



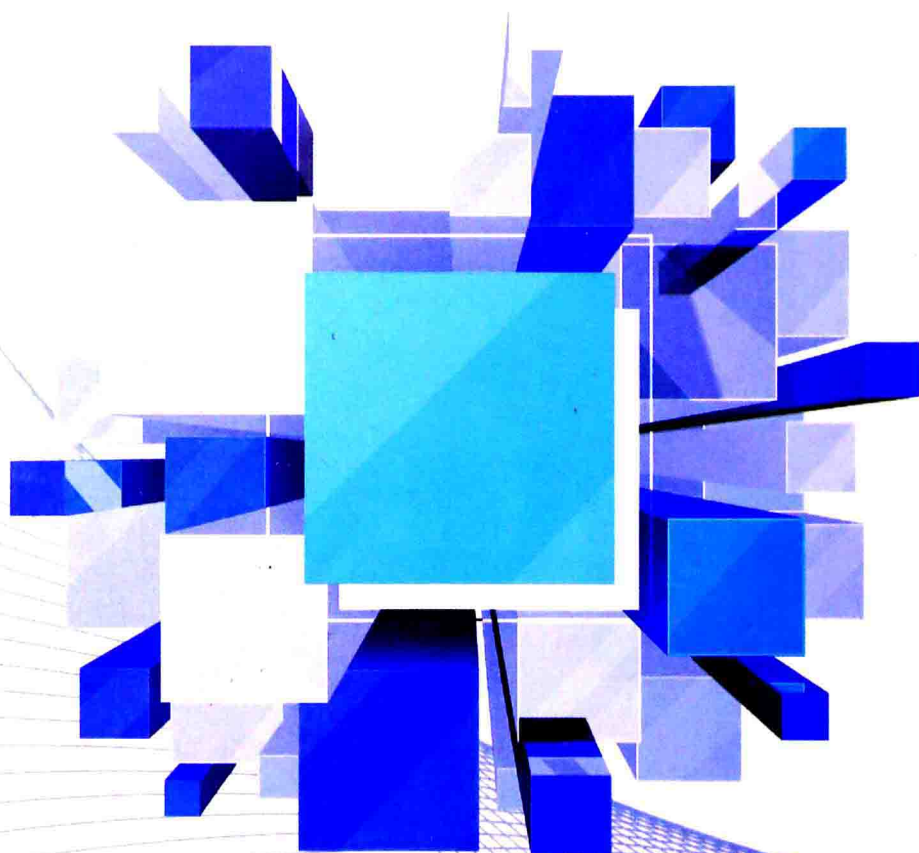
中国电子学会物联网专家委员会推荐

普通高等教育物联网工程专业“十二五”规划教材

Zigbee 开发技术及实践

Zigbee Technology Development and Practice

青岛东合信息技术有限公司 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“十二五”规划教材

Zigbee 开发技术及实践

青岛东合信息技术有限公司 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书从 Zigbee 基础知识出发,详细讲解了基于 CC2530 芯片的 Zigbee 软硬件开发技术。全书分为理论篇和实践篇两部分,理论篇分别介绍了 Zigbee 技术的基本概念、Zigbee 技术的原理、Zigbee 节点的硬件设计、CC2530 基础开发、CC2530 无线射频及 IEEE802.15.4 标准、Zstack 协议栈分析、Zstack 系统移植和应用开发,实践篇以实现智能农业大棚的环境监测为基础,结合理论篇进行实践操作。

本书采用理论和实践相结合的方法,对 CC2530 片上系统和 Zstack 协议栈进行了深入的讲解、剖析和应用实现,使读者能迅速理解并掌握 Zigbee 相关的开发知识,并全面提高动手能力。本书适用面广,可作为本科物联网工程、通信工程、电子信息工程、自动化、计算机科学与技术、计算机网络等专业的教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

Zigbee 开发技术及实践/青岛东合信息技术有限公司编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2014.1
普通高等教育物联网工程专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3247-6

I. ① Z… II. ① 青… III. ① 无线电信号—射频—信号识别—高等学校—教材
IV. ① TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 282206 号

策 划 毛红兵

责任编辑 王 飞 毛红兵

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 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 28

字 数 666 千字

印 数 1~3000 册

定 价 63.00 元

ISBN 978-7-5606-3247-6/TN

XDUP 3539001 -1

如有印装问题可调换

普通高等教育物联网工程专业

“十二五”规划教材编委会

主 任： 韩敬海

副主任： 吴明君

编 委：	崔文善	王成端	孔祥木
	薛庆文	孔繁之	陈龙猛
	李洪杰	刘继才	吴海峰
	张 磊	孔祥和	王 蕊
	窦相华	王海峰	张 伟

前 言

随着物联网产业的迅猛发展，企业对物联网工程应用型人才的需求越来越大。“全面贴近企业需求，无缝打造专业实用人才”是目前高校物联网专业教育的革新方向。

本系列教材是面向高等院校物联网专业方向的标准化教材，教材内容重理论且突出实践，强调理论讲解和实践应用的结合，覆盖了物联网的感知技术、网络通信技术及应用技术等物联网架构所包含的关键技术。教材研发充分结合物联网企业的用人需求，经过了广泛的调研和论证，并参照多所高校一线专家的意见，具有系统性、实用性等特点，旨在使读者在系统掌握物联网开发知识的同时，着重提升自身的综合应用能力和解决问题的能力。

该系列教材具有如下几方面的特色。

1. 以培养应用型人才为目标

本系列教材以应用型物联网人才为培养目标，在原有体制教育的基础上对课程进行深层次改革，强化应用型人才的动手能力，使读者在经过系统、完整的学习后能够达到以下要求：

- 掌握物联网相关开发所需的理论和技术体系以及开发过程的规范体系。
- 能够熟练地进行设计和开发工作，并具备良好的自学能力。
- 具备一定的项目经验，能够完成嵌入式系统设计、程序编写、文档编写、软硬件测试等工作。
- 达到物联网企业的用人标准，实现学校学习与企业工作的无缝对接。

2. 以新颖的教材架构引导学习

本系列教材从整个教材体系到具体的教材内容都体现出普及知识、基础理论、应用开发、综合拓展等四个层面，应由浅入深、由易到难地开展教学。具体内容在组织上划分为理论篇和实践篇：理论篇涵盖普及知识、基础理论和应用开发的内容；实践篇包括企业应用案例和综合知识拓展等内容。

■ **理论篇：**学习内容的选取遵循“二八原则”（即重点内容由企业中常用技术的 20% 组成），以“任务驱动”的方式引导知识点的学习，以章节为单位进行组织。章节的结构如下：

- **本章目标：**明确本章的学习重点和难点。
- **学习导航：**以流程图的形式指明本章在整本教材中的位置和学习顺序。
- **任务描述：**给出驱动本章教学的任务，所选任务典型、实用。

➤ 章节内容：通过小节迭代组成本章的学习内容，以任务描述贯穿始终。

■ **实践篇：**以接近工程实践的应用案例贯穿始终，力求使学生在动手实践的过程中，加深对课程内容的理解，培养学生独立分析和解决问题的能力，并配备相关知识的拓展讲解和拓展练习，拓宽学生的知识面。

本系列教材借鉴了软件开发中“低耦合、高内聚”的设计理念，组织架构上遵循软件开发中的 MVC 理念，即在保证最小教学集的前提下可根据自身的实际情况对整个课程体系进行横向或纵向裁剪。

3. 以完备的教辅体系和教学服务保障教学

为充分体现“实境耦合”的教学模式，方便教学实施，保障教学质量和学习效果，本系列教材均配备可配套使用的实验设备和全套教辅产品，可供各院校选购。

■ **实验设备：**与教材体系相配套，并提供全套的电路原理图、实验例程源程序等。

■ **立体配套：**为适应教学模式和教学方法的改革，本系列教材提供完备的教辅产品，包括教学指导、实验指导、视频资料、电子课件、习题集、题库资源、项目案例等，并配以相应的网络教学资源。

■ **教学服务：**教学实施方面，提供全方位的解决方案(在线课堂解决方案、专业建设解决方案、实训体系解决方案、教师培训解决方案和就业指导解决方案等)，以适应物联网专业教学的特殊性。

本系列教材由青岛东合信息技术有限公司编写，参与本书编写工作的有韩敬海、李瑞改、张玉星、孙锡亮、李红霞、刘晓红、袁文明、卢玉强、赵克玲、高峰、张幼鹏、张旭平等。参与本书编写工作的还有青岛农业大学、潍坊学院、曲阜师范大学、济宁学院、济宁医学院等高校的教师。本系列教材在编写期间得到了各合作院校专家及一线教师的大力支持和协作。在本系列教材出版之际，要特别感谢给予我们开发团队大力支持和帮助的领导及同事，感谢合作院校的师生给予我们的支持和鼓励，更要感谢开发团队每一位成员所付出的艰辛劳动。

由于水平有限，书中难免有不当之处，读者在阅读过程中如有发现，可以通过访问公司网站(<http://www.dong-he.cn>)或以邮件方式发至我公司教材服务邮箱(dh_iTeacher@126.com)。

高校物联网专业 项目组

2013 年 8 月

目 录

理 论 篇

第 1 章 Zigbee 概述.....	2	2.5.3 应用框架	30
1.1 Zigbee 技术概述	2	2.5.4 设备对象	31
1.1.1 Zigbee 的由来和发展	3	练习	36
1.1.2 无线传感器网络与 Zigbee 的关系	3	第 3 章 Zigbee 硬件设计	37
1.1.3 Zigbee 技术的特点	4	3.1 概述	37
1.1.4 Zigbee 芯片	5	3.2 设计规则及注意事项	38
1.1.5 常见的 Zigbee 协议栈	7	3.2.1 原理图设计	38
1.2 Zigbee 软件开发平台	8	3.2.2 PCB 设计	40
1.2.1 IAR 软件开发平台	8	3.3 硬件总体设计	41
1.2.2 Zigbee Sniffer	9	3.3.1 CC2530 核心板设计	41
1.2.3 辅助软件	10	3.3.2 协调器节点设计	42
1.3 Zigbee 硬件开发平台	10	3.3.3 路由器节点设计	50
练习	11	3.4 低功耗设计	51
第 2 章 Zigbee 技术原理	12	练习	52
2.1 概述	12	第 4 章 CC2530 基础开发	53
2.2 Zigbee 网络结构	12	4.1 概述	54
2.2.1 网络体系	13	4.2 CC2530 的结构框架	55
2.2.2 拓扑结构	13	4.2.1 CC2530 CPU	57
2.2.3 协议架构	14	4.2.2 CC2530 存储器以及映射	57
2.3 IEEE802.15.4 通信层	16	4.3 CC2530 编程基础	61
2.3.1 物理层	16	4.3.1 寄存器和汇编指令	61
2.3.2 MAC 层	20	4.3.2 编程基础	61
2.3.3 MAC 帧的结构	21	4.3.3 中断的使用	66
2.4 Zigbee 网络层	25	4.4 I/O	71
2.4.1 功能概述	25	4.4.1 通用 I/O	71
2.4.2 服务规范	25	4.4.2 通用 I/O 中断	77
2.4.3 帧结构	26	4.4.3 外设 I/O	85
2.5 Zigbee 应用层	28	4.5 振荡器和时钟	89
2.5.1 几个概念	28	4.5.1 振荡器	89
2.5.2 应用支持子层	30	4.5.2 系统时钟及寄存器	89

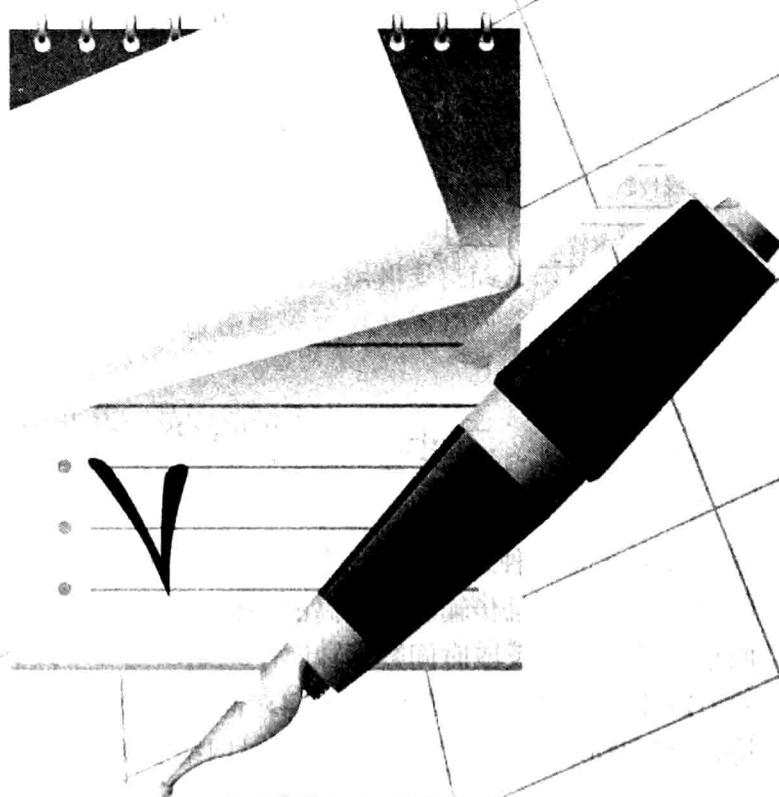
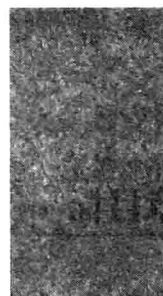
4.6 电源管理和复位	91	5.7.3 IEEE802.15.4 射频程序设计	171
4.6.1 供电模式	91	5.7.4 发送过程	177
4.6.2 电源管理寄存器	92	5.7.5 接收过程	183
4.6.3 复位	94	5.7.6 实验结果及现象	187
4.7 串口	94	练习	188
4.7.1 串口模式	94	第 6 章 Zstack 协议栈	189
4.7.2 串口中断	103	6.1 概述	189
4.8 DMA	108	6.2 Zstack 软件架构	190
4.8.1 DMA 概述	108	6.2.1 Zigbee 协议栈的结构	190
4.8.2 DMA 操作与配置	109	6.2.2 Zstack 协议栈	190
4.8.3 DMA 中断	117	6.2.3 Zigbee 协议栈与 Zstack 的对比	191
4.9 ADC	124	6.3 HAL 层分析	192
4.9.1 ADC 特征	124	6.3.1 Common 文件夹	192
4.9.2 ADC 输入	125	6.3.2 Include 文件夹	197
4.9.3 ADC 转换	127	6.3.3 Target 文件夹	198
4.10 定时器	131	6.4 NWK 层分析	201
4.10.1 定时器概述	131	6.4.1 节点地址类型的选择	201
4.10.2 定时器 1	132	6.4.2 协议栈模板	202
4.10.3 睡眠定时器和定时器 2	138	6.4.3 网络参数配置	203
4.10.4 定时器 3 和定时器 4	144	6.5 Tools 配置和分析	207
练习	150	6.6 Profile 层分析	209
第 5 章 无线射频与 MAC 层	151	6.6.1 端点的管理	209
5.1 概述	152	6.6.2 数据的发送和接收	211
5.2 RF 内核	152	6.7 ZDO 层分析	217
5.2.1 中断	153	6.7.1 ZDO 网络设备启动	218
5.2.2 中断寄存器	155	6.7.2 终端设备绑定、辅助绑定和 解除绑定	219
5.3 FIFO 访问	158	6.8 API 函数	223
5.3.1 RXFIFO	159	6.8.1 信息管理 API	224
5.3.2 TXFIFO	160	6.8.2 任务同步 API	225
5.4 发送模式	161	6.8.3 定时器管理 API	225
5.4.1 TX 控制	161	6.8.4 中断管理 API	227
5.4.2 帧处理	161	6.8.5 任务管理 API	227
5.5 接收模式	163	6.8.6 内存管理 API	228
5.5.1 RX 控制	163	6.8.7 电源管理 API	229
5.5.2 帧处理	165	6.8.8 非易失性存储器的 API	229
5.6 CSMA/CA 选通处理器	165	6.9 APP 层分析	231
5.7 IEEE802.15.4	170	6.9.1 OSAL_SampleApp.c 文件	232
5.7.1 IEEE802.15.4 调制规范	170	6.9.2 SampleApp.c 文件	234
5.7.2 IEEE802.15.4 数据格式	171		

6.9.3 SampleApp.h 文件.....	242	7.3.3 LCD 移植	310
6.10 OSAL 运行机制.....	242	练习	318
6.10.1 概述.....	243	第 8 章 Zstack 应用开发	319
6.10.2 OSAL 术语	243	8.1 应用设计	319
6.10.3 Zstack 数据传输.....	244	8.1.1 设计概述	320
6.10.4 OSAL 剖析	250	8.1.2 Zigbee 程序开发	320
6.10.5 按键事件剖析.....	254	8.2 体系结构设计	320
练习.....	266	8.2.1 应用环境分析	321
第 7 章 Zstack 系统移植	267	8.2.2 整体设计	321
7.1 工程模板的创建.....	268	8.2.3 应用协议制定	324
7.1.1 工程的建立.....	268	8.3 路由器程序编写	324
7.1.2 修改 App 目录.....	270	8.3.1 响应按键命令	327
7.1.3 编译选项的选择.....	272	8.3.2 响应协调器命令	330
7.2 任务的建立.....	275	8.4 协调器程序编写	332
7.2.1 函数的声明.....	276	8.4.1 直接接收数据	333
7.2.2 任务的添加.....	276	8.4.2 串口触发	334
7.2.3 任务初始化及事件处理.....	279	8.5 实验现象	337
7.3 移植.....	292	练习	338
7.3.1 LED 移植.....	292		
7.3.2 按键移植.....	298		

实 践 篇

实践 1 Zigbee 概述	340	实践 4.G2.....	390
实践 1.G.1.....	340	实践 5 无线射频与 MAC 层	394
实践 1.G.2.....	344	实践 5.G.1.....	394
实践 1.G.3.....	349	实践 6 Zstack 协议栈	404
实践 1.G.4.....	353	实践 6.G.1.....	404
实践 2 Zigbee 技术原理	356	实践 6.G.2.....	409
实践 2.G.1.....	356	实践 6.G.3.....	412
实践 2.G.2.....	361	实践 7 Zstack 系统移植	415
实践 3 Zigbee 硬件设计	367	实践 7.G.1.....	415
实践 3.G.1.....	367	实践 7.G.2.....	420
实践 3.G.2.....	371	实践 8 Zstack 应用开发	425
实践 4 CC2530 基础开发	379	实践 8.G.1.....	425
实践 4.G.1.....	379		

理论篇



第 1 章 Zigbee 概述

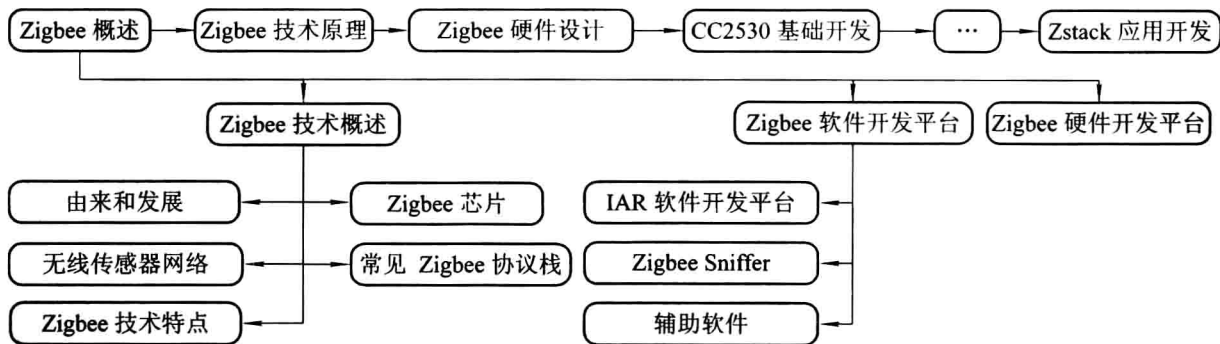


本章目标

- ◆ 掌握 Zigbee 技术概念。
- ◆ 理解 Zigbee 技术特点。
- ◆ 了解常用 Zigbee 芯片的特点。
- ◆ 了解几种常见的 Zigbee 协议栈。
- ◆ 掌握 Zigbee 软硬件开发平台的建立和安装。
- ◆ 理解 Zigbee 与无线传感器网络的关系。



学习导航



1.1 Zigbee 技术概述

Zigbee 是一种近距离、低复杂度、低功耗、低成本的双向无线通信技术。它主要用于距离短、功耗低且传输速率不高的各种电子设备之间的数据传输(包括典型的周期性数据、间歇性数据和低反应时间数据)。

Zigbee 的基础是 IEEE802.15.4, 但是 IEEE802.15.4 仅处理低级的 MAC(媒体接入控制协议)层和物理层协议, Zigbee 联盟对网络层协议和应用层协议进行了标准化。

1.1.1 Zigbee 的由来和发展

1. Zigbee 名字的由来

Zigbee 名字起源于蜜蜂之间传递信息的方式。蜜蜂通过一种特殊的肢体语言告知同伴新发现的事物源的位置信息,这种肢体语言是 Zigzag(之字形,Z 字形)舞蹈,借此意义以 Zigbee 作为新一代无线通信技术的命名。在此之前 Zigbee 也被称为 HomeRF Lite、RF-EasyLink 或 FireFly 无线电技术,现在统一称为 Zigbee 技术。

Zigbee 模块类似于移动网络的基站,通信距离从几十米到几百米,并支持无线扩展。Zigbee 理论上可以是一个由 65 536 个无线模块组成的无线网络平台,在整个网络覆盖范围内,每一个 Zigbee 模块之间可以互相通信。

2. Zigbee 技术的发展

2003 年 12 月,Chipcon 公司推出第一款符合 2.4 GHz IEEE802.15.4 标准的射频收发器 CC2420,而后又有很多家公司推出与 CC2420 收发芯片相匹配的处理器,其中以 ATMEL 公司的 Atmega128 最成功(即常用方案是 Atmega128 + CC2420)。

2004 年 12 月,Chipcon 公司推出全球第一个 IEEE 802.15.4 Zigbee 片上系统解决方案——CC2430 无线单片机,该芯片内部集成了一款增强型的 8051 内核以及当时业内性能卓越的射频收发器 CC2420。2005 年 12 月,Chipcon 公司推出内嵌定位引擎的 Zigbee IEEE802.15.4 解决方案 CC2431。2006 年 2 月,TI 公司收购 Chipcon 公司,又相继推出一系列的 Zigbee 芯片,比较有代表性的片上系统有 CC2530 等。

TI 公司在软件方面发展得比较快。2007 年 1 月,TI 公司宣布推出 Zstack 协议栈,目前已被全球众多 Zigbee 开发商所采用。Zstack 协议栈符合 Zigbee2006 规范,支持多种平台,其中包括面向 IEEE802.15.4/Zigbee 的 CC2430 片上系统解决方案、基于 CC2420 收发器的新平台以及 TI 公司的 MSP430 超低功耗控制器(MCU)。除此之外,Zstack 还支持具备定位感知特性的 CC2431。

1.1.2 无线传感器网络与 Zigbee 的关系

1. 无线传感器网络

无线传感器网络是指大量的静止或移动的传感器以自组织和多跳的方式构成的无线网络。其目的是协作地感知、采集和处理传输网络覆盖地理区域内感知对象的监测信息,并报告给用户。

无线传感器网络起源于 20 世纪 70 年代,是一种特殊的无线网络,最早应用于美国军方,例如空中预警控制系统。这种原始的传感器网络只能捕获单一信号,传感器节点只能进行简单的点对点通信。

1980 年,美国国防部高级研究计划局提出了分布式传感器网络项目,开启了现代无线传感器网络研究的先例。此项目由美国国防部高级研究计划局信息处理技术办公室主任 Robert Kahn 主导,并由卡耐基·梅隆大学、匹兹堡大学和麻省理工学院等大学研究人员配合,旨在建立一个由空间分布的低功耗传感器节点构成的网络。这些节点之间相互协作并自主运行,将信息送达处理的节点。

20 世纪 80~90 年代,无线传感器网络的研究依旧主要应用于军事领域,并成为网络中心战思想中的关键技术。1994 年,加州大学洛杉矶分校的 William J.Kaiser 教授向美国国防部高级研究计划局提交了研究建议书《低功率无线集成微传感器》,以便于深入研究无线传感器网络。1998 年,G.J.Pottie 从网络的研究角度重新阐释了无线传感器网络的科学意义。同年,美国国防部高级研究计划局投入巨资启动 SensIT 项目,目标是实现“超视距”战场监测。1999 年 9 月,美国《商业周刊》将无线传感器网络列入 21 世纪最重要的 21 项技术之一,被认为是 21 世纪人类信息研究领域所面临的重要挑战之一。

2. 无线传感器网络与 Zigbee 的关系

无线传感器网络的应用,一般不需要很高的带宽,但对功耗要求却很严格,大部分时间必须保持低功耗。传感器节点通常使用存储容量不大的嵌入式处理器,对协议栈的大小也有严格的限制。另外,无线传感器网络对网络安全性、节点自动配置和网络动态重组等方面也有一定的要求。无线传感器网络的特殊性对应用于该技术的协议提出了较高的要求,目前使用最广泛的无线传感器网络的物理层和 MAC 层协议为 IEEE802.15.4。

无线传感器网络与 Zigbee 技术之间的关系可以从两方面进行分析:一是协议标准;二是应用。其具体关系的描述如下。

✧ 从协议标准来讲,目前大多数无线传感器网络的物理层和 MAC 层都采用 IEEE802.15.4 协议标准。IEEE802.15.4 描述了低速率无线个人局域网的物理层和媒体接入控制(MAC)层协议,属于 IEEE802.15.4 工作组,而 Zigbee 技术是基于 IEEE802.15.4 标准的无线技术。

✧ 从应用上来讲,Zigbee 适用于通信数据量不大、数据传输速率相对较低、成本较低的便携或移动设备。这些设备只需要很少的能量,以接力的方式通过无线电波将数据从一个传感器传到另外一个传感器,并能实现传感器之间的组网,实现无线传感器网络分布式、自组织和低功耗的特点。

从以上两个方面来讲,Zigbee 是实现无线传感器网络应用的一种重要的技术。

1.1.3 Zigbee 技术的特点

Zigbee 可工作在 2.4 GHz(全球流行)、868 MHz(欧洲流行)和 915 MHz(美国流行)三个频段上,分别具有最高 250 kb/s、20 kb/s 和 40 kb/s 的传输速率,它的传输距离在 10~75 m 的范围内。Zigbee 作为一种无线通信技术,具有以下几个特点。

1. 低功耗

低功耗是 Zigbee 重要的特点之一。一般的 Zigbee 芯片有多种电源管理模式,这些管理模式可以有效地对节点的工作和休眠进行配置,从而使得系统在不工作时可以关闭射频部分,极大地降低了系统功耗,节约了电池的能量。

2. 低成本

Zigbee 网络协议简单,可以在计算能力和存储能力都很有限制的 MCU 上运行,非常适用于对成本要求苛刻的场合。现有的 Zigbee 芯片一般都是基于 8051 单片机内核,成本较低,这对于一些需要布置大量无线传感器网络节点的应用是很重要的。

3. 大容量

Zigbee 设备既可以使用 64 位 IEEE 网络地址, 又可以使用指配的 16 位网络短地址。在一个单独的 Zigbee 网络内, 理论上可以容纳最多 65 536 个设备。

4. 可靠

无线通信是共享信道的, 因而面临着众多有线网络所没有的问题。Zigbee 在物理层和 MAC 层采用 IEEE802.15.4 协议, 使用带时隙或不带时隙的“载波检测多址访问/冲突避免”(CSMA/CA)的数据传输方法, 并与“确认和数据检验”等措施相结合, 可保证数据的可靠传输。同时, 为了提高灵活性和支持在资源匮乏的 MCU 上运行, Zigbee 支持三种安全模式。最高级安全模式采用属于高级加密标准(AES)的对称密码和公开密钥, 可以大大提高数据传输的安全性。

5. 时延短

针对时延敏感做了优化, 通信时延和从休眠状态激活的时延都非常短。

6. 灵活的网络拓扑结构

Zigbee 支持星型、树型和网状型拓扑结构, 既可以单跳, 又可以通过路由实现多跳的数据传输。

1.1.4 Zigbee 芯片

目前最常见的 Zigbee 芯片为 CC243X 系列、MC1322X 系列和 CC253X 系列。下面分别介绍三种系列芯片的特点。

1. CC243X 系列

CC2430/CC2431 是 Chipcon 公司(已被 TI 收购)推出的用来实现嵌入式 Zigbee 应用的片上系统。它支持 2.4 GHz IEEE802.15.4/Zigbee 协议, 是世界上首个单芯片 Zigbee 解决方案。CC2430/CC2431 片上系统家族包括三个不同产品: CC2430-F32、CC2430-F64 和 CC2430-F128。它们的区别在于内置闪存的容量不同, 以及针对不同 IEEE802.15.4/Zigbee 应用做了不同的成本优化。

CC2430/CC2431 在单个芯片上整合了 Zigbee 射频前端、内存和微控制器。它使用 1 个 8 位 8051 内核, 具有 32/64/128 KB 可编程闪存和 8 KB 的 RAM, 还包含模拟数字转换器(ADC)、定时器、AES128 协同处理器、看门狗定时器、32 kHz 晶振、休眠模式定时器、上电复位电路和掉电检测电路以及 21 个可编程 I/O 引脚。CC2430/CC2431 芯片有以下特点:

- ✧ 高性能、低功耗 8051 微控制器内核。
- ✧ 极高的灵敏度及抗干扰能力。
- ✧ 强大的 DMA 功能。
- ✧ 外围电路只需极少的外接元件。
- ✧ 电流消耗小(当微控制器内核运行在 32MHz 时, RX 为 27 mA, TX 为 25 mA)。
- ✧ 硬件支持 CSMA/CA。
- ✧ 电源电压范围宽(2.0~3.6 V)。
- ✧ 支持数字化接收信号强度指示器/链路质量指示(RSSI/LQI)。

2. MC1322X 系列

MC13224 是 MC1322X 系列的典型代表,是飞思卡尔公司研发的第三代 Zigbee 解决方案。MC13224 集成了完整的低功耗 2.4 GHz 无线电收发器,内嵌了 32 位 ARM7 核的 MCU,是高密度、低元件数的 IEEE802.15.4 综合解决方案,能实现点对点连接和完整的 Zigbee 网状网络。

MC13224 支持国际 802.15.4 标准以及 Zigbee、Zigbee PRO 和 Zigbee RF4CE 标准,提供了优秀的接收器灵敏度和较强的抗干扰性、多种供电模式以及一套广泛的外设集(包括 2 个高速 UART、12 位 ADC 和 64 个通用 GPIO,4 个定时器, I2C 等)。除了更强的 MCU 外,还改进了射频输出功率、灵敏度和选择性,提供了超越第一代 CC2430 的重要性能改进,而且支持一般低功耗无线通信,还可以配备一个标准网络协议栈(Zigbee, Zigbee RF4CE)来简化开发,因此可被广泛应用在住宅区和商业自动化、工业控制、卫生保健和消费类电子等产品中。其主要特性如下:

- ✧ 2.4 GHz IEEE 802.15.4 标准射频收发器。
- ✧ 优秀的接收器灵敏度和抗干扰能力。
- ✧ 外围电路只需极少量的外部元件。
- ✧ 支持运行网状网系统。
- ✧ 128 KB 系统可编程闪存。
- ✧ 32 位 ARM7TDMI-S 微控制器内核。
- ✧ 96 KB 的 SRAM 及 80 KB 的 ROM。
- ✧ 支持硬件调试。
- ✧ 4 个 16 位定时器及 PWM。
- ✧ 红外发生电路。
- ✧ 32 kHz 的睡眠计时器和定时捕获。
- ✧ CSMA/CA 硬件支持。
- ✧ 精确的数字接收信号强度指示/LQI 支持。
- ✧ 温度传感器。
- ✧ 两个 8 通道 12 位 ADC。
- ✧ AES 加密安全协处理器。
- ✧ 两个高速同步串口。
- ✧ 64 个通用 I/O 引脚。
- ✧ 看门狗定时器。

3. CC253X 系列

CC253X 系列的 Zigbee 芯片主要是 CC2530/CC2531,它们是 CC2430/CC2431 的升级,在性能上要比 CC243X 系列稳定。CC253X 系列芯片是广泛使用于 2.4 G 片上系统的解决方案,建立在 IEEE802.15.4 标准协议之上。其中 CC2530 支持 IEEE802.15.4 以及 Zigbee、Zigbee PRO 和 Zigbee RF4CE 标准,且提供了 101 dB 的链路质量指示,具有优秀的接收器灵敏度和强抗干扰性。CC2531 除了具有 CC2530 强大的性能和功能外,还提供了全速的 USB2.0 兼容操作,支持 5 个终端。

CC2530/CC2531 片上系统家族包括四个不同产品: CC2530-F32、CC2530-F64、CC2530-F128 和 CC2530-F256。和 CC243X 系列一样, 它们的区别在于内置闪存的容量不同, 以及针对不同 IEEE802.15.4/Zigbee 应用做了不同的成本优化。

CC253X 系列芯片大致由三部分组成: CPU 和内存相关模块, 外设、时钟和电源管理相关模块, 无线电相关模块。

1) CPU 和内存

CC253X 系列使用的 8051CPU 内核是一个单周期的 8051 兼容内核。它有三个不同的存储器访问总线(SFR、DATA 和 CODE/XDATA), 以单周期访问 SFR、DATA 和 SRAM。它还包括一个调试接口和一个中断控制器。

内存仲裁器位于系统中心, 因为它通过 SFR 总线, 把 CPU 和 DMA 的控制器和物理存储器与所有外设连接在一起。内存仲裁器有四个存取访问点, 每次访问每一个可以映射到这三个物理存储器之一: 8 KB 的 SRAM、闪存存储器和一个 XREG/SFR 寄存器。它负责执行仲裁, 并确定同时到同一个物理存储器的内存访问的顺序。

8 KB SRAM 映射到 DATA 存储空间和 XDATA 存储空间的某一部分。8 KB 的 SRAM 是一个超低功耗的 SRAM, 当数字部分掉电时能够保留自己的内容, 这对于低功耗应用是一个很重要的功能。

32/64/128/256 KB 闪存块为设备提供了可编程的非易失性程序存储器, 映射到 CODE 和 XDATA 存储空间。除了保存代码和常量, 非易失性程序存储器允许应用程序保存必须保留的数据, 这样在设备重新启动之后可以使用这些数据。

中断控制器提供了 18 个中断源, 分为六个中断组, 每组与四个中断优先级相关。当设备从空闲模式回到活动模式, 也会发出一个中断服务请求。一些中断还可以从睡眠模式唤醒设备。

2) 时钟和电源管理

CC253X 芯片内置一个 16 MHz 的 RC 振荡器, 外部可连接 32 MHz 外部晶振。数字内核和外设由一个 1.8 V 低差稳压器供电。另外 CC253X 包括一个电源管理功能, 可以实现使用不同的供电模式, 用于延长电池的寿命, 有利于低功耗运行。

3) 外设

CC253X 系列芯片有许多不同的外设, 允许应用程序设计者开发先进的应用。这些外设包括调试接口、I/O 控制器、两个 8 位定时器、一个 16 位定时器和一个 MAC 定时器、ADC 和 AES 协处理器、看门狗电路、两个串口和 USB(仅限于 CC2531)。

4) 无线设备

CC253X 设备系列提供了一个与 IEEE802.15.4 兼容的无线收发器, 在 CC253X 内部主要由 RF 内核组成。RF 内核提供了 MCU 和无线设备之间的一个接口, 可以发出命令、读取状态、自动操作和确定无线设备的顺序。无线设备还包括一个数据包过滤和地址识别模块。

1.1.5 常见的 Zigbee 协议栈

常见的 Zigbee 协议栈分为三种: 非开源的协议栈、半开源的协议栈和开源的协议栈。

1. 非开源的协议栈

常见的非开源的 Zigbee 协议栈的解决方案包括 Freescale 解决方案和 Microchip 解决方案。

Freescale 公司最简单的 Zigbee 解决方案就是 SMAC 协议，是面向简单的点对点应用，不涉及网络概念。Freescale 公司完整的 Zigbee 协议栈为 BeeStack 协议栈，也是目前最复杂的协议栈，看不到具体的代码，只提供的一些封装好的函数供直接调用。

Microchip 公司提供的 Zigbee 协议为 Zigbee® PRO 和 Zigbee® RF4CE，均是完整的 Zigbee 协议栈，但是收费偏高。

2. 半开源的协议栈

TI 公司开发的 Zstack 协议栈是一个半开源的 Zigbee 协议栈，是一款免费的 Zigbee 协议栈，它支持 Zigbee 和 ZigbeePRO，并向后兼容 Zigbee2006 和 Zigbee2004。Zstack 内嵌了 OSAL 操作系统，使用标准的 C 语言代码和 IAR 开发平台，比较易于学习，是一款适合工业级应用的 Zigbee 协议栈。

3. 开源的协议栈

Freakz 是一个彻底开源的 Zigbee 协议栈，它的运行需要配合 Contikj 操作系统，类似于(Zstack + OSAL)。Contikj 的代码全部用 C 语言编写，对于初学者来说比较容易上手。Freakz 适合用于学习，对于工业应用来讲 Zstack 比较实用。

1.2 Zigbee 软件开发平台

本书选用的 Zigbee 协议栈是 TI 公司开发的 Zstack 协议栈，所需要的软件开发平台有 IAR 软件集成开发平台、Zigbee 嗅探器(Zigbee Sniffer)、物理地址修改软件(SmartRF Flash Programmer)以及其他的辅助软件。

1.2.1 IAR 软件开发平台

IAR Embedded Workbench(简称 IAR 或 EW)的 C/C++ 交叉编译器和调试器是完整且容易使用的嵌入式应用开发工具，对不同的处理器提供不同的版本(例如 IAR For 51, For ARM, For AVR 等)，且提供一样的直观用户界面。IAR 包括嵌入式 C/C++ 优化编译器、汇编器、连接定位器、库管理员、编译器、项目管理和 C-SPY 调试器。使用 IAR 的编译器可以节省硬件资源，最大限度地降低产品成本，提高产品竞争力。

IAR 产品特征包括以下几个方面：

- ✧ 完全标准的 C 兼容。
- ✧ 目标特性扩充。
- ✧ 版本控制和扩展工具支持良好。
- ✧ 内建对应芯片的程序速度和大小优化器。
- ✧ 便捷的中断处理和模拟。
- ✧ 高效浮点支持。