



国际信息工程先进技术译丛

短距离无线系统的 可靠通信

**Reliable Communications for
Short-range Wireless Systems**

(土耳其) Ismail Guvenc

(土耳其) Sinan Gezici

(美国) Zafer Sahinoglu

(土耳其) Ulas C. Kozat

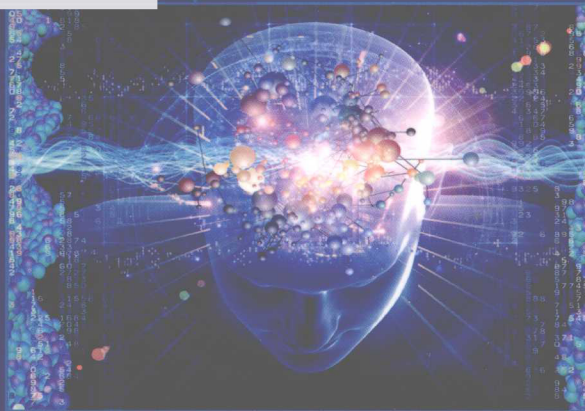
编著

熊磊 姚冬苹 钟章队

译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际信息工程先进技术译丛

短距离无线系统的可靠通信

(土耳其) Ismail Guvenc

(土耳其) Sinan Gezici

(美国) Zafer Sahinoglu 编著

(土耳其) Ulas C.Kozat

熊磊 姚冬苹 钟章队 译



机械工业出版社

保证通信的可靠性,满足服务质量的严格要求,是短距离无线通信系统中的重要问题。短距离无线通信系统中的关键特性(包括数据速率、通信距离、信道特性、网络拓扑和功率效率等)与长距离无线通信系统有所不同。本书将短距离无线通信系统分为高数据速率系统和低数据速率系统,考虑了协议栈不同层中影响可靠性的各种主要因素,详细介绍了改善短距离无线通信系统容量和性能的最佳方法,特别强调了可靠的信道估计、卓越的干扰抑制和协作通信等可靠性增强技术。本书还详细介绍了相关的国际标准,包括 UWB、ZigBee 和 60GHz 通信等。本书均衡考虑了短距离无线通信的理论和实践。本书重点关注可靠性,是从事无线通信研究人员和工程技术人员理想参考书。

CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS

Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town.

Singapore, São Paulo, Delhi, Tokyo, Mexico City

Reliable Communications for Short-range Wireless Systems

© Cambridge University Press 2011

本书版权登记号 01-2012-6413

图书在版编目(CIP)数据

短距离无线系统的可靠通信 / (土耳其) 古文茨(Guvenc, I.)等编著; 熊磊, 姚冬苹, 钟章队译. —北京: 机械工业出版社, 2013.6

书名原文: Reliable Communications for Short-range Wireless Systems

ISBN 978-7-111-42405-5

I. ①短… II. ①古… ②熊… ③姚… ④钟… III. ①短距离—无线电通信 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 092565 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 李馨馨

责任印制: 杨 曦

北京云浩印刷有限责任公司印刷

2013 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm×239mm·24.5 印张·491 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-42405-5

定价: 89.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面防伪标均为盗版

译者序

短距离无线通信,如蓝牙、RFID、超宽带(UWB)、ZigBee、60 GHz通信等,近年在物流、交通运输、医疗卫生、电子商务、安全保卫、环境监测等领域得到了广泛的应用。无线世界研究论坛(Wireless World Research Forum, WWRF)预测到2017年世界范围内将有7万亿个无线设备,其中大多数都将是短距离无线通信设备。短距离无线通信已经成为当前通信发展最为迅速的领域,已经广泛地渗透到国民经济和人民生活的各个方面。

本书英文原版的编著者荟萃了无线通信研究与工业界的多位著名学者和专家,包括IEEE Fellow美国哥伦比亚大学的Xiaodong Wang教授,他曾荣获2011年IEEE通信新技术最出色论文奖;IET Fellow美国南加州大学的Andreas F.Molisch教授,他是无线信道领域的新一代领军人物;Docomo公司美国实验室的资深工程师Ismail Guvenc,他是IEEE 802.15和IEEE 802.16标准的制定者之一,拥有4项美国专利。

本书围绕可靠通信这一短距离无线通信技术的重要研究目标,分别从物理层、MAC层和网络层探讨提高传输可靠性的主要技术,包括信道估计、自适应调制编码、MIMO、干扰消除和协作中继等。本书还介绍了短距离无线通信的标准化进展,如IEEE 802.15.4(低速无线个域网标准)、IEEE 802.15.5(Mesh网标准)、ECMA 368/369(UWB标准)、ECMA 387(60 GHz通信标准)等。

本书重点强调技术的原理和概念,深入浅出地介绍了短距离无线通信技术的发展和应用。本书既可用于高等学校通信、电子、信息等专业的本科生和研究生相关课程的教科书,也可供工程技术人员参考。

本书由熊磊、姚冬革和钟章队翻译,熊磊对译稿进行了审校。参与本书翻译和校对工作的还有刘鸿鹏、王悦、高元媛、赵勇、张环、杨美荣、李丞、廖佳纯、张北、张静文、冯薇、牟霄寒等。本书得以翻译问世,是集体智慧的结晶。在此对所有为本书出版提供过帮助的人士表示衷心的感谢。本书的翻译得到了轨道交通控制与安全国家重点实验室(北京交通大学)自主课题(RCS2011ZZ002)的资助,借此机会表示感谢。

短距离无线通信技术本身也在快速发展中,很多专业词汇没有规范的译名,再加上译者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

译者

2013年3月

于轨道交通控制与安全国家重点实验室(北京交通大学)

目 录

译者序

第 1 章 短距离无线通信与可靠性	1
1.1 短距离无线通信	2
1.1.1 有利因素	2
1.1.2 短距离与中/长距离无线通信技术比较	3
1.1.3 高速与低速系统比较	4
1.1.4 频率监管与可用频段综述	5
1.2 可靠性的定义	7
1.2.1 物理层可靠性	7
1.2.2 MAC 层可靠性	11
1.2.3 路由层可靠性	11
1.3 相关无线标准概述	13
1.3.1 蓝牙	15
1.3.2 IEEE 802.15.5 (mesh 网)	16
1.3.3 IEEE 802.15 TG6 (体域网)	19
1.3.4 IEEE 802.15 TG7 (可见光通信)	20
1.3.5 ISA SP100.11a (过程控制与监测)	21
参考文献	22

第一部分 高速系统

第 2 章 高速 UWB 和 60GHz 通信	27
2.1 综述和应用场景	27
2.2 ECMA-368——高速 UWB 标准	30
2.2.1 发射机结构	32
2.2.2 信号模型	33
2.2.3 系统参数	35
2.3 ECMA-387——毫米波无线通信技术标准	36
2.3.1 发射机结构	38
2.3.2 信号模型	43
2.3.3 系统参数	45
2.4 IEEE 802.15.3c——MMW 无线电标准	49

2.4.1	SC-PHY	50
2.4.2	HSI-PHY	52
2.4.3	音频/视频 PHY	53
	参考文献	54
第 3 章	高速短距离无线通信系统中的信道估计	57
3.1	高速系统信道模型	57
3.1.1	大尺度传播的影响	58
3.1.2	小尺度传播的影响	59
3.1.3	离散时间模型	63
3.2	信道估计算法概述	64
3.2.1	信道频域响应估计的信号模型	66
3.2.2	LS 信道频率响应估计	69
3.2.3	LMMSE 信道频率响应估计	70
3.2.4	ML 信道频率响应估计	72
3.2.5	多级信道频率响应估计	74
3.2.6	复杂度比较	78
3.3	信道估计误差对性能的影响	79
3.3.1	平均未编码 SER	80
3.3.2	FER 性能	82
	参考文献	83
第 4 章	高速短距离无线通信系统中的自适应编码调制	87
4.1	自适应编码调制	88
4.2	MB-OFDM 系统中的 AMC	89
4.3	ECMA-368 中的 WPAN 链路结构	91
4.3.1	超帧结构和 DRP	91
4.3.2	块确认机制	91
4.4	阴影效应下的分组级 UWB 信道模型	92
4.4.1	UWB 信道中的身体遮蔽效应	92
4.4.2	信道模型中的信道状态定义	94
4.4.3	信道状态转移	95
4.5	WPAN 链路性能分析	96
4.5.1	系统模型	96
4.5.2	马尔科夫过程分析	96
4.5.3	丢包率和吞吐量	99
4.6	仿真结果	100

4.7	60GHz 毫米波无线电系统中的 AMC	102
4.7.1	ECMA-387 中的 AMC 机制	102
4.7.2	ECMA-387 中的 MAC 协议	103
4.8	结论	103
	参考文献	104
第 5 章	高速通信中的 MIMO 技术	106
5.1	MIMO 系统的原理	106
5.2	UWB 系统中的 MIMO 技术	108
5.2.1	信道模型	108
5.2.2	空间相关性	109
5.2.3	信道容量	110
5.2.4	多径的作用	112
5.2.5	时间反转预滤波	112
5.2.6	小结	115
5.3	60GHz 系统中的 MIMO 技术	115
5.3.1	MIMO 信道模型	116
5.3.2	空间相关性	116
5.3.3	波束赋形	118
5.3.4	接收机性能	121
5.3.5	小结	124
5.4	结论	125
	参考文献	125

第二部分 低速系统

第 6 章	ZigBee 网络和低速超宽带通信	130
6.1	概述和应用实例	130
6.2	ZigBee	132
6.2.1	ZigBee 和 IEEE 802.15.4 的信道分配	133
6.2.2	ZigBee 和 IEEE 802.15.4 的数据传输方式	134
6.2.3	干扰消除的网络信道管理	138
6.3	脉冲无线电超宽带 (IEEE 802.15.4a)	140
6.3.1	信道分配	140
6.3.2	发射机结构和信号模型	142
6.3.3	框架结构和系统参数	145
6.3.4	测距和位置感知	146

6.4 无线个域网的低时延 MAC 层 (IEEE 802.15.4e)	148
6.4.1 EGTS	148
6.4.2 LLP	150
6.4.3 TSCH	151
6.5 IEEE 802.15.4f (有源 RFID)	152
6.6 IEEE 802.15.4g (智能电网)	153
参考文献	154
第 7 章 信道估计对可靠性的影响	158
7.1 引言	158
7.2 存在信道估计误差的信号和信道模型	159
7.2.1 信号和信道模型	159
7.2.2 信道参数估计误差	161
7.3 存在信道估计误差的系统可靠性	163
7.3.1 SNR 分析	163
7.3.2 BER 分析	165
7.4 信道估计存在误差的情况下的系统优化	169
7.4.1 导频符号的功率分配	169
7.4.2 信号带宽	171
7.4.3 RAKE 接收机设计	173
7.5 结论	175
参考文献	175
第 8 章 干扰抑制与检测	179
8.1 多址干扰抑制	179
8.1.1 MAI 抑制接收机设计	179
8.1.2 MAI 抑制的编码设计	196
8.2 窄带干扰 (Narrowband Interference, NBI) 抑制	200
8.2.1 UWB 和 NB 系统模型	201
8.2.2 NBI 避免	202
8.2.3 NBI 消除	207
8.3 干扰感知	209
8.4 结论	212
参考文献	212
第 9 章 WPAN 动态信道分配中的 Wi-Fi 干扰特性	222
9.1 自适应 WPAN	222
9.1.1 概述	222

9.1.2 感知无线电网络的频谱感知	223
9.2 Wi-Fi 干扰下的 WPAN	224
9.2.1 干扰检测——WPAN 的频谱感知	224
9.2.2 试验台配置和场景	225
9.2.3 Wi-Fi 干扰模型	228
9.2.4 检测窗的持续时间	229
9.2.5 检测占空比	231
9.3 干扰特性和性能恶化	231
9.3.1 电波暗室	232
9.3.2 室内 1	236
9.3.3 室内 2	241
9.3.4 不同频谱评价标准分析	245
9.4 干扰环境下改善 WPAN 的可靠性——动态信道分配	246
9.4.1 算法描述	246
9.4.2 仿真结果	248
9.5 结论	251
致谢	252
参考文献	252
第 10 章 低速系统中的节能	255
10.1 能源效率的背景	255
10.2 MAC 节能	260
10.2.1 不对称单跳 MAC	261
10.2.2 对称多跳 MAC	267
10.3 结论	272
参考文献	272

第三部分 可靠性改进专题

第 11 章 协作通信中的可靠性	275
11.1 引言	275
11.1.1 协作通信的可靠性	275
11.1.2 方法概述	277
11.2 采用虚拟波束赋形的协作通信	278
11.2.1 基本原理	279
11.2.2 网络和协议的基础组件	280
11.2.3 基本网络：分析和结果	282

11.2.4 路由	285
11.3 采用无码率码的协作通信	289
11.3.1 基本原理	289
11.3.2 基础组件网络 and 协议	291
11.3.3 基本网络: 分析和结果	292
11.3.4 路由	299
参考文献	302
第 12 章 协作网络中通过中继选择提高可靠性	306
12.1 引言	306
12.2 多中继网络中的信号传输	307
12.3 中继选择的原因	308
12.4 中继选择概述	309
12.4.1 系统模型和数学背景	310
12.4.2 中继选择策略	312
12.5 有限反馈的集中式中继选择	316
12.5.1 中断概率和有效速率	317
12.5.2 DMT 分析	319
12.6 结论	321
参考文献	321
第 13 章 宽带中继架构中的基本性能限	325
13.1 引言	325
13.2 串行中继网络架构中的功率——带宽折中	329
13.2.1 网络模型和定义	329
13.2.2 功率——带宽折中特性描述	333
13.2.3 小结	338
13.3 并行中继网络架构中的功率——带宽折中	338
13.3.1 网络模型与定义	338
13.3.2 MRN 功率-带宽折中的上边界	342
13.3.3 采用实用 LDMRB 技术的 MRN 功率-带宽折中	344
13.3.4 数值结果	353
13.3.5 小结	357
参考文献	357
第 14 章 可靠 MAC 层和分组调度	361
14.1 引言	361
14.2 机会调度/多用户分集	363

14.2.1 单播场景	364
14.2.2 多播场景	366
14.3 编码和调度	369
14.3.1 单播场景	369
14.3.2 多播场景	372
14.4 媒体质量驱动调度	376
14.5 结论	378
参考文献	379

第1章 短距离无线通信与可靠性

虽然现在短距离无线通信还没有一个被广泛接受的定义,但通常指的是:通信距离从几十厘米至几百米的各种无线通信技术。无线通信产业在最近的30多年里被蜂窝系统所主导,但在最近10年,短距离无线通信设备已经逐渐成为人们日常生活中不可或缺的一部分。无线世界研究论坛(Wireless World Research Forum, WWRF)预测这一趋势将在接下来的几年进一步加速,到2017年,预计全世界70亿人将使用7万亿个无线设备^[1],其中大多数都将是短距离无线通信设备,这将实现人与人、人与环境的互联。

无线通信系统的可靠性过去已经得到了深入的研究,但到目前为止,关于影响短距离无线通信系统可靠性的各种因素,以及应如何处理这些因素的相关研究则少有文献涉及。本书将填补这一空白,致力于涵盖短距离无线通信系统最为重要的可靠性问题。本书的贡献主要集中在无线个域网(Wireless Personal Area Network, WPAN)和无线传感器网(Wireless Sensor Network, WSN),而对无线局域网的相关内容则不过多涉及。

由于应用场景、服务质量(Quality of Service, QoS)要求、信号模型的不同,以及不同的差错源和抑制方法,高速和低速短距离无线通信系统将在本书的不同章节分别加以介绍。本书第一部分主要介绍高速系统,主要关注多频带正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)系统和毫米波通信系统,这是因为这两种系统具有实现高吞吐量的巨大潜力。本书第二部分将重点讨论ZigBee和基于脉冲的超宽带(Ultrawideband, UWB)系统,这些系统具有低速率、低功率和低复杂度的特点。本书第三部分将介绍与短距离无线通信系统可靠性相关的一些专题,这些章节将展开更广阔的视角,而不只是针对某一特定的技术或标准。

本章其他内容安排如下。首先,1.1节将讨论短距离无线通信系统发展的有利因素,总结其与中长距离无线通信系统的不同。对低速系统和高速系统在学习场景、发射机/接收机典型特性、可靠性要求等方面进行比较。此外还将回顾全球可供短距离无线通信系统使用的频段。1.2节将定义不同协议层中出现的可靠性问题,讨论相应的解决方法。1.3节对一些短距离无线通信标准进行了简要的综述,第2章和第6章中将对相关标准进行更详细的分析和讨论。

1.1 短距离无线通信

1.1.1 有利因素

短距离无线通信之所以能够在当今世界范围内得到广泛的使用和采纳，以下三个主要因素发挥了重要作用：

- 1) 固态器件的进步。
- 2) 数字通信与调制技术的发展。
- 3) 相关标准化进程的推动。

固态技术的发展是推动短距离无线通信技术广泛应用的重要因素。首先，固态技术的发展使得设备的批量化生产成为可能，而且降低了单个设备的成本。其次，随着技术的发展，短距离无线通信设备可以使用更高的中心频率。这意味着，以前无法使用的频段，如 2.4GHz、5GHz 和 60GHz 的工业、科学和医学 (Industrial Scientific and Medical, ISM) 频段，现在都可以使用了。相关内容将在 1.1.4 节中进行详细讨论。使用更高的中心频率，意味着可以采用更小尺寸的天线阵列，在同一个器件中较易集成多个天线^[2]。当前，集成电路小型化和小尺寸天线使得能够在芯片上加工极其微小的射频集成电路 (Frequency Integrated Circuits, RFIC)，RFIC 能够包含所有需要的系统元件。例如，供短距离无线通信使用的 CMOS 片上 RFIC 天线，在使用高达 60GHz 的中心频率时，其芯片面积小于 1mm^2 ^[3, 4]。

在短距离无线通信系统成功应用推广中发挥重要作用的另一重要因素，是近年来数字调制技术和收发信机算法的发展。如直接序列扩频 (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) 技术成功地应用于诸如 IEEE 802.15.4 无线个域网和 IEEE 802.11 无线局域网中。通过扩展发射信号的频谱，DSSS 带来了诸多好处，如抗非恶意干扰、低功率谱密度、抗人为干扰、消除多径效应等^[5]。跳频扩频 (Frequency-Hopping Spread Spectrum, FHSS) 是另一种正文频分复用，具有较强的抗干扰能力，已经普遍地应用于短距离无线通信系统中。由于 OFDM 在多径环境中的巨大优势，已经成为短距离无线通信系统实现更高吞吐量的关键技术^[6, 7]。OFDM 与其他技术相比具有如下优点：

- 1) 不需要进行时域均衡，只需采用简单得多的频域均衡即可有效工作[⊖]。
- 2) 由于使用了循环前缀 (Cyclic Prefix, CP)，对频率选择性衰落信道具有良好

⊖ 注意频域均衡同样适用于单载波频分多址 (Single-carrier Frequency Domain Multiple Access, SC-FDMA) 系统^[8]。

的鲁棒性。

3) 由于在每个子载波上,信道都是频域平坦衰落,因此可以很容易实现多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术。

由于上述优点,当前 OFDM 技术已经为多个标准所采纳,如 ECMA-368(高速 UWB 物理层和媒体接入层标准^[6])和 ECMA-387(高速 60GHz 物理层和媒体接入层标准, PAL 制式高清电视标准^[7])。当前可能影响未来短距离无线通信系统的其他技术包括: MIMO 技术(能够实现更高的数据速率和更高的可靠性)^[9~13], 感知无线电技术(能更有效、更可靠地利用无线频谱)^[14~17]。

在此还需强调标准化组织在短距离无线通信广泛应用中发挥的至关重要的作用。通过标准化,相关企业和研究机构针对确定的无线通信技术,获得了具有明确定义的技术规范。标准化工作为该技术的可实现性和互操作性带来了巨大潜力,也对应用场景、潜能和可达到的极限有了深入的理解,就如何以合适的方法加以实现达成了共识。当前,我们在日常生活中使用的、成功的短距离无线通信设备,如 Wi-Fi、蓝牙耳机、无线键盘和 ZigBee 设备都是多年标准化的成果。短距离无线通信技术最为重要的标准化组织是 WPAN 的 IEEE 802.15 工作组。除了前面已经讨论过的短距离无线通信技术标准之外,IEEE 802.15 还致力于一些最新技术的标准化工作,如无线体域网(Wireless Body Area Networks, WBAN)、射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)系统、mesh 网络和可见光通信(Visible Light Communications, VLC)。短距离无线通信的其他相关标准还包括 ISA-100 和 ECMA 标准,将在 1.3 节和本书其他章节中进行详细介绍。

1.1.2 短距离与中/长距离无线通信技术比较

尽管短距离无线通信技术应用场景广阔,但这些技术仍具有一些共性特点,而与中/长距离无线通信技术相比(如 WLAN、蜂窝系统、无线城域网和卫星通信),却有着显著性的差异。短距离无线通信设备的共性包括:低功率运行、通信距离从几厘米到几百米、主要工作在室内、内置全向天线、设备的低复杂度和低成本、发射机/接收机由电池供电、使用免授权频段等^[18]。

短距离无线通信设备通常低速移动或者不移动,这意味着与蜂窝系统相比,其接收机架构更为简单,复杂度也更低。另一方面,多跳(Multihop)和协作通信(Cooperative Communications)可以考虑作为一些短距离无线通信场景(如 WSN)中的重要工作模式。这主要是由于无线传感器密集部署,这些传感器收集本地数据,进行数据融合,并传输到指定的接收机。采用多跳和协作通信,数据包通过多个较短距离的跳(Hop)进行传输,而不是直接在相距较远的发射机和接收机之间进行传输。采用多跳的工作方式,无线传感器网能够以极低的功率运行,降低整个网络的功耗,从而延长网络生存时间。多跳和协作通信技术对于短距离无线通信系

统极为重要，将在本书的第三部分重点介绍。

短距离无线通信系统的 QoS 要求（如误包率、数据速率和延迟）与长距离无线通信技术也有很大的不同，而且与应用场景紧密相关。文献[190]中列举了短距离无线通信系统的十大设计准则，与长距离网络的设计明显不同，包括：通信系统架构（点到点和点到多点通信能力）、能量感知、信令和业务信道、可伸缩性与连通性、媒体接入控制与信道接入方法、自组织、服务发现、安全与隐私、灵活的频谱使用、软件无线电设计等。

1.1.3 高速与低速系统比较

可以采用多种方式对短距离无线通信技术进行分类，如按照通信距离、移动性、网络拓扑、QoS 要求、室内或室外工作、使用的频段/带宽和数据速率进行分类。短距离无线通信技术通信距离的量级，可以是几厘米（如 NFC）、几十厘米（如 WBAN）、几米（如 WPAN）或几十到几百米（如 WSN）等^[20]。无源 RFID 的通信距离在几十厘米的量级，而有源 RFID 的通信距离则可以到几百米。虽然短距离无线通信技术通常在静止和极低速的环境下使用，但仍然有些场景必须考虑移动性。例如，WBAN 中身体的移动，某些 WSN 应用中，发射机和接收机的移动。需要在接收机设计中考虑这些移动引起的问题。集中式网络拓扑或分布式网络拓扑是短距离无线通信系统常用的两种拓扑结构。

尽管前面提到了一些分类方法，但仍然很难对各种短距离无线通信技术进行分类。各式各样的应用场景和需求、不同的空中接口、工作范围变化等因素，使得即使对于同样的无线通信技术，也很难进行严格定义的分类。本书选择将短距离无线通信技术分为两个大类，即高速系统和低速系统加以研究。这种分类方法相对一致，且定义明确。表 1-1 给出了短距离无线通信的一些应用实例。

表 1-1 短距离无线通信应用举例

低 速 系 统	高 速 系 统
家庭和建筑远程控制	无线 USB
无线耳麦	Internet 接入与多媒体服务
无线鼠标键盘等	未压缩高清视频
无线无钥门禁系统	住院病人监测
无线条码阅读器	无线监控摄像头
无线传感器网	无线视频会议
急救报警	无线 Ad-hoc 通信
无线计费	无线外围接口

当然，高速系统和低速系统之间的划分并不绝对。高速系统主要针对数据速率在

10Mbit/s 至几 Gbit/s, 通信距离小于 10m。高速系统的应用场景包括无线视频流、无线文件传输(如无线 USB)、无线视频会议和无线视频监控。此外,如文献[1]中所讨论的,短距离无线通信中的高速技术主要是基于多频带 UWB^[21]和毫米波技术^[22, 23]。这些技术及相关无线标准将在第2章中详细讨论。

另一方面,低速系统针对的是低功率和低复杂度应用,而对数据速率并没有过高的要求。当然,低速系统并非一定需要较远的通信距离,但其最大通信距离仍比高速系统要大得多。除了相关应用需求之外,造成低速率的两个主要原因分别是:

1) 较大的通信距离意味着较低的接收功率,这从本质上导致了无法实现高数据速率。

2) 高速系统需要相当大的带宽,而只有在较高的中心频率(如 60GHz 频段)才有较大带宽可供使用,但是较高的中心频率会造成较大的路径损耗,从而无法实现较远的通信距离。

WSN 可能是低速系统最为常见的应用。在当前适用于低速系统的技术中,ZigBee 和低速 UWB 是最为重要的两种。第6章中将综述 ZigBee 和低速 UWB 技术,及相关无线标准。表1-1总结了短距离无线通信应用中,高速和低速系统的应用范例,而相关应用则留待第2章和第6章加以详细讨论。

对于低速和高速系统而言,QoS 要求和改善可靠性的可能技术与协议都明显不同。例如,主要由于应用场景和要求,WSN 更多地采用低功率运行,如环境感知应用,由电池供电的感知节点可以工作更长时间。功率有效路由技术和协作通信在这种应用场景中也非常重要。当然,这些技术也可以应用于一些高速通信场景中。高速系统中最为典型的应用是无线 UWB。无线 UWB 为点到点通信,因此无需考虑路由和协作通信技术。由于高速系统在高频工作时具有使用多根天线进行数据传输的能力(如毫米波通信),利用波束赋形技术及相关协议可以最大程度地降低干扰和提高系统可靠性,因此对于高速应用十分重要。

低速和高速系统所采用的信号模型差异非常大。例如,高速 ECMA-368 标准采用基于 MB-OFDM 的物理层(PHY 层),使得可以在频域进行简单的均衡处理。另一方面,低速 IEEE 802.15.4a 标准采用基于脉冲的信号传输,这是一种非常理想的信号传输方案,例如在低速 WSN 应用中,可以设计低复杂度的发射机/接收机架构,支持高精度定位。采用基于脉冲的信号传输方案,使得低复杂度收发信机架构,如能量检测和发射参考方案成为可能,而基于 OFDM 传输方案中的 FFT/IFFT 则会增加收发信机的复杂度。

1.1.4 频率监管与可用频段综述

在短距离无线通信系统中,中心频率和通信带宽的选择非常重要。如前所

述,在很多情况下,较高的中心频率是较好的选择。因为在较高的中心频率时,可以使用较小尺寸的天线,有助于实现设备的小型化。此外,在高频段中有较多的免授权频段(通常干扰源较少)可供使用。另一方面,由于信号衰减与中心频率成比例,在高频段工作的无线设备由于信号衰减极大,无法实现较远距离上的可靠通信。根据短距离无线通信系统的应用需要,在确定中心频率前,系统设计者必须仔细进行评估和折中。

在大多数情况下,短距离无线通信设备都被限制工作在免授权频段。当然有些免授权频段是全球可用的,而有些免授权频段仅在世界上某些区域可用。短距离无线通信设备可在全球使用的免授权频段包括 13.56MHz 频段(通常用于 NFC)、40MHz 频段、433MHz 频段、2.4GHz 频段和 5.8GHz 频段^[5]。在全球免授权频段中,2.4GHz 频段的使用最为普及,通常用于 WLAN 和微波炉。在欧洲、美国、澳大利亚和新西兰,短距离无线通信使用较多的频段还有 868MHz/915MHz 频段。

在大多数国家,ISM 频段可以免授权直接使用,它包括了前面介绍的一些频段。例如,在美国最常使用的 ISM 频段包括 902~928 MHz、2.4 GHz 和 5.7~5.8 GHz 频段。与其他免授权频段类似,ISM 频段是由美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)法规第 15 条(Part 15)定义的。美国直到 1985 年,才批准无线通信使用 ISM 频段。1985 年,连同 FCC Part 15.247 法规,ISM 频段也向 WLAN 和移动通信开放^[24]。1997 年,FCC Part 15.401~15.407 法规中提出了免授权国家信息架构(UNII)频段,并将 5GHz 增加到免授权频段中。

2002 年,FCC 发布了 Part 15 Subpart-F 法规,在该法规中的 15.501~15.525 定义了 UWB 设备(包括通信、成像系统和地质雷达)工作范围和工作方式。基于这些新规定,UWB 设备在 3.1~10.6GHz 频段的最大发射功率为-41.3 dBm/MHz。这使得 UWB 无线设备的可用频段大为扩展。FCC Part 15.255 法规还定义了另一个可供短距离无线设备使用的宽频段,即在 57~63GHz 允许发射功率不超过 500mW。这一频段通常被称为毫米波或 60GHz 频段,是未来高速短距离无线通信系统另一个最为常用的频段。美国 ISM/U-NII 频段、UWB 和 60GHz 频段和发射功率限制如表 1-2 所示。FCC 免授权频段更详细的内容可见文献[25],而文献[5]进一步讨论了全球使用 1GHz 以下频段的短距离无线通信系统。

表 1-2 美国 ISM/U-NII 频段与 UWB 和 60GHz 使用频段汇总

ISM 频段	功率限制	U-NII 5GHz 频段	功率限制
902~928MHz		Wi-Fi(802.11a/n)	
无绳电话	1W	5.15~5.25GHz	200mW