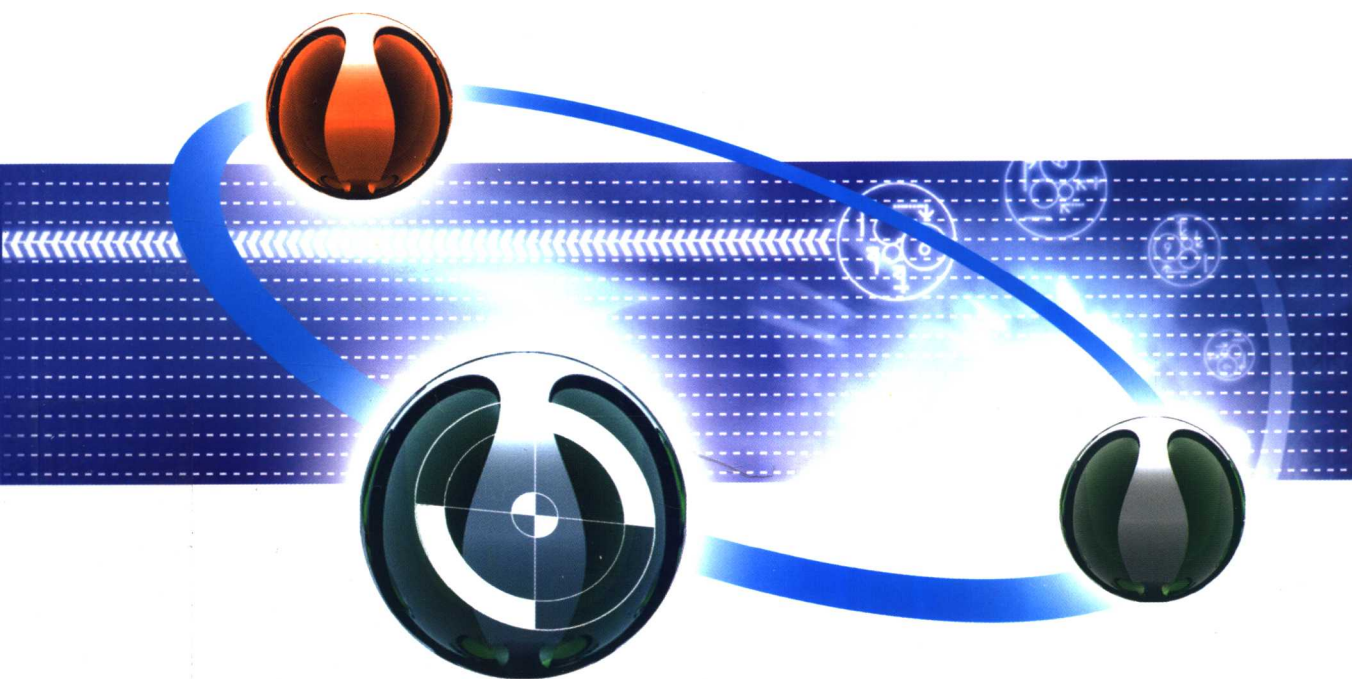


无线传感器网络 实验教程

Practice Guide to Wireless
Sensor Networks

徐勇军 安竹林 蒋文丰 姜 鹏 编著



TP212/152

2007

无线传感器网络实验教程

徐勇军 安竹林 编著
蒋文丰 姜 鹏

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书介绍无线传感器网络研究和应用的实战攻略。全书以中科院计算所宁波分所推出的 GAINS 和 GAINZ 套件为基础,综合了与嵌入式芯片、基础通信、自组织网络及 ZigBee 等相关的 30 多个实验,由浅入深地介绍了其环境建立、软件开发、程序调试等基本方法,为读者进行深层次的理论研究及应用开发打下坚实的实践基础。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

无线传感器网络实验教程/徐勇军等编著. —北京:北京理工大学出版社,2007.8
ISBN 978-7-5640-1227-4

I. 无… II. 徐… III. 无线电通信-传感器-实验-高等学校-教材 IV. TP212-33
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 114371 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 16.5

字 数 / 394 千字

版 次 / 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

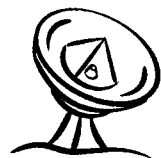
印 数 / 1~3000 册

定 价 / 28.00 元

责任校对 / 张 宏

责任印制 / 周瑞红

图书出现印装质量问题,本社负责调换



前言

无线传感器网络实验教程

无线传感器网络 (WSN, Wireless Sensor Networks) 是由大量分布式传感节点组成的面向任务型自组织网络。作为一种新兴的技术,无线传感器网络可涉及现代微机电系统 (MEMS, Micro-Electro-Mechanism System)、微电子、片上系统 (SOC, System-On-Chip)、纳米材料、传感器、无线通信、计算机网络、分布式信息处理等技术。在国防军事、工农业控制、城市管理、卫生医疗、环境监测、抢险救灾、反恐防恐、危险区域远程控制等领域有着潜在的应用前景。美国《商业周刊》将 WSN 列为 21 世纪最有影响力的 21 项技术之一,《MIT 技术评论》将无线传感器网络列于十种改变未来世界新兴技术之首。

近几年来,国家发改委、科技部、信息产业部等均启动了在无线传感器网络及自组织网络领域的研发项目。《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006—2020 年)》将“传感器网络及智能信息处理”作为未来信息产业及现代服务业的重点方向。目前,国内很多高校及科研机构都已在无线传感器网络领域投入力量,从事相关的学术科研、应用示范及产业化工作。由于受到了学术界及产业界的普遍关注,无线传感器网络技术正在以前所未有的速度发展。

中国科学院计算技术研究所于 2001 年承担国家 863 项目“软硬件协同的低功耗系统设计 (编号 2001AA111070)”,并开始以低功耗设计作为切入点,对无线传感器网络进行了初步研究;2004 年初建成了无线传感器网络方向的 15 人左右的研发队伍,并系统地进行了相关软硬件的开发,后命名为 GAINS 系列节点;2004 年底部分成员移师中科院计算所宁波分所并开始进行应用示范及产业化推广工作;2005 年初,设计并成功生产了一款“面向无线传感器网络的专用低功耗处理器芯片”,该芯片于当年年底完成验证工作。在北京和宁波两地,基本上建立包括芯片设计、节点设计、协议设计及应用示范等在内的 30 多人的科研团队 (<http://www.wsn.org.cn/>)。

本团队先后参与承担了国家发改委 2005 年及 2006 年下一代互联网计划中与无线传感器网络相关的重大专项和 2006 年相关 863 课题,并和国内众多科研团队保持着良好的合作关系。在近几年的研究和实践的基础上,对无线传感器网络技术的理论和实践的最新发展和研究成果进行了一定的总结,联合国内各交叉领域的专家,共同编撰了《无线传感器网络技术》及《无线传感器网络实验教程》这两本书。两书理论联系实际,前者主要基于团队内部当前相关研究方向编制而成,其内容涵盖传感器网络研究的物理层、MAC、路由协议,协议标准、时间同步,节点定位,容错技术、安全设计,服务质量保证,网络管理,操作系统以及开发环境等方面,主要介绍无线传感器网络技术相关理论、原理及方法等,给广大读者



进行系统学习及深入研究提供参考；后者则整理了在技术开发过程中所遇到的一些具体问题并以实验教程形式进行组织，主要包括了处理器、基础通信、自组织通信及 ZigBee 技术相关的 30 多个实验，由浅入深地介绍了无线传感器网络应用开发过程中可能碰到的一些问题或难题，相信是新手入门的一个比较合适的材料。

本书主要介绍无线传感器网络的实验部分。无线传感器网络是一门实践性很强的技术，要想对其进行深入的研究，必须熟练掌握其环境建立、软件开发、程序调试等基础知识，要想熟练地掌握这些技术，仅阅读相关的书籍还不够，实验操作是无线传感器网络研究的一个重要环节。本教程是在中科院计算所宁波分所（宁波中科集成电路设计中心有限公司）推出的 GAINS 及 GAINZ 系列实验平台上完成的，对无线传感器网络节点的处理器的基本操作、射频芯片的数据收发、传感器数据的获取、通信网络的建立和组织等方面都设计了较为详尽的实验演示，使读者能够循序渐进地掌握无线传感器网络的开发技术，为以后更深层次的理论研究和应用实践打下坚实的基础。

本实验教程的编写是在中科院计算所徐勇军博士的组织下展开的。本书的主要内容是由团队骨干成员蒋文丰和赵兵分别在 GAINS 和 GAINZ 硬件平台上开发和编写的，他们对本教程的编写起了奠基作用。卢业伟为本书全部实验的校验和验证做了大量的工作，刘峰校验了 ZIGBEE 实验部分，并进行了扩充和修改；产品经理姜鹏收集了大量客户反馈信息并提出了建设性修改意见；全书由博士生安竹林经过多次统稿和校订；李光辉博士为本书的出版提供了宝贵意见。本书所涉及代码可以在网站（<http://www.wsn.org.cn/ebook.htm>）上免费下载，该网站还可以提供实验内容相关的答疑与互动。

需要指出的是，无线传感器网络的研究尚处于起步阶段，许多技术还不成熟，其硬件平台也千差万别，因此要编写一个全面完善的实验教程非常困难。由于水平有限，书中不可避免地存在疏漏甚至错误，希望广大读者不吝赐教，将建议、意见或疑问及时反馈（wsnbooks@nbicc.com），我们将进行持续的修改和完善。

编 者



目 录

无线传感器网络实验教程

第 1 章 基础知识介绍	1
1.1 无线传感器网络简介	1
1.2 无线移动自组网简介	7
1.3 IEEE 802. 15. 4 和 ZigBee 简介	8
第 2 章 实验环境介绍	11
2.1 GAINS 实验平台	11
2.2 GAINZ 实验平台	14
2.3 ATmega128L 芯片	15
2.4 CC1000 芯片	19
2.5 CC2420 芯片	24
2.6 可视化后台软件	30
2.7 开发编译环境	34
第 3 章 处理器基础实验	36
3.1 集成开发环境	36
3.2 程序下载实验	48
3.3 定时器实验 1	56
3.4 定时器实验 2	58
3.5 走马灯实验	61
3.6 看门狗实验	64
3.7 串口通信实验 1	67
3.8 串口通信实验 2	69
3.9 AD 采样实验 1	71
3.10 AD 采样实验 2	75
3.11 微操作系统实验	78
3.12 Boot Loader 实验	87
第 4 章 基础通信实验	96
4.1 CC1000 寄存器配置实验	96



4.2	无线信道监听实验	101
4.3	点到点无线通信实验	110
4.4	无线灯光控制实验	118
4.5	无线报警实验	125
4.6	射频休眠实验	129
第 5 章	自组织网络实验	133
5.1	GAINS433MAC 库介绍	133
5.2	基于 GAINS433MAC 库的星型网络的通信实验	143
5.3	指定路由多跳网络的实验	152
5.4	基于简单的泛洪协议的多跳路由网络的实验	159
5.5	基于 GAINS433MAC 库的高级协议开发	164
5.6	时间同步协议实验	165
第 6 章	基础 ZigBee 实验	179
6.1	CC2420 启动和 SPI 初始化	179
6.2	CC2420 内部寄存器初始化	185
6.3	组包发送实验	189
6.4	接收和地址译码实验	192
6.5	应答 ACK 帧实验	198
6.6	网络 Sniffer 节点实验	204
6.7	光传感数据采集的点到点综合通信	208
6.8	温度传感数据采集的点到点综合通信	214
6.9	高精度温度传感数据采集的点到点综合通信	219
第 7 章	高级 ZigBee 实验	229
7.1	空闲信道评估实验	230
7.2	CSMA-CA 算法实验	235
7.3	光传感数据采集的多跳综合通信实验	240

第 1 章 基础知识介绍



本章分为三节，分别介绍无线传感器网络的概念、无线移动自组网以及 IEEE 802.15.4 标准，希望通过本章的阅读读者能够对无线传感器网络发展、体系结构以及应用等几方面有个初步的了解。本章部分内容参考本书的姊妹篇《无线传感器网络技术》，如果希望详细了解无线传感器技术，请阅读《无线传感器网络技术》一书。

1.1 无线传感器网络简介

无线传感器网络 (WSN, Wireless Sensor Networks) 是由多个节点组成的面向任务的无线自组织网络 (见图 1-1)。它综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等多种技术领域，通过各类微型传感器对目标信息进行实时监测，由嵌入式计算元件对信息进行处理，并通过无线通信网络将信息传送至远程用户。

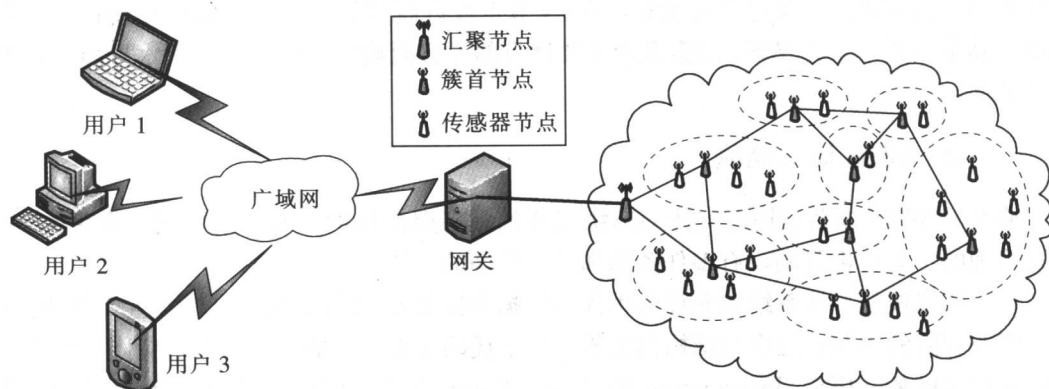


图 1-1 无线传感器网络示意图

1.1.1 WSN 的研究历史和发展

WSN 的研究早在 20 世纪 70 年代就已经开始了，美国国防部高级研究计划局 (DARPA, Defense Advanced Research Projects Agency) 是 WSN 研究早期的主要推动者，其研究的重点是传感器节点，而传感器节点之间只进行简单的点对点通信。1998 年 Grego-



ry. J. Pottie 从网络研究的角度重新阐释了 WSN 的科学意义。1999 年 9 月《商业周刊》(Business Week) 将其列为 21 世纪最重要的 21 项技术之一。随后, WSN 受到了越来越多网络研究者的关注。进入 21 世纪后, 随着无线通信技术、微芯片制造等技术的进步, WSN 的研究在多种应用方面取得了重大进展。各种技术评论杂志也一致看好 WSN 蕴藏的巨大应用潜力和商业价值。《商业周刊》预测 WSN 和其他三项信息技术将会在不远的将来掀起新的产业浪潮; 非盈利性的《MIT 技术评论》将 WSN 列于十种改变未来世界新兴技术之首; 美国《今日防务》杂志更认为 WSN 的应用和发展, 将引起一场划时代的军事技术革命和未来战争的变革; 2004 年《IEEE Spectrum》杂志发表一期专集《传感器的国度》论述 WSN 的发展和可能的广泛应用。可以预计, WSN 的发展和广泛应用, 将给人们的社会生活和产业变革带来极大的影响, 产生巨大的推动。日本、韩国、英国、意大利、巴西等国家都对传感器网络表现出了极大的兴趣, 纷纷展开该领域的研究工作。在一份有关我国未来 20 年预见技术的调查报告中, 信息领域 157 项技术课题中有 7 项与传感器网络直接相关。2006 年初发布的《国家中长期科学与技术发展规划纲要》为信息技术确定了三个前沿方向, 其中两个与 WSN 的研究直接相关, 即智能感知技术和自组织网络技术, 足见国家对无线传感器网络技术的重视。

正如 William J. Kaiser 教授所说: WSN 是一门交叉学科, 涉及计算机、微电子、传感器、网络、通信、信号处理等诸多领域。从计算机学科的角度分析, WSN 在一定程度上代表了未来计算机发展的方向。Bell 定律指出: 每 10 年会有一类新的计算设备诞生。经历从巨型机、小型机、工作站、PC 到 PDA 的演变, 新一代计算设备将在不远的将来诞生。虽然现在依旧很难准确地预见, 但通过历史分析不难看出, 计算设备整体上朝着体积越来越小的方向发展, 而且人均占用量不断增高。WSN 的出现与发展恰好顺应了这个趋势。大量的微型无线传感器网络节点被嵌入到我们生活的物理世界中, 为实现人与自然界丰富多样的信息交互提供了技术条件。从这个角度看, WSN 节点或许就应该是新一代的计算设备, 或者至少属于其中一类, 研究 WSN 的意义和重要性自然不言而喻, 因此受到了学术界和工业界的广泛关注。

1.1.2 WSN 体系结构

典型的 WSN 体系结构有支持动态协议栈的, 有层次性的, 有自适应的, 有可编程的, 有自管理的, 有自恢复的, 有多任务的和基于代理的等等。

动态协议栈是指体系结构允许应用程序根据实际需要动态加载协议栈, 主要解决 WSN 节点资源有限的问题; 层次性结构则主要是出于代码可重用性的考虑; 自适应体系结构提出了信息交换服务 (IES, Information Exchange Service) 的概念, 它类似一种总线, 将通常垂直分布的协议组件有效地联结在一起, 容易通过跨层 (Cross Layer) 设计的思想优化资源利用, 延展网络的生命周期; 可编程的传感器网络强调“网内数据处理”的重要性, 通过提供区域性的操作原语来执行数据发现和查询、数据共享与融合等操作, 这样可以简化部分协议、机制和算法的实现, 同时能提高它们的性能; 自管理的和自恢复的体系结构将传统网络中原本加以区分的管理和服务功能融合为一体; 支持多任务是 WSN 应该具备的特性之一, 但已有的针对特定任务设计的应用系统大都忽略了这一点, 多任务的体系结构, 在网络层和应用层引入状态层 (State Layer) 来根据应用需求对网络节点进行功能性划分; 基于代理的



WSN 网络体系结构从方便应用程序设计的角度来支持多功能和多任务, 智能代理的引入更为 WSN 提供了可扩展性: 可以依据应用需求增删不同功能的代理, 也可依据网络节点数目的变化自动扩展和收缩代理覆盖的范围, 从而达到网络可扩展的目的。

值得注意的是上述的 WSN 体系结构并不成熟, 各自有优缺点, WSN 体系结构设计中需要考虑的要素归纳如下:

- 节点资源的有效利用
- 支持网内数据处理
- 支持协议跨层设计
- 增强安全性
- 支持多协议
- 支持有效的资源发现机制
- 支持可靠的低延时通信
- 支持容忍延时的非面向连接通信
- 开放性

1.1.3 WSN 研究方向

无线传感器网络的主要特点是资源受限, 每个传感器节点的能量、处理能力、存储能力都是非常有限的, 而且由于对传感器节点的成本要求, 导致节点的可靠性也不是很高, 这些都给无线传感器网络的设计带来了很大的挑战。

无线传感器网络的初期, 很多人认为它和 Ad Hoc 网络没有太大的区别, 可以使用 Ad Hoc 网络的一些研究成果解决 WSN 的一些问题, 但事实却证明无线传感器网络和现在的 Ad Hoc 网络有很多不同:

(1) 传感器节点的处理能力、通信能力、存储能力和所携带的能源都要比 Ad Hoc 网络节点的低很多。

(2) 无线传感器网络的节点的移动性没有 Ad Hoc 网络节点那么强。

(3) 无线传感器网络拓扑的改变主要是由于节点的失效或者是能量消耗殆尽, 而 Ad Hoc 网络拓扑结构的改变主要是由于节点的移动。

(4) 无线传感器网络的协议要比 Ad Hoc 网络的简单, 在无线传感器网络中没有 IP 地址的概念。无线传感器网络相关的一些协议只能使用有限的存储空间, 对节点的处理能力也不能要求过高。

(5) 无线传感器网络的功能主要是收集数据, 收集到的数据可以传给一个最终节点 (单 Sink 模式), 也可以传给多个最终节点 (多 Sink 模式), 而 Ad Hoc 网络更多的是考虑点到点的通信。

无线传感器网络由于自身独到的特点以及相关的需求, 其网络协议的设计是一件很有挑战性的工作, 而且是一个跨学科的研究领域, 相关的一些技术难题还有待于我们的进一步研究和认识。

无线传感器网络研究方向见图 1-2。

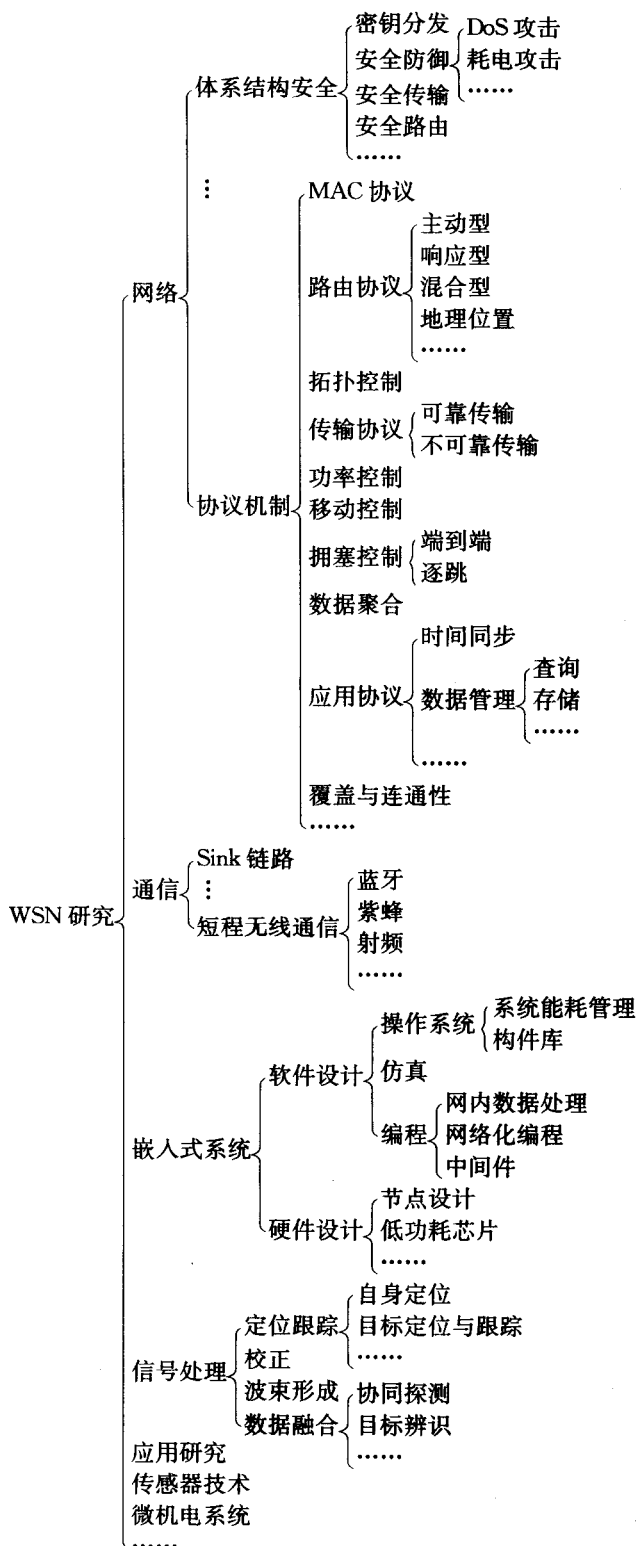


图 1-2 无线传感器网络研究方向



1.1.4 WSN 应用

WSN 还是一项新型技术,至今还没有取得广泛的商业应用,但在科学研究和试验方面已经有了很多成功的应用范例,它们从不同侧面揭示了 WSN 的应用潜能,同时也预示了良好的商业应用前景。这些应用范例主要集中在以下几个方面:

- 安全监控
- 智能家居和智能小区
- 建筑结构健康监测
- 生态环境监测
- 精准农业
- 医疗监护
- 地震监测

1.1.5 WSN 节点试验平台

WSN 的研究具有很强的试验科学的特点。传统的互联网研究已经具有很长的历史,利用已有的基础化设施,为新的研究搭建大规模的物理试验床(如组播应用研究的 Mbone)和虚拟网络试验环境(如 P2P 研究的 PlantLab)相对比较容易。但 WSN 是一种全新的网络技术,与传统的互联网差别较大,甚至网络体系结构都将截然不同,因此 WSN 研究可继承的资源也就十分有限,研制网络节点,搭建一定规模的试验床自然成了 WSN 研究初期的一个主要任务。到目前为止,已经出现了众多节点试验平台。根据时间先后和技术特点,我们将它大致分为四代。

第一代(1996—1999年):代表性的平台有 UCLA 的 WINS, UC Berkeley 的 SmartDust、WeC 和 Rene。WINS 是较早的试验平台,是 DARPA 1995 年资助项目“Low Power Wireless Integrated Microsensors”的研究成果,主要是展示 CIMS (CMOS Integrated Micro Systems) 技术在设计微型化低功耗无线传感器构成组件时的优势,并没有特别强调无线通信及网络技术,因此最终并没有形成颇具影响力的平台。但它在 WSN 研究中的种子性作用不可抹杀。SmartDust 以很强的震撼力向人们展示了 WSN 的设计理念,使人们对 WSN 的未来充满了丰富的想象。SmartDust 的字面含义即智能尘埃,它意味着未来我们生活的物理空间中会悬浮着无数这样的 WSN 节点,帮助我们完成与物理世界的信息交互。虽然目前依旧没有真正进入工程应用,但作为概念性节点平台却声名远扬。SmartDust 是 MEMS 技术在微型化 WSN 节点方面的一次有效尝试,节点最终的物理尺寸只有近 8 mm,节点间利用光进行通信,具有一定的处理能力。虽然还小不到像尘埃一样能悬浮空中,但至少证明了 MEMS 技术在微型化设备方面的潜力,这是 WSN 研究非常重要的一个领域。从信息科学的角度看,WSN 将孕育出一种新的分布式计算模式,自然将面临新的技术挑战。为方便开展信息领域的研究,D. Culler 领导的研究小组设计了称为 WeC 和 Rene 的节点试验平台,它们是 UCB Mote 系列的雏形。其主要的差别在于后者有较灵活的扩展性,用户可以通过较丰富的数/模通道和总线支持不同种类的传感器;而前者是一个相对独立的系统,仅集成了温度、光强度等有限的传感器电路,扩展能力有限,且不支持通用标准接口。

第二代(2000—2001年):这一时期 WSN 的研究开始受到越来越多研究者的关注。于



是,相继出现了多种试验平台,典型的有 UCB 的 Mica 与 Dot, MIT 的 μ AMPS-I 和 μ AMPS-II,以及 Rockwell 公司的 HYDRA。它们为 WSN 研究提供了通用的试验平台,被用在不同机构资助的研究项目进行原理性验证和算法测试评估。Mica 和 Dot 分别是 WeC 和 Rene 的升级,与后者比, Mica 和 Dot 提供了更丰富的传感器接口和内存资源,以及灵活的射频无线接口,用户可以通过设计调度策略休眠或唤醒射频电路来节省功耗, Mica 被成功地用在 Sensor Webs 项目中,原理性地演示了无人机播撒 WSN 节点进行目标跟踪的新军事侦察模式的可行性。如果说 UCB 的 Mote 系列是利用成熟的商用器件 (COST, Commercial Off The Shelf) 构建试验节点,那么 MIT 的 μ AMPS-I 也是 COST 设计,特点是采用了支持分级电压的处理器和自适应调节发送功率的技术来节省能耗。 μ AMPS-II 则提高了集成度,在 FPGA 验证设计的基础上,定制了两片 ASIC 来处理射频通信。 μ AMPS 曾被用在 DARPA 支持的 PASTA (Power Aware Sensing and Tracking and Analysis) 项目中。Rockwell 公司的 HYDRA 是一个商用节点平台,体积稍大。著名 Sensor IT 项目用它概念性地实现并演示了美国五角大楼所期望的“超视距”战场监测应用。

第三代 (2002—2003 年):随着研究的深入,人们认识到对于特殊环境中自组织 WSN 的应用,降低能耗,尽可能延长网络生命周期是一个非常关键的问题。于是,研究者开始从各个角度出发寻找减小系统能耗的方案,节点设计自然也不例外。其间产生了两款代表性的试验平台: Mica2 和 MicaDot2,以及 NASA JPL 实验室的 Sensor Web。Sensor Web 最初被定位于进行火星的长时间观测,在可再生能源技术不成熟的条件下,面对这样的应用,设计者们只能竭力寻找低功耗的节点设计方案。目前, Sensor Web 已被应用在多个项目中进行实际测试。Mica2 和 MicaDot2 属于 UCB 的 Mote 系列,它修正 Mica 的一些技术缺陷,如 Mica 的通信距离太短,而且容易受噪声干扰,不可靠; I/O 接口也不稳定。当然,低功耗也是 Mica2 优化的目标之一。为此, Mica2 选配了新的微处理器和射频芯片,原来的 ATmega 163 被 ATmega 128 替代,而射频芯片 TR1000 被同出于 Chipcon 公司的 CC1000 取代。虽然 Mica2 依旧存在不少缺陷,如唤醒时间过长等,但它基本上已成为目前 WSN 研究的主流试验平台。该领域权威性的学术会议 SenSys 2004 年收录了 21 篇论文,其中有 16 篇是在 Mica2 上完成试验和评估的。此外,国内外有多个研究机构根据各自应用的需要陆续研制了基本功能相似,但各具特点的试验节点,如 Wisenet、PicoNode、HelioMote、iBadge、Eyes 和 U3。国内中科院、清华大学和哈尔滨工业大学等院校的研究小组也先后开发出了类似的节点。

第四代 (2004 年初—2004 年底): Chipcon 率先发布了支持 ZigBee 的射频芯片,这成为 WSN 节点研发的又一个分水岭。随后的研究开始重点关注新无线通信技术与标准在 WSN 节点设计中的应用。到目前为止,已经相继出现了一系列第四代节点,典型的有 MicaZ、Telos、EmberNode、Imote、Imote2、BTNode3 和 DSYS25。MicaZ 是 Crossbow 公司用支持 ZigBee 的 CC2420 直接替代 Mica2 的 CC1000 而成。Telos 是 UCB Mote 系列的第四代节点,设计上的改进很大,除了支持 ZigBee, Telos 还采用了 USB 接口,省去了对开发板的依赖,方便开发和使用。通过选用新的微处理器 (TI 公司 MSP430) 减小了休眠工作电流和系统唤醒时间,能耗显著降低, Telos 的功耗大约是 Mica2 的十分之一。研究数据表明:节点组网进行时间同步试验,用 2 节 5 号电池供电,每 3 分钟进行一次同步, Mica2、MicaZ 和 Telos 的工作时间将分别是 543 天、328 天和 945 天。EmberNode 是在 Ember 公司



推出的支持 ZigBee 的商用硬件和软件平台上开发的 WSN 节点。Imote 和 Imote2 是 Intel 公司研制的 WSN 试验节点。在 Imote 中仅支持蓝牙,到了 Imote2, 蓝牙、ZigBee 和 WiFi 同时支持。Imote 完全采用 Intel 的微处理器,如 ARM 和 XScale,并配备了一定的协处理器来管理系统能耗。BTNode3 是瑞士联邦研究院 (ETH Zurich) 开发的第 3 个版本的 WSN 节点,采用了蓝牙技术。DSYS25 是爱尔兰国家微电子研究中心为分布式自治传感器项目开发试验节点,再一次尝试了纯粹的射频通信技术在 WSN 中应用的可行性,它选用了 Nordic 公司 nRF2401,支持多信道,传输速率可达 1 Mb/s,高于 CC1000 的 76.8 kb/s。虽然结合 Active Message 机制设计了占空比控制机制来节省能耗,但整个系统的功耗依旧很大。这在一定程度上表明:纯粹的射频通信技术在 WSN 节点设计中没有取得进一步的结果。目前流行的无线传感器网络硬件平台各项设计参数的总结比较见表 1-1。

表 1-1 目前流行的无线传感器网络硬件平台比较

平台	Mica2	Micaz	Telos	Imote	Imote 2
CPU @/MHz	8bit Atmel @8	8bit Atmel @8	16bit TI @8	32 ARM @12	32bXS@13 (104)
SRAM/KB	4	4	10	64	256/32 000
FLASH/KB	128+512	128+512	48/1 024	512	32 000
无线通信	300~900 MHz	ZigBee	ZigBee	BT	ZigBee/BT/WiFi
带宽/ (kb/s)	15	250	250	720	250 (720/11 000)
功耗 C/R/T/mA	8 / 10 / 27	8 / 20 / 18	1 / 20 / 18	15 / 24 / 24	40/20/18
休眠功耗/ μ A	19	27	6	1~250	1~100
安全	N	AES-128	AES-128	4LFSR-128	Y

GAINS 是宁波中科集成电路设计中心有限公司设计开发的与 UCB Mica 系列相兼容的无限传感器网络实验平台。本实验教程作为范例使用的 GAINS-3 和 GAINZ 两款产品分别工作在 433 MHz 和 2.4 GHz 频段,针对嵌入式传感器网络的研究而设计。传感器节点上有 JTAG 口及 RS-232 串口,可以进行程序单步调试和在线仿真,通过串口可方便地读取信息。此外,节点上有一个 50 针的外扩接口把主芯片上的主要接口全部引出,用户可以在节点上扩展各种传感器子板。节点上提供红绿黄三个 LED 用于程序调试和节点状态指示,同时配套的传感器子板提供各种传感器。实验环境的详细介绍请参见本书的第 2 章。

1.2 无线移动自组网简介

无线移动自组网简称为自组网,又叫移动多跳分组无线网络 (MANET, Mobile Ad Hoc Network),是没有任何中心实体的自组织网络。

常见的移动网络通常是以蜂窝网络或无线局域网等形式出现的。在蜂窝网络中,移动终端之间的通信必须借助于基站和 (或) 移动交换机的转接完成;在无线局域网中,移动终端通过无线接入点连接到现有的固定网络。无线移动自组网和上面介绍的两种移动网络不同,它由一组带有无线收发装置的移动节点组成,它不依赖预设的基础设施而临时组建,网络中移动的节点利用自身的无线收发设备交换信息,当相互之间不在彼此的通信范围内时,可以借助其他中间节点中继来实现多跳通信,每个移动节点既要担当终端又要担当路由器的责任。



无线移动自组网的特点是组网灵活性强,支持移动性,易于迅速展开,系统整体抗毁能力强(采用分布式网络结构,一个节点或者少数几个节点的被毁不会导致整个系统的瘫痪),系统成本低。它的应用几乎涉及所有方面:从军事装备到普通消费者产品,例如,搜寻与营救、数字化与自动化战场、战术应用、灾难重建、群体控制、移动办公、虚拟教室、传感器网络等。

无线移动自组网虽然有上面的很多优点,但是由于其结构的特点,很多技术性问题没有得到很有效地解决。无线移动自组网中的所有网络实体之间的所有通信都是在无线媒介上进行的,由于无线通信对传播损伤显得很脆弱,所以网络节点之间的连接没有保障,同时由于节点的游牧特性,会频繁地动态产生和拆毁其与其他节点的关系。这些都将导致网络拓扑的快速变化,网络拓扑的不断变化和传播条件的多样变化,可能造成所收集和建立起来的网络信息(如路由表)的有效期变短,频繁的网络重构可能引起频繁地交换控制信息,以便反映网络的当前状态。拓扑的高速动态变化会带来大量网络维护开销,消耗大量的节点能量和网络带宽资源,如何有效地提高能量和带宽利用率,提高自组网的通信质量依然是现在网络中的研究热点。

1.3 IEEE 802.15.4 和 ZigBee 简介

在 IEEE 802.15 工作组内有四个任务组(TG, Task Group),分别制定适合不同应用的标准。这些标准在传输速率、功耗和支持服务等方面存在差异,其中 TG4 负责针对低速无线个人区域网络(LR-WPAN, low-rate wireless personal area network)制定标准——IEEE 802.15.4 标准。该标准把低能量消耗、低速率传输、低成本作为重点,旨在为个人或者家庭范围内不同设备之间的低速互连提供统一标准。其规定的特征与无线传感器网络有很多相似之处,因此,许多研究机构将 IEEE 802.15.4 当作事实上的 WSN 国际标准。

LR-WPAN 网络是一种结构简单、成本低廉的无线通信网络,它使得在低电能和低吞吐量的应用环境中使用无线连接成为可能。与 WLAN 相比,LR-WPAN 网络只需很少的基础设施,甚至不需要基础设施。IEEE 802.15.4 标准为 LR-WPAN 网络制定了物理层和 MAC 子层协议。

在 IEEE 802.15.4 中定义了两种器件:全功能设备(FFD, Full-Function Device)和缩减功能设备(RFD, Reduced-function Device)。对于 FFD,要求它支持所有的 49 个基本参数,而对缩减功能设备,在最小配置时只要求它支持 38 个基本参数。一个全功能设备可以与缩减功能设备和其他全功能设备通信,而缩减功能设备只能与全功能设备通信,仅用于非常简单的应用。但无论如何,一个 IEEE 802.15.4 网络中必定存在一个网络协调器(PAN Coordinator),是网络的主控制器,它负责建立网络、网络成员管理、分组转发等任务。

根据应用的需要 LR-WPAN 可以工作于两种拓扑结构,见图 1-3。

在星型网络中,设备均与网络协调器完成简单的关联操作以及接收和发送等,网络协调器还可以与其他网络进行通信以完成诸如路由之类的功能。网络中的设备可以采用 64 位地址直接进行通信,也可以通过关联操作由网络协调器分配 16 位地址。网络协调器可以采用稳压直流供电或电池供电,但是网络中的其他设备一般采用电池供电。星型网络一般适合应用于家居自动化、个人计算机的外围设备、玩具以及个人健康管理等。

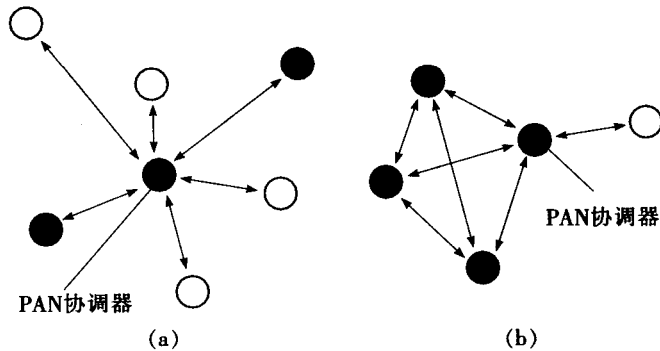


图 1-3 LR-WPAN 支持的拓扑结构

(a) 星型拓扑；(b) 点到点拓扑

●—全功能设备；○—缩减功能设备

点到点网络中也存在一个网络协调器，但与星型网络不同的是，网络中的所有设备可以和在信号辐射范围之内内的所有其他设备通信，这就使得点到点网络拓扑可以形成更为复杂的网络形式，如 Mesh 网络等。因此，它更适合应用于工业控制及监测、货物存储及跟踪、智能农业及安全相关方面。点到点网络也支持 Ad Hoc 模式，具有自组网和自我修复网络的功能，它还可以使网络中的所有设备以多跳的方式实现数据的路由，不过实现这些功能是网络层的职责所在而不在 IEEE 802.15.4 的讨论范围之内，本书将在随后的 ZigBee 部分对其进行探讨。

IEEE 802.15.4 标准定义了物理层和 MAC 子层，符合开放系统互联模型（OSI）。物理层包括射频收发器和底层控制模块，MAC 子层为高层提供了访问物理信道的服务接口。层与层之间的关系见图 1-4。

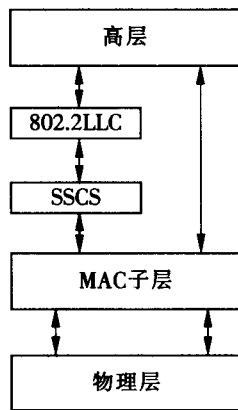


图 1-4 IEEE 802.15.4 协议栈架构

在 MAC 子层之上的高层包括网络层和应用层，对于不同的高层协议，也可以通过逻辑链路控制子层（LLC, Logical Link Control）以及特定服务聚合子层（SSCS, Service Specific Convergence Sublayer）来访问 MAC 子层。

ZigBee 技术建立在 IEEE 802.15.4 标准之上，ZigBee 联盟对网络层协议和 API 进行了



标准化。ZigBee 协议栈架构虽然基于 OSI 七层模型，但也只定义了与其应用相关的几个层（见图 1-5）。IEEE 802.15.4 标准定义了物理层和 MAC 子层，ZigBee 标准在这个基础之上扩展了网络层（NWK，network layer）和应用层框架，其中包括应用支持子层（APS，application support sub-layer）、ZigBee 设备对象（ZDO，ZigBee Device Object）以及设备商自定义的应用组件。

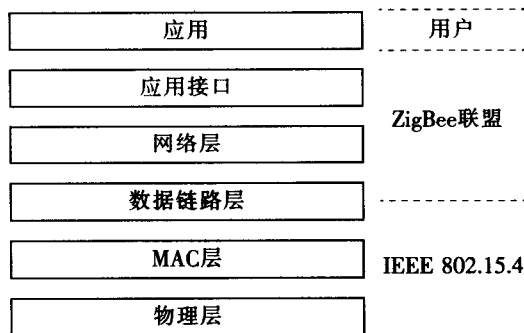


图 1-5 ZigBee 协议栈模型

ZigBee 标准确定了三种设备：ZigBee 协调器、ZigBee 路由器和 ZigBee 终端设备。每个网络都必须包括一台 ZigBee 协调器。协调器的主要功能是为建立和启动网络这一过程设置参数，其中包括选择一个射频信道，唯一的网络标识符以及一系列操作参数。ZigBee 路由器作为远程设备之间的中继器来进行通信，能够用来拓展网络的范围。ZigBee 终端设备为采集数据的终端节点，直接与 ZigBee 路由器通信而不参与路由选择。

ZigBee 所制定的网络层主要负责网络拓扑的搭建和维护，以及设备寻址、路由等，属于通用的网络层功能范畴；应用层负责业务数据流的汇聚、设备发现、服务发现、安全与鉴权等。