

嵌入式系统译丛

ZigBee无线网络与收发器

ZigBee Wireless Networks and Transceivers

[美] Shahin Farahani 著
沈建华 王维华 阔鑫 译



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

嵌入式系统译丛

ZigBee 无线网络与收发器

ZigBee Wireless Networks and Transceivers

[美] Shahin Farahani 著

沈建华 王维华 阔鑫 译

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书内容涵盖了采用 ZigBee 和 IEEE 802.15.4 两种标准的近距离无线网络的基本原理,ZigBee 和 IEEE 802.15.4 标准涵盖了相同的细节层次(LOD)。除了技术细节,该书还包含了上层概述,对那些仅对 ZigBee 无线组网一般概念感兴趣的读者非常有益。本书提供 ZigBee 无线网络的大框架,从射频和物理层考虑到应用层的细节。

本书可供想了解近距离无线网络 ZigBee 原理与应用的工程师和技术管理人员们参考。

图书在版编目(CIP)数据

ZigBee 无线网络与收发器 / (美) 法拉哈尼著 ; 沈建华, 王维华, 阔鑫译. -- 北京 : 北京航空航天大学出版社, 2013. 8

书名原文: ZigBee wireless networks and transceivers

ISBN 978 - 7 - 5124 - 1053 - 4

I. ①Z… II. ①法… ②沈… ③王… ④阔… III. ①无线网
②无线电通信—通信系统 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 019877 号

版权所有,侵权必究。

ZigBee 无线网络与收发器

ZigBee Wireless Networks and Transceivers

[美] Shahin Farahani 著

沈建华 王维华 阔鑫 译

责任编辑 成艳亭 张楠

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@gmail.com 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:16.5 字数:332 千字

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 1053 - 4 定价:45.00 元

版 权 声 明

北京市版权局著作权登记号:图字:01-2008-3391

Zigbee Wireless Networks and Transceivers

Shahin Farahani

ISBN-13: 978-0-7506-8393-7

Copyright © 2008 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-981-272-180-8

Copyright © 2013 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

3 Killiney Road

#08-01 Winsland House I

Singapore 239519

Tel: (65) 6349-0200

Fax: (65) 6733-1817

First Published 2012

2013年初版

Printed in China by Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. . This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由北京航空航天大学出版社与 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 在中国大陆境内合作出版。本版仅限在中国境内(不包括香港和澳门特别行政区及台湾)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

序

ZigBee 无线技术是一种面向低成本、低数据速率、具备延长电池寿命的近距离无线组网的全球标准。ZigBee 联盟是一个基于开放式全球标准,共同致力于性能可靠、性价比高、低功耗、无线组网监控和控制产品的开发的公司协会。该规范文件由 ZigBee 联盟发布,IEEE 802.15 无线个人局域网(WPAN)工作组则为基于 ZigBee 和 IEEE 802.15.4 无线网络技术的官方代表。但是,这些冗长的文件对于具有时间限制或更专业技术背景的人们来说,他们可能更趋向于关注产品本身。因此,有必要提供一种综合的资源,使它不仅包含深度的技术信息,而且总结了 ZigBee 无线网络基本论点。本书由沙欣·法拉哈尼(Shahin Farahani)博士采用一个简明的 ZigBee 技术教程来讲述以满足上述需求。

本书展现了一个完整的 ZigBee 无线网络框架,从对射频和物理层(PHY)的考量上升到应用层开发,归纳完善、内容简单易懂、协议覆盖均衡。此外,本书的第 3 章包含常用 IEEE 802.15.4 和 ZigBee 表格和帧格式,可以作为这些协议的一个快速参考。

本书定位为 IEEE 802.15.4、ZigBee 标准以及它们的应用介绍的参考书目,与之同样重要的是,该书的内容对于任何大小的 ZigBee 无线网络的实现的技术要点有深刻到位的阐释。例如,“智能 RFID”空间技术一项很有价值的潜力之一是可用于估算物体或人员位置。本书的第 7 章很好地介绍了能用于位置估算的各种方法以及每种方法的客观约束。

本书配套了一个网站,它包含了非常有价值的计算器,用于在各种实际应用场景下的距离估算和电池寿命分析。

作为一位具有多年工作经验的 ZigBee 系统工程师,法拉哈尼博士在 ZigBee 和 IEEE 802.15.4 无线组网方面有深厚的造诣,其深厚的技术功底和通信技术积累均总结于本书,它是一本涉及近距离、低数据速率无线网络技术的工程师必读书。

本书适用于工业领域中从无线系统设计师到中间件工程师和终端产品 OEM 开发人员等具有不同技术背景的读者,大部分的内容在一定程度上可视为无线传感器网络或近距离、低数据速率无线网络学术课程。

简而言之,我把本书推荐给系统设计师、技术管理人员、无线工程师以及有

兴趣对低功耗、低数据速率无线网络 ZigBee 原理和应用进行全面深刻理解研究人员。

Robert F. Heile 博士

IEEE 802.15 主席

ZigBee 联盟主席

前 言

本书采用教程的方法写作,目的是吸引广泛的读者。本书内容涵盖了采用 ZigBee 和 IEEE 802.15.4 两种标准的近距离无线网络的基本原理,ZigBee 和 IEEE 802.15.4 标准涵盖了相同的细节层次(LOD)。除了技术细节,该书包含了上层概述,对于那些仅对 ZigBee 无线组网一般概念感兴趣的读者非常有益。本书提供 ZigBee 无线网络的大框架,从射频和物理层考虑到应用层的细节。考虑到该书的多学科性质,同时也提供了必需的背景资料。

期待本书能为那些想了解近距离无线网络 ZigBee 的原理与应用的工程师们和技术管理人员们提供有用的参考。读者只要具备一些基本的电气工程和无线组网知识就能轻松掌握本书大部分内容。本书图文并茂,包含了 200 个图片和表格,适用于工业领域的个人独立自学,也可以用于近距离、低数据率无线传感器网络专业课程的教学。

内容提要

第 1 章介绍了采用 ZigBee 和 IEEE802.15.4 标准的近距离无线网络技术,本章概述的许多论题将在后续章节中进行详细讨论。本章首先描述 ZigBee 标准及与其他现有近距离无线网络标准的不同之处,然后对 ZigBee 和 IEEE 802.15.4 标准的基本原理进行了评述。

第 2 章很简短,提供了一些 ZigBee 无线组网的应用例子,包括家庭自动化、消费类电子、医疗保健等。

第 3 章详细描述了包括安全特性在内的 IEEE 802.15.4 和 ZigBee 标准的协议层,作为 IEEE 802.15.4 和 ZigBee 标准文档的摘要。本章提供了 ZigBee 标准的 2007 版的相关信息。附录 D 总结了 ZigBee - Pro(2007)和 ZigBee - 2006 的一些不同之处。如果第 3 章所描述的该层次细节超出了您的兴趣或背景,只要读完第 1 章后即可跳过本章继续阅读第 4 章。

第 4 章提供了基于 IEEE 802.15.4 标准开发的收发器基本资料,一个与 IEEE 802.15.4 标准兼容的收发器必须符合该标准的指定要求。本章有助于理解这些具体要求,并比较和对照各款收发器的特性。在无线传感器网络中,传感器输出模拟信号,必须转换成数字信号,本章也概述了基本的模拟-数字转换器

(ADC)以及它们的性能指标。

第5章研究了环境对 ZigBee 无线网络的影响。在现实中,无线网络的性能会受到环境的影响。本章提供了一些可以用来减轻由于环境因素引起的性能下降的技术,还介绍了距离估算及距离改善的方法。天线能根据每个应用场景专门设计,且可能极大地影响无线节点的性能。本章也介绍了天线的基本属性和一些用于近距离无线网络的基本天线形状,同时也阐明了北美、欧洲和日本的法规要求。

一个电池供电的 ZigBee 无线网络节点可在电池必须替换之前持续工作数年。电池寿命的预期取决于应用场景,第6章提供了一个简单的计算方法来评估电池寿命。电池寿命不但取决于每个节点的硬件性能,而且取决于网络的运行效率。本章将对硬件层次和网络层次电池寿命扩展方法进行讨论。

近距离无线组网的其中一种应用为估算移动物体位置,第7章提供了一些采用 ZigBee 网络进行位置估算的方法。与全球定位系统(GPS)不同的是,近距离位置估算方法仅依赖于邻近的其他节点汇集的局域信息来估算运动物体的位置。

ZigBee 网络工作于免授权频段,与许多其他的无线网络共享频段,比如用于无线互联网访问的 WiFi™。第8章介绍了共存机制和 IEEE 802.15.4 无线组网用来提高网络的鲁棒性的一些方法。第9章介绍了一些其他可选的近距离无线网络标准,包括 IEEE802.15.4 IPv6 超和 WirelessHART 两种。

本书包含5个附录。附录D提供了 ZigBee-Pro/2007 和 ZigBee-2006 之间的差异之处;附录E以教程方式阐述了在收发器中的构建模块,但它并不是学习第4章的先决条件。

补充

本书附带一个专门的网站(www.LearnZigBee.com)而未附送光盘。近距离无线组网的应用在不断发展而相关的标准和法规也可能随着时间发生变更。即使本书出版后,读者也可以登录该网站了解最新的信息或者通过网站发布问题或评论。网站内容包括(但不仅限于):

- 一个简单的用于距离和电池寿命分析的电子表格(计算器);
- 有用的工具集和其它资料的链接;
- 标准文件的链接,包括 IEEE 802.15.4 和 ZigBee 标准的最新版本;
- 法规要求文件的链接,包括 FCC 和 ETSI 认证;
- 相关规格书的链接(如 IEEE802.15.4 收发器等);
- 近距离无线网络的其他参考。

前面我们提到的简易电子表格(计算器)基于本书讨论的资料创建。举例说明,如果外部功率放大器(PA)添加到一个节点,你可以使用本电子表格来计算

该节点的预期电池寿命或当节点应用外部功率放大器(PA)时所扩大范围进行估算。虽然网站上的电子表格简单易懂,不需另外说明,相关文件也发布在网站上,用于解释计算器并给出一些实例。

鸣 谢

我要感谢达里乌什·凯瓦尼(Darioush Keyvani)、菲尔·比彻(Phil Beecher)和路易斯·伊·费伦泽尔(Louis E. Frenzel)博士为本书提供了详细的评审。本书的内容是基于过去数年我作为飞思卡尔半导体公司 ZigBee 系统架构师一点一点积累起来的工作经验,它来源于一个才华横溢、知识渊博和多样化的团队。因此,我要感谢一直给予我支持和帮助的飞思卡尔公司同事们,尤其是克林顿·鲍威尔(Clinton Powell)、布雷特·布莱克(Brett Black)、乔恩·亚当斯(Jon Adams)和 张国鑫(Kuor-Hsin Chang)。

特别感谢我的妻子娜扎宁·达芭尼(Nazanin Darbanian),不但为我提供了有价值的技术反馈,而且在本书的写作过程中给予我耐心和支持。我还要感谢爱思唯尔(Elsevier)科学的工作人员,尤其是哈利·赫尔姆斯(Harry Helms)、梅林达·里奇(Melinda Ritchie)、雷切尔·鲁米里奥蒂斯(Rachel Roumeliotis)和希瑟·舍雷尔(Heather Scherer)在此一并感谢他们的支持。

目 录

第 1 章 ZigBee 基础	1
1.1 什么是 ZigBee?	1
1.2 ZigBee VS 蓝牙和 IEEE 802.11	2
1.3 短距离无线网络分类	3
1.4 ZigBee 与 IEEE 802.15.4 标准的关系	3
1.5 操作频率和数据速率	5
1.6 互操作性	6
1.7 设备类型	7
1.8 设备角色	7
1.9 ZigBee 网络拓扑	7
1.10 ZigBee 和 IEEE 802.15.4 的通信基础	9
1.10.1 CSMA-CA 载波侦听多路访问-冲突避免	9
1.10.2 信标(Beacon)VS 非信标(Nonbeacon)网络	10
1.10.3 数据传输方式	10
1.10.4 数据验证	12
1.10.5 寻址方式	12
1.11 关联和解除关联	12
1.12 绑 定	13
1.13 ZigBee 的自形成和自愈特性	13
1.14 ZigBee 和 IEEE 802.15.4 网络层功能	13
1.14.1 PHY 层	13
1.14.2 MAC 层	14
1.14.3 网络层	16
1.14.4 APL 层	17
1.14.5 安全性	17
1.15 ZigBee 网关	18
1.16 ZigBee 比喻	18

参考文献	18
第 2 章 ZigBee/IEEE 802.15.4 网络范例	20
2.1 智能家居	20
2.1.1 安全系统	21
2.1.2 抄表系统	21
2.1.3 灌溉系统	21
2.1.4 灯控系统	21
2.1.5 多区域 HVAC 系统	22
2.2 消费类电子:远程控制	23
2.3 工业自动化	23
2.3.1 资产管理和人员跟踪	23
2.3.2 牲畜跟踪	24
2.4 医疗	24
2.5 其他应用	25
2.5.1 酒店客房访问	25
2.5.2 灭火器	25
参考文献	26
第 3 章 ZigBee 和 IEEE 802.15.4 协议层	27
3.1 ZigBee 和 IEEE 802.15.4 网络层	27
3.2 IEEE 802.15.4 PHY 说明	28
3.2.1 信道分配	28
3.2.2 能量检测	29
3.2.3 载波检测	29
3.2.4 链路质量指标	30
3.2.5 空闲信道评估	30
3.2.6 PHY 常量和属性	30
3.2.7 PHY 服务	31
3.2.8 服务原语	34
3.2.9 PHY 数据包格式	35
3.2.10 PHY 层功能总结	37
3.3 IEEE 802.15.4 MAC 层	37
3.3.1 信标操作和超帧结构	38
3.3.2 帧间间隔	40
3.3.3 CSMA-CA	41

3.3.4	MAC 服务	44
3.3.5	MAC 帧格式	54
3.3.6	MAC 混合操作模式	60
3.3.7	MAC 层任务总结	61
3.4	ZigBee 网络层	61
3.4.1	广 播	63
3.4.2	多 播	64
3.4.3	多对一通信	66
3.4.4	分层(树)拓扑	66
3.4.5	网状拓扑	69
3.4.6	路 由	69
3.4.7	路由发现	72
3.4.8	路由维护和修复	74
3.4.9	网络层数据服务	75
3.4.10	网络层管理服务	75
3.4.11	网络层帧格式	79
3.4.12	网络层功能总结	83
3.5	应用层	84
3.5.1	应用框架(AF)	85
3.5.2	ZigBee 设备对象(ZDO)	89
3.5.3	APS 子层	91
3.5.4	APL 层职能总结	93
3.6	安全服务	93
3.6.1	加密(Encryption)	93
3.6.2	认 证	96
3.6.3	附属帧头部格式	98
3.6.4	APS 子层安全命令	100
3.6.5	安全攻击示例	101
3.6.6	安全服务总结	102
	参考文献	102
第 4 章	收发器要求	104
4.1	典型的 IEEE 802.15.4 收发器基本结构	104
4.2	接收器灵敏度	105
4.3	相邻及相间信道抗干扰测试	106
4.4	2.4 GHz 运行模式下的调制和扩频方式	108

4.5	868/915 MHz 运行模式下的调制和扩频方式	114
4.6	发射器输出功率	118
4.6.1	PSD 限制	118
4.6.2	发射功率调整	119
4.7	误差矢量振幅	119
4.8	符号计时	120
4.9	频率偏移容差	120
4.10	周转时间	121
4.11	晶振选择要素	121
4.11.1	安全系数	123
4.11.2	激励功率	124
4.11.3	串联谐振晶体 VS 并联谐振晶体	124
4.11.4	晶体的频公差	124
4.11.5	晶体的老化	124
4.11.6	晶体的牵引度	125
4.11.7	晶体的泛频	125
4.12	模数转换器	125
	参考文献	129
第 5 章	RF 传播, 天线及法规要求	130
5.1	路径损耗	130
5.2	信号波长	132
5.3	信号穿透	132
5.4	反射, 散射和衍射	134
5.5	多路径环境	135
5.5.1	多路径引起的附加随机相位	136
5.5.2	多路径失效	136
5.5.3	衰落信道和衰落极限	137
5.5.4	频道对多路径性能的影响	137
5.5.5	信号扩展对多路径性能的影响	137
5.5.6	建立网状网络以提高多路径性能	138
5.6	多普勒频移	138
5.7	现场勘测	139
5.8	距离判定	140
5.9	天线选择要素	143
5.9.1	天线增益	143

5.9.2	天线辐射方向图	144
5.9.3	天线辐射效率	145
5.9.4	天线阻抗	145
5.9.5	功率转化效率	146
5.9.6	天线调节	147
5.9.7	天线极化	147
5.9.8	天线选择	148
5.10	法规要求	152
5.10.1	FCC 法规概览	153
5.10.2	FCC 合格认证	154
5.10.3	欧洲法规概览	154
5.10.4	CE 统一标记	155
5.10.5	日本法规概览	155
5.10.6	日本的统一性认证系统	156
	参考文献	156
第 6 章	电池寿命分析	158
6.1	电池放电特性	158
6.2	简单的电池寿命计算方法	159
6.3	电池监测	160
6.4	降低功耗的方法	161
6.4.1	硬件层次因素	161
6.4.2	网络运行效率	163
6.4.3	能效路由	164
6.5	降压变换器	169
	参考文献	170
第 7 章	位置判定方法	171
7.1	简介	171
7.2	基于接收信号强度的定位算法	174
7.2.1	使用三边测量法的 RSSI 型位置判定	174
7.2.2	RSSI 型位置判定中的误差来源	176
7.2.3	基于位置指纹识别的位置判定	178
7.2.4	协作式位置判定	182
7.3	抵达角度型算法	183
7.4	时间型算法 (ToA 和 TDoA)	184

7.5	计算复杂度	185
	参考文献	186
第 8 章	ZigBee 共存	187
8.1	简介	187
8.2	ZigBee 非协作式共存机制	189
8.2.1	CSMA/CA 信道评估	189
8.2.2	极低占空比	189
8.2.3	信号扩频	189
8.2.4	动态 RF 输出功率选择	190
8.2.5	网状网络和位置感知路由	190
8.2.6	相邻和相间信道性能	190
8.2.7	频道选择	190
8.2.8	适当数据包长度选择	191
8.3	与 IEEE 802.11b/g 共存	191
8.4	与蓝牙共存	193
8.5	与微波炉共存	194
8.6	与无线电话共存	195
	参考文献	195
第 9 章	相关技术	197
9.1	IEEE 802.15.4 上的 IPv6(6LoWPAN)	197
9.2	WirelessHART	199
9.3	Z-wave	200
9.4	超低功率蓝牙(Wibree)	201
9.5	TinyOS	202
	参考文献	202
附录 A	PSSS 代码表	203
附录 B	ZigBee 设备配置文件(profile)服务	205
附录 C	DSSS Symbol-to-Chip 映射表	212
附录 D	ZigBee-Pro/2007	213
附录 E	收发器基本结构	217
附录 F	缩写词和术语	243

第 1 章

ZigBee 基础

本章主要介绍了短距离无线网络通信的 ZigBee 标准,概述了 ZigBee 的基本特性,包括它的网络拓扑、信道访问机制和每个协议层所扮演的角色。

1.1 什么是 ZigBee?

ZigBee 标准是为低数据速率、短距离无线网络通信定义的一系列通信协议。基于 ZigBee 的无线设备工作在 868 MHz、915 MHz 和 2.4 GHz 频段,最大数据速率是 250 kbps。ZigBee 技术主要针对子电池供电的应用,这些应用对低数据速率、低成本、更长时间的电池寿命有较高的需求。在一些 ZigBee 应用中,无线设备持续处于活动状态的时间是有限的,大部分时间无线设备都处于省电模式(也称休眠模式)。因此,ZigBee 设备在电池需要更换以前能够工作数年以上。

ZigBee 的一个典型应用就是室内病人监护。例如,一个病人的血压、心率可以通过穿戴的设备测量出来,病人佩戴与传感器通信的 ZigBee 设备,传感器负责周期性地收集血压等相关的信息,然后这些数据通过无线传送到本地服务器,如病人家中的计算机,计算机再对这些数据进行初始分析,最后将重要的信息通过互联网发送到病人的护士或者内科医生那里做进一步的分析。

另一个 ZigBee 的应用例子就是大型楼宇结构安全的监测。在此应用中,一个建筑内可以安装数个 ZigBee 无线传感器(如加速度计),所有传感器形成一个无线网络来收集信息,这些收集来的信息可以用于评估建筑的结构安全和潜在的损坏征兆,例如,地震后一个建筑在重新开放前可能需要进行检测,而传感器收集到的数据有助于加快检测速度和减少检测费用。在第 2 章中还提供了一些其他 ZigBee 应用的例子。

ZigBee 标准是由 ZigBee 联盟所开发的,该联盟有数百个成员公司,从半导体产业和软件开发者到原始设备生产商、系统集成商。ZigBee 联盟是 2002 年创立的一个非盈利性组织,对每一个想加入的成员都开放。ZigBee 标准采用 IEEE 802.15.4 标准作为其 PHY 层和 MAC 层协议。因此,遵循 ZigBee 的设备也同样遵循 IEEE 802.15.4 标准。

在家庭和工厂内使用无线通信来收集信息或执行控制任务的概念对人们来说并不陌生。第 9 章中回顾了儿种短距离无线网络通信的标准,包括 IEEE 802.11 无线局域网(Wireless Local Area Network WLAN)和蓝牙(Bluetooth)。每个标准都有其特定领域应用的优势,而 ZigBee 则主要是为低成本、低数据速率、超低功耗的无线网络应用开发的。

通过简化通信协议和降低数据速率,ZigBee 标准有助于降低应用成本。和其他的标准,如 IEEE 802.11 相比,满足 ZigBee 和 IEEE 802.15.4 标准的最低需求相对简单,这同时也降低了 ZigBee 收发器的复杂度和成本。

占空比是指设备工作时的时间与总时间的比值。例如,一个设备每分钟唤醒一次,每次唤醒工作 60 ms 后继续休眠,那么它的占空比为 0.001 或 0.1%。在许多 ZigBee 应用中,为了保证电池能工作数年以上,设备的占空比都在 1% 以下。

1.2 ZigBee VS 蓝牙和 IEEE 802.11

将 ZigBee 标准与蓝牙和 IEEE802.11WLAN 进行比较有助于我们理解 ZigBee 与现有一些标准的区别(第 9 章将进行更深入的比较)。图 1.1 总结了这几个标准的一些基本特性。

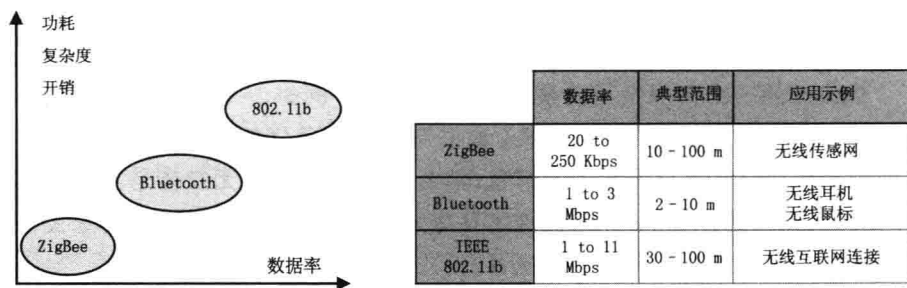


图 1.1 ZigBee 标准与蓝牙、IEEE 802.11b 的比较

IEEE 802.11 是一个标准体系,选择 IEEE 802.11b 是因为它工作在免授权的 2.4 GHz 频段,与蓝牙和 ZigBee 相同。IEEE 802.11b 具有高数据速率(高达 11 Mbps),典型应用就是提供无线互联网连接。IEEE 802.11b 的室内典型工作范围是 30~100 m。相对而言,蓝牙的数据速率较低(低于 3 Mbps),典型室内工作距离是 2~10 m。蓝牙的一个比较流行的应用是无线头戴式耳机,它提供了一种在移动电话和耳机之间的通信方式。在这 3 种标准中,ZigBee 具有最低的数据速率和复杂度,但提供了最长的电池寿命。

ZigBee 的超低数据速率意味着它不是无线互联网连接或者 CD 音质无线耳机的最好选择,因为这需要 1 Mbps 以上的数据速率。然而,如果无线通信的目