

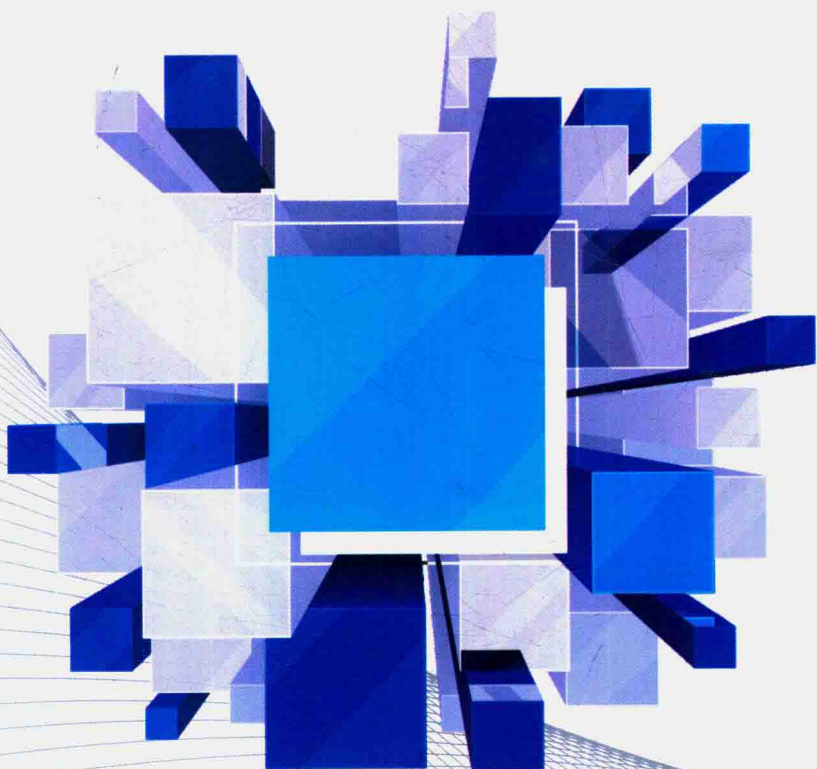


中国电子学会物联网专家委员会推荐

普通高等教育物联网工程专业“十三五”规划教材

无线传感网技术与设计

向守超 谢钱涛 吴俊霖 编著



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

无线传感网技术与设计

向守超 谢钱涛 吴俊霖 编 著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书全面介绍了无线传感网技术的基本原理和应用开发技术。全书共分为8章,首先介绍了无线传感网技术概论和无线传感网关键技术,包括体系结构、发展历程、定位技术、时间同步技术、安全技术、数据融合、路由协议等主要知识体系;其次介绍了Wi-Fi无线通信技术,包含了AT指令集介绍和典型的Wi-Fi无线通信实例;接下来分析了ZigBee技术在无线传感网中的具体应用,包含了ZigBee技术原理、协议栈分析以及ZigBee在协议栈中的具体开发与设计;最后讨论了红外线通信技术。本书在对知识体系全面分析的同时,插入了许多典型案例设计,真正做到了理论和实践密切结合。

本书可作为高等院校电气信息类、物联网工程类相关专业的无线传感网技术课程的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无线传感网技术与设计 / 向守超, 谢钱涛, 吴俊霖主编. — 西安: 西安电子科技大学出版社, 2018.10
ISBN 978-7-5606-5039-5

I. ① 无… II. ① 向… ② 谢… ③ 吴… III. ① 无线电通信—传感器 IV. ① TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 181455 号

策划编辑 刘玉芳

责任编辑 祝婷婷 阎彬

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 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2018年10月第1版 2018年10月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 19

字 数 450千字

印 数 1~3000册

定 价 43.00元

ISBN 978-7-5606-5039-5 / TP

XDUP 5341001-1

***** 如有印装问题可调换 *****



前 言

无线传感网是一种集信息采集、处理和传输功能于一体的智能网络信息系统。它由大量传感器节点组成，这些传感器节点被部署在指定的地理区域内，通过无线通信和自组织方式形成无线网络，能够实时感知与采集指定区域内的各种环境数据和目标信息，并将所感知与采集到的数据和信息传递给监控中心或终端用户，实现对物理世界的感知及人与物理世界之间的通信和信息交互。如果说互联网的出现改变了人与人之间的沟通方式，那么无线传感器网络的出现改变了人与自然界之间的交互方式，使人类可以通过无线传感网直接感知客观世界，进而极大地提高了人类认识和改造物理世界的能力。因此，无线传感网在民用和军事领域具有十分广阔的应用前景。在民用领域，无线传感网可以应用于环境监测、工业控制、医疗健康、智能家居、科学探索、抢险救灾和公共安全等方面；在军事领域，无线传感网可以应用于国土安全、战场监视、战场侦察、目标定位、目标识别、目标跟踪等方面。

无线传感网是物联网的重要分支，是随着无线通信、嵌入式技术、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门新兴的信息获取技术，是当前在国际上备受关注、多学科高度交叉、知识高度集成的前沿热点研究领域。由于所涉及的学科和理论研究问题较多，很多技术还在探索过程中。目前很多的无线传感网教材都比较注重理论深度，不利于工程应用型人才培养。本书是在作者多年对无线传感网的理论研究和教学基础上编写的，作为无线传感网技术的基础性教材，力求简明扼要，深入浅出，删减复杂、繁琐的理论推导，比较详细地介绍了无线传感网所涉及的关键技术和基本理论，并将其与实际应用相结合，既有利于学生理解和掌握基础知识体系，也有利于学生对项目开发设计有初步的了解。

本书总结了当今无线传感网研究领域中的研究成果和应用技术，详细阐

述了无线传感网研究中的基本理论和方法,包括无线传感网技术概论、无线传感网关键技术以及当今无线传感网在实际生活中的具体应用与设计。全书结构合理,内容丰富,知识体系简明扼要,理论与实践充分结合,共分成两大部分:第一部分讲解无线传感网技术概论和无线传感网关键技术;第二部分讲解无线传感网技术的具体应用。通过阅读本书,读者可以快速、全面地掌握无线传感网技术的基本理论知识,并应用这些理论知识做一些简单的设计开发工作。为了便于读者学习相关知识体系,本书在编写过程中尽量做到结合实际,以图文结合的方式来阐明物理概念,以具体实例来引导学生进行设计开发。通过本书的学习,读者可以为以后从事无线传感网技术的应用设计开发工作打下良好的基础。

本书依据物联网工程专业的教学大纲编写,教学计划为64学时(含实验实训),也可根据实际教学情况和要求进行删减。本书由向守超(重庆机电职业技术学院)、谢钱涛(重庆工程学院)、吴俊霖(重庆工程学院)编著。其中第1章、第2章由谢钱涛老师编著,第3章、第8章由吴俊霖老师编著,第4章至第7章由向守超老师编著。本书作者诚挚感谢参加材料收集和整理的何小群老师、聂增丽老师、李章勇老师和唐敏老师,以及物联网学院的全体教师对本书编写作出的支持与鼓励!

由于编者水平有限,加之无线传感网技术在不断发展与更新,书中难免有不足之处,恳请广大读者批评指正。

编者
2018.4

目 录

第 1 章 无线传感网技术概论..... 1	2.3.1 安全技术概述.....45
1.1 无线传感网体系结构..... 1	2.3.2 WSN 安全问题分析.....48
1.1.1 无线传感网网络结构..... 1	2.3.3 WSN 安全防护技术.....51
1.1.2 无线传感器节点结构..... 2	2.4 数据融合技术.....54
1.1.3 无线传感网协议栈..... 3	2.4.1 数据融合技术概述.....54
1.2 无线传感网主要特征..... 4	2.4.2 数据融合模型.....56
1.2.1 不同于移动自组网..... 4	2.4.3 基于路由的数据融合.....58
1.2.2 不同于现场总线网络..... 4	2.4.4 基于反向组播树的数据融合.....59
1.2.3 无线传感器节点的限制..... 5	2.4.5 数据融合技术的主要算法.....60
1.2.4 无线传感网的特点..... 6	2.5 WSN 数据管理技术.....61
1.2.5 短距离无线通信技术..... 8	2.5.1 系统结构.....61
1.2.6 广域网无线通信技术..... 12	2.5.2 数据模型.....64
1.3 无线传感网关键技术..... 15	2.5.3 数据存储与索引技术.....64
1.4 无线传感网的应用..... 19	2.6 无线传感网 MAC 协议.....66
1.5 无线传感网发展与现状..... 20	2.6.1 无线传感网 MAC 协议概述.....67
1.5.1 无线传感网发展的三个阶段..... 20	2.6.2 基于竞争的 MAC 协议.....69
1.5.2 无线传感网发展现状..... 22	2.6.3 基于时分复用的 MAC 协议.....76
1.5.3 无线传感网的发展趋势..... 24	2.6.4 混合型 MAC 协议.....80
第 2 章 WSN 关键技术..... 26	2.7 无线传感网路由协议.....82
2.1 WSN 定位技术..... 26	2.7.1 路由协议概述.....83
2.1.1 定位技术概述..... 26	2.7.2 能量感知路由协议.....85
2.1.2 定位算法的分类..... 29	2.7.3 平面路由协议.....87
2.1.3 测距方法..... 31	2.7.4 层次路由协议.....90
2.1.4 节点定位计算方法..... 34	2.7.5 基于查询的路由协议.....93
2.1.5 无需测距的定位算法..... 36	2.7.6 基于地理位置的路由协议.....96
2.2 时间同步技术..... 39	2.7.7 基于 QoS 的路由协议.....101
2.2.1 时间同步概述..... 39	第 3 章 Wi-Fi 无线通信技术.....104
2.2.2 RBS 同步协议..... 41	3.1 AT 指令集.....104
2.2.3 Tiny-sync/Mini-sync 算法..... 42	3.1.1 基础 AT 指令.....104
2.2.4 TPSN 时间同步协议..... 43	3.1.2 Wi-Fi 功能 AT 指令.....107
2.2.5 LTS 算法..... 44	3.1.3 TCP/IP 工具箱 AT 指令.....121
2.3 安全技术..... 45	3.2 Wi-Fi 无线通信技术实例.....129

3.2.1 单连接 TCP Client	130	6.2.2 Include 文件夹	185
3.2.2 UDP 传输	131	6.2.3 Target 文件夹	185
3.2.3 透传	134	6.3 NWK 层分析	188
3.2.4 多连接 TCP Server	139	6.3.1 节点地址类型的选择	189
第 4 章 ZigBee 概述	141	6.3.2 协议栈模板	190
4.1 ZigBee 技术概述	141	6.3.3 网络参数配置	191
4.1.1 ZigBee 的由来和发展	141	6.4 Tools 配置和分析	194
4.1.2 无线传感器网络与 ZigBee 的 关系	142	6.5 Profile 层分析	196
4.1.3 ZigBee 技术的特点	143	6.5.1 端点的管理	197
4.1.4 ZigBee 芯片	143	6.5.2 数据的发送和接收	199
4.1.5 常见的 ZigBee 协议栈	146	6.6 ZDO 层分析	204
4.2 ZigBee 软件开发平台	146	6.6.1 ZDO 网络设备启动	204
4.2.1 IAR 软件开发平台	147	6.6.2 终端设备绑定、辅助绑定和 解除绑定	206
4.2.2 IAR 软件的安装	147	6.7 API 函数	209
4.2.3 IAR 软件的使用	151	6.7.1 信息管理 API	209
第 5 章 ZigBee 技术原理	157	6.7.2 任务同步 API	210
5.1 ZigBee 网络结构	157	6.7.3 定时器管理 API	211
5.1.1 网络体系	157	6.7.4 中断管理 API	212
5.1.2 拓扑结构	158	6.7.5 任务管理 API	212
5.1.3 协议架构	158	6.7.6 内存管理 API	213
5.2 IEEE 802.15.4 通信层	160	6.7.7 电源管理 API	213
5.2.1 物理层	160	6.8 APP 层分析	214
5.2.2 MAC 层	164	6.8.1 OSAL_SampleApp.c 文件	215
5.2.3 MAC 帧的结构	165	6.8.2 SampleApp.c 文件	216
5.3 ZigBee 网络层	169	6.8.3 SampleApp.h 文件	222
5.3.1 功能概述	169	6.9 OSAL 运行机制	223
5.3.2 服务规范	169	6.9.1 OSAL 概述	223
5.3.3 帧结构	170	6.9.2 Zstack 数据传输	224
5.4 ZigBee 应用层	172	6.9.3 OSAL 剖析	228
5.4.1 基本概念	172	6.9.4 按键事件剖析	231
5.4.2 应用支持子层	173	第 7 章 ZigBee 应用开发与设计	240
5.4.3 应用框架	173	7.1 数据传输实验	240
5.4.4 设备对象	175	7.1.1 协调器编程	241
第 6 章 Zstack 协议栈	179	7.1.2 终端节点编程	246
6.1 Zstack 软件架构	179	7.2 串口收发基础实验	250
6.2 HAL 层分析	180	7.3 无线温度检测实验	255
6.2.1 Common 文件夹	180	7.3.1 实验原理及流程图	255

7.3.2 协调器编程	256	8.1 红外线发射和接收	280
7.3.3 终端节点编程	260	8.2 红外线人体感应模块实验	282
7.4 网络通信实验	265	8.3 中断方式发射红外信号	283
7.4.1 广播和单播通信	265	8.4 PWM 方式输出红外信号	288
7.4.2 组播通信	272	8.5 红外接收实验	292
第 8 章 红外线通信技术	280	参考文献	296

第1章 无线传感网技术概论

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN, 简称无线传感网)是当前在国际上备受关注、多学科高度交叉、知识高度集成的前沿热点研究领域。WSN 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,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被发送,并以自组多跳网络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。无线传感网实现了将客观世界的物理信息同传输网络连接在一起,在下一代网络中将为人们提供最直接、最有效、最真实的信息。

本章将对无线传感网技术做一个比较全面的介绍,包括无线传感网的体系结构、主要特征、关键技术,以及应用领域、发展现状与发展趋势。

1.1 无线传感网体系结构

1.1.1 无线传感网网络结构

无线传感网是由一组无线传感器节点以 Ad Hoc(自组织)方式组成的无线网络,其目的是协作地感知、收集和处理传感网所覆盖的地理区域中感知对象的信息,并传递给观察者。这种无线传感网集中了传感器技术、嵌入式计算技术和无线通信技术,能协作地感知、监测和收集各种环境下所感知对象的信息,通过对这些信息的协作式信息处理,获得感知对象的准确信息,然后通过 Ad Hoc 方式将信息传送给需要这些信息的用户。因此传感器、感知对象和观察者构成了无线传感网的三个要素。

无线传感网包含类型众多的传感器节点,可以用来探测包括地震、电磁、温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分等周边环境中的多种多样的现象及指标,因此无线传感网的应用前景非常广泛,受到越来越多研究人员的重视。但无线传感网的硬件资源十分有限,且其工作环境通常是一些资源受限的地方,因此给理论研究人员和工程技术人员提出了大量具有挑战性的研究课题。

典型的无线传感网体系结构如图 1-1 所示,它由分布式传感器节点群组成。传感器节点可以通过飞机布撒或人工布置的方式,大量部署在被感知对象的内部或者附近。这些节点通过自组织方式构成无线网络,以协作的方式实时感知、采集和处理网络覆盖区域中的信息,并通过多跳方式将整个区域内的信息传送给基站(Base Station, BS)或汇集节点,BS 再通过传输通信网络(由互联网、卫星网或移动通信网构成)将数据传送到数据中心或发送给远处的用户。用户可以通过传输通信网发送命令给 BS,而 BS 再将命令转发给各个传感器节点。

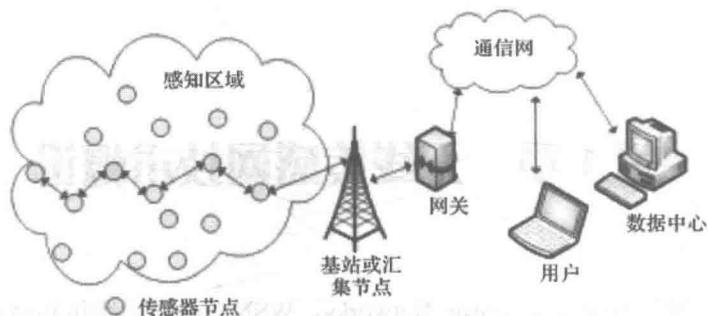


图 1-1 无线传感网结构

无线传感网是以数据为中心的网络，其关键技术和具体应用紧密相关，不同的应用场景其技术相差很大。目前，分布式的无线传感网多为分簇形式，即将传感器节点分成多个簇，每个簇存在一个簇头节点，负责簇内节点的管理和数据融合。基于分簇结构的无线传感网的体系结构如图 1-2 所示。分簇方式的特点是簇群内的节点只能与本簇的簇头通信，簇头和簇头之间可以相互传递数据，可以通过多跳方式传送数据到数据中心。

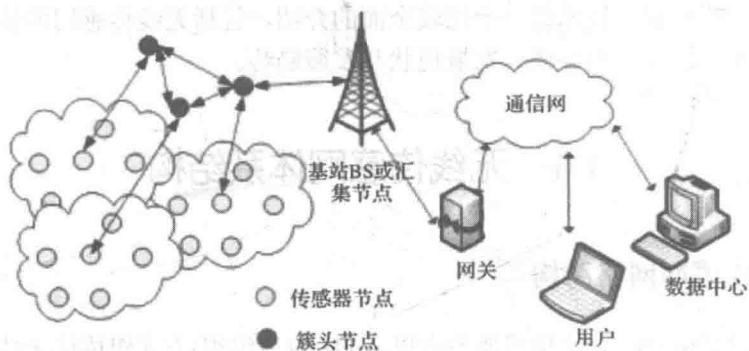


图 1-2 分簇的无线传感网的体系结构

1.1.2 无线传感器节点结构

无线传感器节点(以下简称为传感器节点)是一个微型化的嵌入式系统，它构成了无线传感网的基础层支持平台。典型的传感器节点由数据采集的感知单元、数据处理和存储的处理单元、通信收发的传输单元、节点供电的能源供给单元四个部分组成。传感器节点硬件结构如图 1-3 所示。

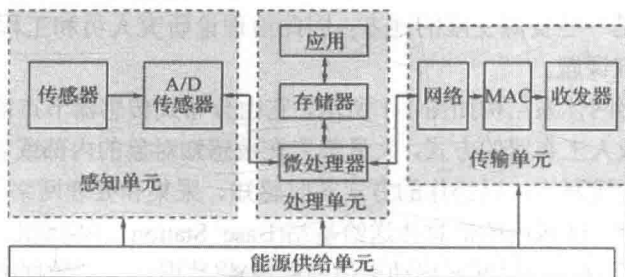


图 1-3 传感器节点硬件结构示意图

其中,感知单元由传感器和 A/D 转换器组成,负责感知监控对象的信息;能源供给单元负责供给节点工作所消耗的能量,一般为小体积的电池;传输单元完成节点间的信息交互通信工作,一般为无线电收发装置,由物理层收发器、MAC 层协议、网络层路由协议组成;处理单元包括存储器、微处理器和应用部分,负责控制整个传感器节点的操作,存储和处理本身采集的数据以及其他节点发来的数据。同时,有些节点上还装配有能源再生装置、运动或执行机构、定位系统等扩展设备,以获得更完善的功能。

典型的传感器节点体积较小,可能小于 1 cm^3 ,其往往被部署在无人照看或恶劣的环境中,无法更换电池,节点能量受限。由于具体的应用背景不同,目前国内外出现了多种无线传感器节点的硬件平台。典型的节点包括美国 CrossBow 公司开发的 Mote 系列节点 Mica2、MicaZ 和 Mica2Dot,德国 Infineon 公司开发的 EYES 传感器节点等。实际上各平台最主要的区别是采用了不同的处理器、无线通信协议以及应用相关不同的传感器。常用的处理器有 Intel StrongARM、Texas Instrument MSP430 和 Atmel Atmega;常用的无线通信协议有 802.11b、802.15.4/ZigBee 和 Bluetooth 等;与应用相关的传感器有光传感器、热传感器、压力传感器以及湿度传感器等。

1.1.3 无线传感网协议栈

无线传感网协议栈由应用层、传输层、网络层、数据链路层、物理层以及功率管理平面、移动管理平面、任务管理平面组成,如图 1-4 所示。

无线传感网协议栈将功率意识和路由意识组合在一起,将数据与网络协议综合在一起,在无线传输媒介上进行能量高效通信,支持各个传感器节点相互协作。根据感知任务,可以在应用层上建立和使用不同类型的应用软件。传输层帮助维护 WSN 应用所需要的数据流。网络层解决传输层提供的数据的传输路由问题。由于存在环境噪声以及传感器节点可能是移动节点,所以 MAC 协议必须具有能量意识能力,能够使与临近节点广播的碰撞达到最低程度。物理层解决简单而又强壮的调制、发送、接收技术问题。此外,功率管理平面、移动管理平面、任务管理平面分别监视传感器节点之间的移动、任务分配,帮助传感器节点协调感知任务和降低总功耗。

功率管理平面管理每个传感器节点如何运用其能量。例如,传感器节点接收到其中一个相邻节点的一条消息后,可以关闭接收机,这样可以避免接收重复的消息。一个传感器节点剩余能量较低时,可以向其相邻节点广播,通知它们自己剩余能量较低,不能参与路由功能,而将剩余能量用于感知任务。移动管理平面用于检测和记录传感器节点的移动状况,因而总是维护返回到用户的路由。传感器节点能够连续不停地跟踪其相邻传感器节点。传感器节点获知其相邻传感器节点后,就能够平衡其能量和任务处理。任务管理平面平衡和安排特定区域内的全部传感器节点,同时执行感知任务。因此,有些传感器节点能根据其能量等级执行比其他传感器节点更多的感知任务。功率管理平面、移动管理平面和任务管理平面是必需的,这样各个传感器节点才能一起高效地工作,在移动 WSN 中传输数据,

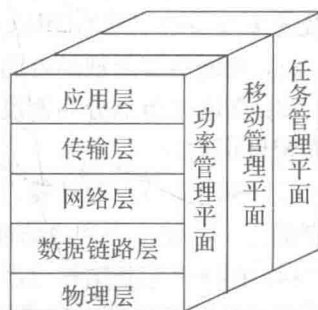


图 1-4 无线传感网协议栈

共享资源。如果没有功率管理平面、移动管理平面和任务管理平面,那么每个传感器节点只能单独工作。从整个 WSN 来看,若传感器节点能够相互协作,则网络效率更高,WSN 的寿命更长。

1.2 无线传感网主要特征

1.2.1 不同于移动自组网

移动自组网(Mobile Ad Hoc Networks)或移动 Ad Hoc 网络是一个由几十到上百个节点组成,采用无线通信方式,动态组网的多跳移动性对等网络。其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,通常其节点具有持续的能量供给。

无线传感网虽然与移动自组网有相似之处,但同时也存在很大的差别。无线传感网是集成了检测、控制和无线通信的网络系统。与传统的 Ad Hoc 网络相比,无线传感网的业务量较小,而移动 Ad Hoc 网络业务量较大,主要是 Internet 业务(包括多媒体业务)。无线传感器节点固定,处理能力、存储能力和通信能力有限,更换电池困难,因而能源问题是无线传感网的主要问题;而移动 Ad Hoc 网络移动性较强,易于更换电池,故其节点能量不受限制。

无线传感网是无线 Ad Hoc 网络的一种典型应用,虽然它具有无线自组织特征,但与传统的无线自组织网络相比,又有一些不同之处,它们之间的主要区别有以下几点:

- (1) 在网络节点规模方面,无线传感网包含的节点数量比 Ad Hoc 网络高几个数量级。
- (2) 在网络节点分布密度方面,因节点冗余的要求和部署的原因,无线传感器节点的分布密度很大。
- (3) 在网络节点处理能力方面,Ad Hoc 网络的处理能力较强,而无线传感器节点固定,处理能力、存储能力和通信能力都有限。
- (4) 在网络拓扑结构方面,Ad Hoc 网络是由于节点的移动而产生的,而无线传感网是由于节点休眠、环境干扰或节点故障而产生的。
- (5) 在通信方式方面,无线传感器节点主要使用广播通信,而 Ad Hoc 网络节点采用点对点通信。
- (6) 由于无线传感器节点数量的原因,节点没有统一的标识。
- (7) 无线传感网以数据为中心。

1.2.2 不同于现场总线网络

在自动化领域,现场总线控制系统(Fieldbus Control System, FCS)正在逐步取代一般的分布式控制系统(Distributed Control System, DCS),各种基于现场总线的智能传感器/执行器技术得到了迅速发展。现场总线是应用在生产现场和微机化测量控制设备之间,实现双向串行多节点数字通信的系统,也被称为开放式、数字化、多点通信的底层控制网络。

现场总线作为一种网络形式,是专门为实现在严格的实时约束条件下工作而特别设计

的。现场总线技术将专用微处理器植入传统的测量控制仪表,使它们各自具有数字计算和数字通信的能力,然后采用简单连接的双绞线等作为总线,把多个测量控制仪表连接成网络系统,并按公开、规范的通信协议,在位于现场的多个微机化测量控制设备之间和现场仪表与远程监控计算机之间实现数据的传输与信息交换,形成各种适应实际需要的自动控制系统。

现场总线是20世纪80年代中期在国际上发展起来的。随着微处理器与计算机功能的不断增强和价格的降低,计算机与计算机网络系统得到了迅速发展。现场总线可实现整个企业的信息集成,实现综合自动化,形成工厂底层网络,完成现场自动化设备之间的多点数字通信,实现底层现场设备之间和生产现场与外界的信息交换。目前市场上较为流行的现场总线有CAN(控制局域网)、Lonworks(局部操作网络)、Profibus(过程现场总线)、HART(可寻址远程传感器数据通信)和FF(基金会现场总线)等。

由于严格的实时性要求,这些现场总线的网络构成通常是有线的。在开放式通信系统互联参考模型中,现场总线利用的只有第一层物理层、第二层链路层和第七层应用层,避开了多跳通信和中间节点的关联队列延迟。然而,尽管固有的有限差错率不利于实现,人们仍然致力于在无线通信中实现现场总线的构想。

由于现场总线是通过报告传感数据来控制物理环境的,所以从某种程度上说,它与传感网非常相似,甚至可以将无线传感网看做是无线现场总线的实例。但是两者的区别是明显的。无线传感网关注的焦点不是数十毫秒范围内的实时性,而是具体的业务应用,这些应用能够容许较长时间的延迟和抖动。另外,基于传感网的一些自适应协议在现场总线中并不需要,如多跳、自组织的特点,而且现场总线及其协议也没有考虑节约能源的问题。

1.2.3 无线传感器节点的限制

无线传感器节点在实现各种网络协议和应用系统时,存在以下约束。

1. 电源能量有限

传感器节点体积微小,通常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。如何高效使用能量来使网络生命周期最大化是无线传感网面临的首要挑战。

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。因此,传感器节点传输信息时比执行计算时更消耗电能。

无线通信模块存在发送、接收、空闲和睡眠四种状态。无线通信模块在空闲状态一直监听无线信道的使用情况,检查是否将数据发送给自己;而在睡眠状态是关闭通信模块的。无线通信模块在发送状态的能量消耗最大,在空闲状态和接收状态的能量消耗接近,略少于发送状态的能量消耗,在睡眠状态的能量消耗最少。如何让网络通信更有效率,减少不必要的转发和接收,在不需要通信时尽快进入睡眠状态,是传感网协议设计需要重点考虑的问题。传感器节点各部分能量消耗的分布情况如图1-5所示,从图中可知传感器节点的绝大部分能量消耗在无线通信模块。传感器节点传输信息时要比执行计算时更消耗电能,

将 1 比特信息传输 100 m 距离需要的能量大约相当于执行 3000 条计算指令消耗的能量。

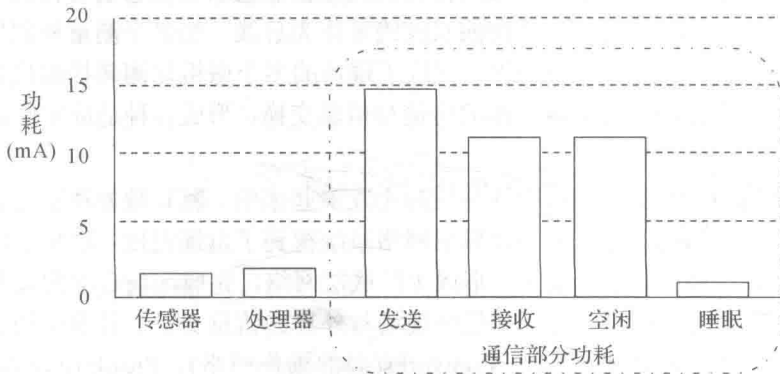


图 1-5 传感器节点能量消耗分布图

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 $E = kd^n$ (参数 $n = 2 \sim 4$ 为衰落因子)。衰落因子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，衰落因子的取值就大；天线质量对信号发射的影响也很大。考虑诸多因素，通常衰落因子取值为 3，即通信消耗与距离的 3 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大，无线传感网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，通常仅有数百 kb/s 的速率。由于节点能量的变化，受高层建筑物、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。在这样的通信环境和节点有限的通信能力情况下，如何设计网络通信机制以满足传感网的通信需求是传感网面临的挑战之一。

3. 计算和存储能力有限

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) 模块和动态电压调节 (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睡眠状态；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 StrongARM) 都支持电压频率调节。

1.2.4 无线传感网的特点

无线传感网是一种智能网络，它与传统网络相比具有很多独特之处。正是这些独特的优点，使得无线传感网除了自身优势以外还有很多需要解决的问题，这无论对现代研究者还是对无线传感网在实际中的应用者来说，都具有很大的挑战性。无线传感网的主要特点

介绍如下:

(1) 无线传感网规模大, 密度高。为了获取尽可能精确、完整的信息, 无线传感网通常密集部署在大片的监测区域内, 传感器节点的数量可能成千上万, 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, 降低对单个传感器节点的精确要求, 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, 减少盲区。

(2) 传感器节点的能量、计算能力和存储容量有限。随着传感器节点的微型化, 在设计中大部分节点的能量靠电池提供, 其能量有限, 而且由于条件限制, 难以在使用过程中给节点更换电池, 所以传感器节点的能量限制是整个无线传感网设计的瓶颈, 它直接决定了网络的工作寿命。另一方面, 传感器节点的计算能力和存储能力都较低, 使得不能进行复杂的计算和数据存储, 因而给无线传感网的研究者们提出了挑战, 他们必须设计简单有效的路由协议等, 以适用于无线传感网。

(3) 无线传感网的拓扑结构易变化, 具有自组织能力。由于无线传感网中节点节能的需要, 传感网节点可以在工作和睡眠状态之间切换, 传感器节点随时可能由于各种原因发生故障而失效, 或者添加新的传感器节点到网络中, 这些情况的发生都使得无线传感网的拓扑结构在使用中很容易发生变化。此外, 如果节点具备移动能力, 也必定会带来网络的拓扑变化。基于网络的拓扑结构易变化, 无线传感网具有自组织、自配置的能力, 能够对由于环境、电能耗尽因素造成的传感器节点改变网络拓扑的情况做出相应的反应, 以保证网络的正常工作。

(4) 网络的自动管理和高度协作性。在无线传感网中, 数据处理由节点自身完成, 这样做的目的是只有与其他节点相关的信息才在链路中被传送, 从而减少无线链路中传送的数据量。以数据为中心的特性是无线传感网的又一个特点, 因为节点不是预先计划的, 而且节点位置也不是预先确定的, 所以就有一些节点由于发生较多错误或者不能执行指定任务而被终止运行。为了在网络中监视目标对象, 配置冗余节点是必要的, 节点之间可以通信和协作, 共享数据, 这样可以保证获得被监视对象比较全面的数据。对用户来说, 向所有位于观测区的传感器发送一个数据请求, 然后将所采集的数据送到指定节点处理, 可以用一个多播路由协议把消息送到相关节点, 这需要一个唯一的地址表, 而对于用户而言, 不需要知道每个传感器的具体身份号, 所以可以采用以数据为中心的组网方式。

(5) 传感器节点具有数据融合能力。在无线传感网中, 由于传感器节点数目大, 很多节点会采集到具有相同类型的数据。因而, 通常要求其中的一些节点具有数据融合能力, 能对来自多个传感器节点采集的数据进行融合, 再送到信息处理中心。数据融合可以减少冗余数据, 从而减少在传送数据过程中的能量消耗, 延长网络的寿命。

(6) 以数据为中心的网络。在互联网中, 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、服务器等网络设备的 IP 地址。如果想访问互联网中的资源, 首先要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。在无线传感网中, 人们只关心某个区域某个观测指标的值, 而不会去关心具体某个节点的观测数据。无线传感网是任务型的网络, 脱离无线传感网讨论传感器节点没有任何意义。无线传感网的节点采用节点编号标识, 是否需要节点编号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, 构成的无线传感网与节点编号之间的关系是

完全动态的,因此表现为节点编号与节点位置没有必然联系。用户使用无线传感网查询事件时,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,通常说无线传感网是一个以数据为中心的网络。

(7) 安全性问题严重。由于无线传感网节点本身的资源,如计算能力、存储能力、通信能力和电量供应能力十分有限,并且节点通常部署在无人值守的野外区域,使用不安全的无线链路进行数据传输,因此无线传感网很容易受到多种类型的攻击,如选择性转发攻击、采集点漏洞攻击、伪造身份攻击、虫洞攻击、Hello 消息广播攻击、黑洞攻击、伪造确认信息攻击以及伪造、篡改和重放路由攻击等。

1.2.5 短距离无线通信技术

目前使用较广泛的短距离无线通信技术是蓝牙(Bluetooth)、无线局域网 802.11(Wi-Fi)和红外数据传输(IrDA)。同时更有一些具有发展潜力的短距离无线技术标准,分别是: ZigBee、超宽频(Ultra Wide Band)、短距通信(Near Field Communication, NFC)、WiMedia、GPS、数字增强无线通信(Digital Enhanced Cordless Telecommunications, DECT)系统、无线 1394 和专用无线系统等。它们都能满足不同的应用要求,或基于传输速度、距离、耗电量的特别需求;或着眼于功能的扩充性;或符合某些单一应用的特别需求;或建立竞争技术的差异化等。不过没有一种技术能完美到足以满足所有的需求。ZigBee 系统采用的是直接序列展频技术(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS),使得原来较窄的高功率频率变成较宽的低功率频率,以有效控制噪声,是一种抗干扰能力极强,保密性、可靠性都很高的通信方式。蓝牙系统采用的是跳频扩频技术(Frequency-Hopping Spread Spectrum, FHSS),这些系统仅在部分时间才会发生使用频率冲突,其他时间则能在彼此相互无干扰的频道中运作。ZigBee 系统是非跳频系统,所以蓝牙在多次通信中才可能和 ZigBee 的通信频率产生重叠,且将会迅速跳至另一个频率。大多数情况下,蓝牙不会对 ZigBee 产生严重威胁,而 ZigBee 对蓝牙系统的影响可以忽略不计。

1. IrDA 技术

红外线数据协会(Infrared Data Association, IrDA)是致力于建立红外线无线连接的非营利组织,同时也是一种利用红外线进行点对点通信的数据传输协议,其通信距离一般在 0~1 m 之间,传输速度最快可达到 16 Mb/s,通信介质为波长 900 nm 左右的近红外线。其传输具有小角度、短距离、直线数据传输、保密性强及传输速率较高等特点,适于传输大容量的文件和多媒体数据,并且无需申请频率的使用权,成本低廉。IrDA 已被全球范围内的众多厂商采用,目前主流的软硬件平台均提供对它的支持。

IrDA 数据通信按发送速率分为三大类: SIR、MIR 和 FIR。串行红外(SIR)的速率覆盖了 RS232 端口通常支持的速率(9600 b/s~115.2 kb/s)。中速率红外(MIR)可支持 0.576 Mb/s 和 1.152 Mb/s 的速率;高速率红外(FIR)通常用于 4 Mb/s 的速率,有时也可用于高于 SIR 的所有速率。

IrDA 的不足在于它是一种视距传输,两个相互通信的设备之间必须对准,中间不能被其他物体阻隔,而且只适合两台设备之间的连接。IrDA 目前的研究方向是如何解决视距传

输问题及提高数据传输率。

2. 蓝牙技术

蓝牙(Bluetooth)技术是一种无线技术标准,可实现固定设备、移动设备和楼宇个人域网之间的短距离数据交换。蓝牙技术最初由电信巨头爱立信公司于1994年创制,当时是作为RS232数据线的替代方案。蓝牙可连接多个设备,克服了数据同步的难题。如今蓝牙由蓝牙技术联盟(Bluetooth Special Interest Group, SIG)管理。蓝牙技术联盟在全球拥有超过25 000家成员公司,它们分布在电信、计算机、网络 and 消费电子等多重领域。IEEE将蓝牙技术列为IEEE 802.15.1,但如今已不再维持该标准。蓝牙技术联盟负责监督蓝牙规范的开发,管理认证项目,并维护商标权益。制造商的设备必须符合蓝牙技术联盟的标准才能以“蓝牙设备”的名义进入市场。蓝牙技术拥有一套专利网络,可发放给符合标准的设备。

蓝牙系统一般由无线单元、链路控制单元、链路管理单元和蓝牙软件(协议栈)单元等四个单元组成。

蓝牙技术的特点和优点在于:工作在全球开放的2.4 GHz ISM频段;使用跳频扩频技术,把频带分成若干个跳频信道,在一次连接中,无线电收发器按一定的码序列不断地从一个信道跳到另一个信道;在有效范围内可越过障碍物进行连接,没有特别的通信视角和方向要求;组网简单方便;低功耗、通信安全性好;数据传输带宽可达1 Mb/s;一台蓝牙设备可同时与其他7台蓝牙设备建立连接;支持语音传输。

蓝牙产品涉及PC、笔记本、移动电话等通信设备以及A/V设备、汽车电子、家用电器和工业设备领域。尤其是个人局域网应用,包括无绳电话、PDA与计算机的互联。但蓝牙同时存在植入成本高、通信对象少、通信速率较低等问题,它的发展与普及尚需经过市场的磨炼,其自身的技术也有待于不断完善和提高。

蓝牙的典型应用包括:

- (1) 语音/数据接入,是指将一台计算机通过安全的无线链路连接到通信设备上,完成与广域网的连接。
- (2) 外围设备互连,是指将各种设备通过蓝牙链路连接到主机上。
- (3) 个人局域网(PAN),主要用于个人网络与信息的共享与交换。

3. Wi-Fi 技术

Wi-Fi(Wireless Fidelity,即无线保真技术)是属于无线局域网的一种,通常是指符合IEEE定义的一个无线网络通信的工业标准(IEEE 802.11)。它使用的是2.4 GHz附近的频段,物理层定义了两种无线调频方式和一种红外传输方式。Wi-Fi基于IEEE 802.11a、IEEE 802.11b、IEEE 802.11g和IEEE 802.11n。其最大优点就是传输的有效距离很长,传输速率较高(可达11 Mb/s),与各种IEEE 802.11 DSSS设备兼容。

IEEE 802.11没有具体定义分配系统,只是定义了分配系统应该提供的服务。整个无线局域网定义了9种服务,其中5种服务属于分配系统的任务,分别为联系(Association)、结束联系(Disassociation)、分配(Distribution)、集成(Integration)、再联系(Reassociation);另外4种服务属于站点的任务,分别为鉴权(Authentication)、结束鉴权(Deauthentication)、隐私(Privacy)、MAC数据传输(MSDU delivery)。

目前,最新的交换机能把Wi-Fi无线网络从接近100 m的通信范围扩大到约6.5 km。