

无线通信前沿技术丛书

李少谦 周亮 主编

该书由国家863计划课题(No.2011AA010201, 2011AA010202)、国家自然科学基金项目(No.61371103, 60902025, 61306030)、四川省科技厅支撑项目(No.2012FZ0119, 2013GZ0029)、国家科技重大专项课题(No.2013ZX03005010)联合资助



“十二五”
国家重点
出版规划丛书

60GHz频段 短距离无线通信

● 岳光荣 李连鸣 成先涛 李少谦 © 著

Short-Range Wireless
Communications in 60GHz



国防工业出版社

National Defense Industry Press

无线通信前沿技术丛书/李少谦 周亮 主编

该书由国家 863 计划课题 (No.2011AA010201、2011AA010202)、国家自然科学基金项目 (No.61371103、60902025、61306030)、四川省科技厅支撑项目 (No.2013GZ0029、2012FZ0119)、国家科技重大专项课题 (No.2013ZX03005010) 联合资助

60GHz 频段短距离无线通信

Short-Range Wireless Communications in 60GHz

岳光荣 李连鸣 成先涛 李少谦 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以 60GHz 短距离无线通信为重点,系统阐述 60GHz 短距离通信的基本原理和关键技术,内容包括 60GHz 无线通信系统的应用场景以及标准化进程、60GHz 无线通信系统的传播特性、60GHz 无线通信系统设计、基带对射频非理想特性的补偿技术以及 60GHz 频段通信射频 CMOS 电路设计等。本书反映了当前国际上 60GHz 短距离通信的最新研究成果,相信能为读者学习 60GHz 短距离通信的理论和技術提供有益的参考。

本书自成体系,内容丰富,针对性强,图文并茂,通俗易懂,既适合无线通信专业高年级本科生、研究生学习 60GHz 短距离通信,也可作为工程技术人员研究开发 60GHz 短距离通信系统的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

60GHz 频段短距离无线通信/岳光荣等著. —北京:国防工业出版社, 2014.8

(无线通信前沿技术丛书)

ISBN 978-7-118-09688-0

I. ①6… II. ①岳… III. ①短距离—无线电通信 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 200820 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 326 千字

2014 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 76.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

序 言

移动互联网与智能移动终端对数据传输速率需求的持续高速增长,导致无线通信对频谱资源的需求不断增加,从而使得适合于无线通信服务的频谱资源变得日渐稀缺。移动通信网络面临着如何满足未来高密度、大容量传输的巨大挑战,已经成为制约无线通信发展的新瓶颈。60GHz 频段附近有大约 7GHz 的免费带宽,在短距离范围内具有极高的组网密度和传输速率,发展 60GHz 无线通信技术与系统,是无线通信的重要发展方向。

60GHz 无线通信系统的概念一经提出,特别是 2004 年 60GHz 射频 CMOS 电路设计取得突破性进展之后,受到了业界的广泛关注。其涉及的理论和关键技术成为全球通信工业和学术界的研究热点。我国也高度重视 60GHz 无线通信系统的研究,从“十一五”末期开始就在国家“863”计划启动了有关 60GHz 无线通信系统的前期研究工作。在“十二五”期间,国家分别从基础理论、关键技术和实验验证的角度,进一步加强对 60GHz 无线通信系统的资助。目前,我国在 60GHz 无线通信系统领域已经处于国际先进水平,取得了很多重要的研究成果,在 ITU、IEEE 等国际标准化组织的相关标准化中取得了较重要的话语权。

本书作者的课题组是国内最早开展 60GHz 无线通信系统研究的课题组之一,致力于 60GHz 无线通信技术的攻关、实现和应用推广。本书是作者近年来在 60GHz 无线通信系统领域研究成果的提炼和整理,部分研究成果填补了该领域的空白。

本书涵盖了 60GHz 无线通信系统的四个主要方面:60GHz 无线信道的特性、60GHz 无线通信系统设计、60GHz 无线通信基带关键技术与补偿算法以及 60GHz 无线通信系统射频电路的设计。60GHz 系统中的一些基带关键技术研究成果,如高速同步技术、模数混合信号处理技术、低复杂度均衡技术、阵列信号处理技术、射频非理想特性补偿技术、高效率射频电路设计技术等是本书的一大亮点。

本书是中国第一本全面论述 60GHz 无线通信技术与系统的专著。

本书体系完整、层次清晰,图文并茂,提供了示例,有很高的学术性、系统性和可读性。本书可以作为相关研究人员和感兴趣读者的参考书。相信本书的出版,将为我国 60GHz 无线通信系统研究和应用起到积极的推动作用,并进一步促进我国无线通信的持续高速发展。

李少谦

2014 年 5 月

前 言

近年来,移动通信终端用户数以及每个终端的数据速率需求都在快速增长,移动通信网络也面临着如何满足未来高密度、大容量的巨大挑战。在未来的移动通信系统网络架构中,短距离高速通信系统将占据非常重要的地位。60GHz 频率具有利用极大的氧气衰减来降低临近小区干扰的特性及其附近大约 7GHz 的免费带宽而受到了业界的极大关注,在短距离范围内具有极高的组网密度和传输速率,这些特点决定了 60GHz 通信具有广阔的市场应用前景。

60GHz 通信系统引起业界的关注源自于 2004 年该频段射频 CMOS 电路设计的历史突破,其主要应用于短距离高速数据传输或者高速无线局域网。就目前的发展来看,其主要难点在于设计低功耗、低复杂度的基带和射频电路。虽然 CMOS 技术引入让 60GHz 系统的成本逐渐降低,电路级别的优化也能够在一定程度上降低设备功耗,但想要进一步降低 60GHz 的复杂度和功耗需要在系统层面对算法和架构进行优化与设计。60GHz 系统中的一些关键技术,如高速同步技术、模数混合信号处理技术、低复杂度均衡技术、阵列信号处理技术、射频非理想特性补偿技术、高效率射频电路设计技术等先进技术的研究与应用对 60GHz 系统设计者提出了更高的要求与挑战。

本书是介绍 60GHz 通信系统原理及其应用的专著。作者是从事该技术研究的青年研究工作者,作者在加州大学伯克利分校和比利时鲁汶天主教大学学习和工作期间就开始专注于 60GHz 通信系统的设计和实现,是我国最早从事这一领域研究的学者之一。回国后,作者致力于推动我国 60GHz 毫米波通信的发展,获得了我国 60GHz 通信第一个自然科学基金项目和第一个 863 计划课题支持。课题涉及到 60GHz 通信系统设计、算法研究、基带电路实现、射频 CMOS 电路设计、演示验证系统开发等多方面的内容。经过几年的努力,课题组取得了大量的研究成果。在对大量成果梳理和总结的基础上,编撰了本书。

本书共分为 7 章,第 1 章介绍了短距离无线通信,简单描述了蓝牙、超宽带、60GHz 无线通信系统各自的特点与发展历程;第 2 章详细介绍了 60GHz 无线通信系统的应用场景以及标准化进程,详细阐述了 60GHz 无线通信系统的主要标准参数;第 3 章进一步介绍了 60GHz 无线通信系统的传播特性,让读者对 60GHz 频段无线信号的特点有一个整体的把握;第 4 章介绍了通信系统设计,包括链路预算、方向性天线的介绍、传输调制方式的选择、编码方式的选择以及混合信号处理等;第 5 章在第 4 章的基础上进一步跟进,介绍了 60GHz 无线通信系统的几个具体的关键技术,分析了同步、波束赋形以及均衡等算法的性能;第 6 章研究了基带低功耗、低复杂度架构的设计以及基带对射频非理想特性的补偿技术,也是本书的一大亮点;最后,本书的第 7 章介绍了 60GHz

频段通信射频电路设计, 60GHz 频段的射频电路设计一直是业界的一大难点, 本章结合工艺特点和具体的应用场景, 进行 60GHz 频段天线、电路与系统协同设计。

本书由电子科技大学和东南大学联合编著。第 1 章~6 章由电子科技大学岳光荣执笔, 第 7 章由东南大学李连鸣执笔, 电子科技大学成先涛完成了第 5 章和第 6 章的部分内容, 全书由岳光荣、李少谦统稿和审阅。本书是作者长期从事 60GHz 无线传输技术研究的成果提炼。曾经或正在电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室学习的博士研究生陈雷、唐俊林, 硕士研究生罗志刚、李帅、李卿、刘静蕾、韩芳、王田、艾赳赳、刘珈希、夏雪、洪浩、王磊、郭建美、吴罗冰、李天龙等对 60GHz 无线通信系统的理论和关键技术进行了广泛而深入的研究; 曾经或正在东南大学信息科学与工程学院学习的博士研究生及硕士研究生牛晓康、陈林辉、柴远、张涛、史珺、王爱丽、罗莹、何龙、陈德朋、葛梦、刘楠、钟文浩、郑舟、夏海洋等对 60GHz 频段通信射频电路设计进行了深入研究。他们所取得的有关成果对完成本书起到了重要作用, 在此一并向他们表示感谢!

本书涉及到大量本单位 60GHz 通信的研究成果, 其研究工作先后得到了国家 863 计划课题(课题编号: 2011AA010201、2011AA010202)、国家科技重大专项课题(课题编号: 2013ZX03005010)、国家自然科学基金项目(课题编号: 61371103、60902025、61306030)、四川省科技厅支撑项目(课题编号: 2012FZ0119、2013GZ0029)的资助。

本书通俗易懂, 对于有志于从事 60GHz 通信系统技术及其应用研究的人员来说, 本书有助于引导其快速进入该研究领域; 也适合于从事无线移动通信技术研究和应用的各类技术人员了解 60GHz 通信系统。由于作者水平所限, 不足之处在所难免, 恳请专家和读者批评指正。

作者

2014 年 5 月

目 录

第 1 章 短距离无线通信	1
1.1 蓝牙通信	1
1.2 超宽带通信	2
1.3 60GHz 频段无线通信	4
参考文献	6
第 2 章 60GHz 通信主要应用及标准制定	8
2.1 高速数据传输	8
2.2 实时高清视频流传输	9
2.3 汽车雷达	10
2.4 医疗成像	10
2.5 标准制定情况	10
2.5.1 IEEE 802.15.3c	11
2.5.2 IEEE 802.11ad	16
2.5.3 ECMA387	18
2.5.4 IEEE 802.16	20
2.5.5 IEEE 802.11aj	23
2.5.6 各国际标准的比较	25
参考文献	25
第 3 章 60GHz 无线通信信道	27
3.1 60GHz 频段信号传播	27
3.1.1 60GHz 频段信号无线传播特点	27
3.1.2 天线对传播特点的影响	30
3.2 60GHz 频段信号传播信道的测量	31
3.3 60GHz 信道模型	34
3.2.1 IEEE 802.15.3c 信道模型	34
3.2.2 IEEE 802.11ad 信道模型	37
参考文献	39
第 4 章 60GHz 通信系统设计	41
4.1 链路预算	41

4.1.1	信号功率	41
4.1.2	空间传播损耗	41
4.1.3	60GHz 传播信道路径损耗	43
4.1.4	热噪声源	44
4.1.5	链路预算分析	45
4.2	方向性天线	47
4.2.1	定向天线	47
4.2.2	阵列天线	48
4.2.3	60GHz 使用方向性天线优点	58
4.3	单载波分块传输	59
4.3.1	单载波分块传输 (SCBT) 系统模型	59
4.4	OFDM 技术	63
4.4.1	OFDM 基本原理	63
4.4.2	OFDM 关键技术	64
4.4.3	SC 与 OFDM 比较	65
4.5	多进制调制	68
4.5.1	高阶 QAM 调制	68
4.5.2	8PSK/QPSK/B/SK	69
4.6	恒模调制	71
4.7	各种调制技术的比较	73
4.7.1	PA 与 PN 对调制产生的影响	74
4.7.2	各种调制方式比较	76
4.7.3	60GHz 调制方式选择策略	79
4.8	信道编码技术	80
4.9	混合信号处理	83
	参考文献	86

第 5 章 60GHz 通信关键技术 90

5.1	信号同步	90
5.1.1	帧同步	90
5.1.2	载波同步	92
5.1.3	采样定时同步	99
5.2	波束成形	104
5.2.1	FOPC-EBB-BLOCK 波束成形算法研究	106
5.2.2	一种低复杂度正交迭代波束成形算法研究	109
5.2.3	基于阵列天线的波束成形技术	113
5.3	均衡技术	119
5.3.1	线性均衡	120
5.3.2	判决反馈均衡	124
5.3.3	分数间隔均衡器	125

参考文献	130
第 6 章 60GHz 射频非理想特性的补偿	133
6.1 PA 的补偿	133
6.1.1 60GHz 射频功放的研究现状	134
6.1.2 PA 线性化方法概述	134
6.1.3 PA 非线性的影响	139
6.1.4 60GHz PA 非线性的基带补偿	143
6.2 相噪抑制	147
6.2.1 60GHz 相位噪声	148
6.2.2 相位噪声仿真模型	148
6.2.3 受相位噪声影响的系统模型	150
6.2.4 相位噪声影响仿真	152
6.2.5 相位噪声的补偿	155
6.3 I/Q 失衡补偿 ^[37]	159
6.3.1 与频率无关的收发机 IQ 不平衡	160
6.3.2 与频率相关的接收机 IQ 不平衡	167
参考文献	174
第 7 章 60GHz 频段通信射频电路设计	178
7.1 毫米波通信电路工艺选择	178
7.1.1 晶体管特征参数	180
7.1.2 无源器件性能	181
7.2 60GHz 毫米波通信射频前端系统架构	183
7.3 60GHz 毫米波通信射频前端关键电路	184
7.3.1 低噪声放大器	184
7.3.2 混频器	187
7.3.3 压控振荡器及分频器	192
7.3.4 功率放大器	202
7.3.5 毫米波天线	205
参考文献	207

第 1 章 短距离无线通信

无线通信技术的发展给人们的工作、生活带来了重大影响,如今个人都可以在家里、办公室或者世界的任何角落利用无线通信技术开展话音、数据、视频等业务。除了蜂窝网络的通信快速发展外,短距离无线通信的发展也在近 10 多年来突飞猛进,包括广泛采用的基于 IEEE 802.11 系列的无线局域网和基于 IEEE 802.15 系列的无线个域网。无线局域网的论述已经非常普遍,以下主要介绍基于无线个域网的几种典型的短距离无线通信技术,包括蓝牙通信、超宽带通信和 60GHz 通信。

1.1 蓝 牙 通 信

蓝牙技术是一种无线数据与语音通信的开放性全球规范,它以低成本、近距离无线连接为基础,为固定与移动设备通信环境建立一个短程无线连接。其实质是要建立通用的无线电空中接口及其控制软件的公开标准,使不同厂家生产的便携式设备在没有电线或电缆相互连接的情况下也能实现相互之间的连接。蓝牙的工作频段为全球统一开放的 2.4GHz 的工业、科学和医学 (ISM) 频段,2400~2483.5MHz 的频率范围在大多数国家是无需许可的频段,其中法国和西班牙使用的蓝牙产品均为当地定制版本,无法与使用全部频率的国际版本实现互操作。蓝牙采用跳频方式,将 2.402~2.48GHz 频段分成 79 个频点,相邻频点间隔 1MHz,每秒钟频率改变 1600 次,每个频率持续 625 μ s。蓝牙采用时分方式进行全双工通信,其基带协议是电路交换和分组交换的组合。一个跳频频率发送一个同步分组,每个分组占用一个时隙,使用扩频技术也可扩展到 5 个时隙。同时,蓝牙技术支持 1 个异步数据通道或 3 个并发的同步话音通道,或 1 个同时传送异步数据和同步话音的通道。每一个话音通道支持 64kb/s 的同步话音;异步通道支持最大速率为 721kb/s,反向应答速率为 57.6kb/s 的非对称连接,或者是 432.6kb/s 的对称连接。蓝牙技术规定每一对设备之间进行蓝牙通信时,必须一个为主角色,另一为从角色,才能进行通信。通信时,必须由主端进行查找,发起配对,建链成功后,双方即可收发数据^[1-8]。

爱立信公司在 1994 年首先提出蓝牙技术。1998 年 5 月,爱立信、IBM、英特尔、诺基亚、东芝等 5 家公司联合成立了蓝牙特别兴趣小组 (SIG)。1999 年,3COM、朗讯、微软和摩托罗拉加入了 SIG,共同构成了 SIG 的 9 个领导成员^[9]。

2001 年 3 月,蓝牙 SIG 发布了蓝牙协议 1.1 版,解决了蓝牙产品的互操作性问题,IEEE 802.15.1 就是基于该蓝牙版本实现^[10]。2002 年 5 月又推出了蓝牙协议 1.2 版,其具备一定的 QoS 特性,并完整保持后向兼容性,IEEE 802.15.1a 基本等同于蓝牙 1.2 标准。2005 年,蓝牙核心规范 2.0 版本发布,该版本的传输速率是以前版本的 2 倍,并使传输距离可达 100m,最高速率为 10Mb/s,并且降低了系统功耗^[11]。2009 年 4 月 21 日,蓝牙技

术联盟正式颁布了蓝牙核心规范 3.0 版, 蓝牙 3.0 的核心是交替射频技术, 允许蓝牙协议栈动态地选择射频。通过集成“IEEE 802.11 PAL”(协议适应层), 即可在需要的时候调用 IEEE 802.11 Wi-Fi 用于实现高速数据传输, 蓝牙 3.0 的数据传输率提高到了大约 24Mb/s, 是蓝牙 2.0 的 8 倍^[12]。功耗方面, 蓝牙 3.0 引入了增强电源控制机制, 再辅以 IEEE 802.11, 实际空闲功耗会明显降低, 蓝牙设备的待机耗电问题初步得到解决。蓝牙技术联盟在 2009 年时已经搁置了所有采纳超宽带技术规格的计划, 并转向具有良好发展势头的 60GHz 技术, 考虑将 60GHz 其应用在未来的高速蓝牙规格中。2010 年 7 月 7 日, Bluetooth SIG 宣布蓝牙 4.0 标准规范, 蓝牙 4.0 是三位一体的蓝牙技术, 它将传统蓝牙、低功耗蓝牙和高速蓝牙技术整合, 这三个规格可以组合或者单独使用^[13]。蓝牙 4.0 的有效传输距离最高可达到 100m, 蓝牙 4.0 已经走向了商用, 在最新款的 Galaxy S4、iPad 4、MacBook Air、iPhone 5S 上都已应用了蓝牙 4.0 技术^[8]。市场调研公司 IHS 旗下 MS Rresearch 也发布报告称, 在无线组合芯片以及智能手机与平板电脑移动 SoC 快速成长的牵引下, 内嵌蓝牙技术的芯片出货量将从 2011 年的 16 亿片增长到 2017 年的 31 亿片, 扩大近一倍, 年均增长率 11.7%。应用蓝牙的设备 2012 年的出货量约 20 亿个, 2013 年将增加到约 25 亿个, 预计 2018 年可望超过 40 亿个^[7]。2013 年 12 月 5 日, Bluetooth SIG 宣布正式推出蓝牙核心规格 4.1 版本, 蓝牙 4.1 版本可与 LTE 等最新一代蜂窝技术无缝协作。蓝牙与 LTE 可彼此通信, 能自动进行互补, 提供符合消费者期望的高质量体验^[14]。

1.2 超宽带通信

超宽带(UWB)是一种具备低功耗与高速传输的无线个人局域网络通信技术, 最早的超宽带信号采用冲激脉冲来实现, 因此, 也被称之为冲激无线电(Impulse Radio)。它不采用连续的正弦波, 利用纳秒至皮秒级的非正弦波窄脉冲传输数据, 而时间调变技术令其传送速度可以大大提高, 而且耗电量相对地低, 并有较精确的定位能力。根据美国军方在 1989 年给超宽带信号的相关定义^[15], 规定-10dB 相对带宽超过 25%, 或绝对带宽超过 1.5GHz 的信号就称为超宽带信号。美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的最新定义的-10dB 的相关带宽和绝对带宽分别为 20%和 500MHz^[16,17]。计算相对带宽的公式是为^[18]

$$B_f = \frac{2(f_H - f_L)}{(f_H + f_L)} \quad (1.1)$$

式中: f_H 表示-10dB 散射上频率点; f_L 表示-10dB 散射下频率点。

跳时扩谱冲激无线电是超宽带无线电的一种主要方式, 其本质是无载波跳时多址通信, 因此, 可看做是扩频通信的进一步发展。其有隐蔽性好、处理增益高、多径分辨能力强、传输速率高、系统容量大、穿透能力强、便于多功能一体化、低功耗等特点。与常见的通信使用的连续载波方式不同, 超宽带冲激无线电采用极短的脉冲信号来传送数据。这些脉冲所占用的带宽甚至达到几 GHz, 因此, 最大数据传输速率可以达到几百 Mb/s。有关脉冲通信(超宽带无线电通信在 20 世纪 90 年代前常称为脉冲通信)的研究可以回溯到 20 世纪 40 年代^[19], 1942 年 Louis de Rosa 提出两项专利的申请, 并在 1954

年获得批准；1945 年，Conrad H. Hoepfner 也提出了有关脉冲通信技术的专利申请，1961 年获得批准。60 年代后期，Gerald Ross 和 Henning Harmuth 为脉冲通信技术的发展做出了很大的贡献，他们研究了脉冲传输系统的主要部件和脉冲收发机的设计，主要集中在脉冲的产生和检测技术。从 60 年代和 70 年代开始，脉冲技术主要用于非通信领域的商业应用方面。第一个超宽带无线电通信专利于 1973 年获得批准。超宽带技术在通信方面的应用研究发展相对迟缓，直到 1993 年美国南加州大学的 R. Scholtz 教授将跳时码分多址的概念与方法引入超宽带通信领域^[21]。

因为使用的是极短脉冲，在高速通信的同时，UWB 设备的发射功率很小，仅仅只有目前的连续载波系统的几百分之一。UWB 适合需要高质量服务的无线通信应用，可以在无线个人局域网络（WPAN）、家庭网络连接和短距离雷达等领域。超宽带技术在多径密集环境中的无线通信（例如室内无线通信）和对保密性要求高的无线通信^[23, 24]（战术无线通信）领域备受关注。根据 Intel 公司的研究报告^[25]，IEEE 802.11b 的空间容量为 1kb/s/m^2 ，蓝牙的空间容量为 30kb/s/m^2 ，IEEE 802.11a 的空间容量为 83kb/s/m^2 ，超宽带无线电的空间容量为 1000kb/s/m^2 。可见，在空间容量方面，超宽带无线电比现有类似系统具有更大的优势。超宽带无线电与其他几种类似用途的空间容量比较如图 1-1 所示。

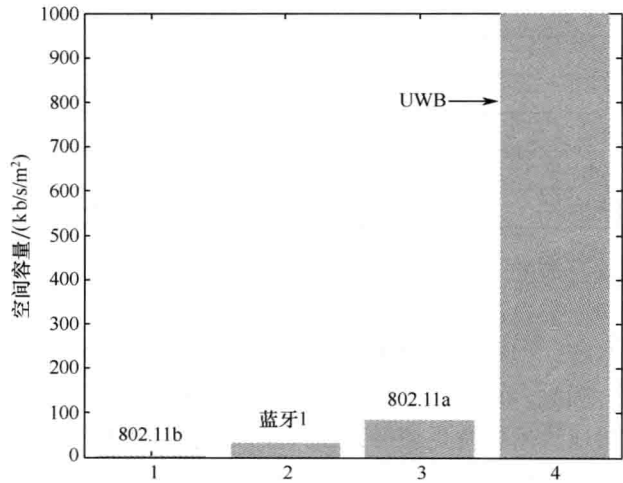


图 1-1 超宽带无线电与几种无线技术的空间容量比较

超宽带信号的实现方式除了冲激无线电之外，还有采用 DS-CDMA 方式、OFDM 方式和 Chirp 脉冲方式等。2003 年 12 月，UWB 通信标准制定的过程中出现了两种相互竞争的标准。一方是以 Intel 与德州仪器为首支持的多频带 OFDM 联盟（MBOA），MBOA 的主要宗旨是摒弃冲激无线电的超宽带方案，力推其多频带的 OFDM 方案，即将 FCC 开放的 3.1~10.6GHz 的 7.5GHz 的频段划分成十几个 528MHz 子频带，然后在每个子频带上采用 OFDM 技术实现宽带无线通信。这样若同时利用多个子频带时就可以实现速率达到 100~500Mb/s 以上的超宽带无线通信。而另一方面是以摩托罗拉为代表的超宽带论坛，其所提出的 DS-UWB 方案采用的是直接序列扩频的技术。在制定 IEEE 802.15.3a 的标准过程中，这两种方案的竞争非常激烈，由于双方的矛盾不可调和，IEEE 802.15.3a 工作组于 2006 年 1 月解散，使得基于超宽带技术的短距离高速通信应用的 IEEE 标准制

定失败^[26]。两大阵营均纷纷推出基于自己标准的超宽带产品，希望通过占领市场而成为超宽带通信技术的事实标准。

除了实现短距离高速通信外，基于冲激无线电技术的超宽带传感器网络能充分利用该技术的低功耗、低成本、穿透能力强等优点，在低速率传感器定位网络应用方面具有很好的应有前景。基于超宽带无线技术的传感器定位网络物理层标准的制定由 IEEE 802.15.4 工作组负责，该工作组在 2004 年已经完成了 IEEE 802.15.4a 传输信道的测试和建模，提交了最后的信道建模标准，该标准在 IEEE 802.15.4 的基础上增加了新的物理层描述，一个是冲激无线电的方式，另一个是在 2.4GHz 频率下的 Chirp 脉冲传输方式，并于 2005 年 3 月提交了唯一的标准草案^[27]。2012 年，IEEE 802.15.4f 对 UWB 物理层进行了重定义^[28]。

超宽带通信在民用方面的发展主要得益于 FCC 在 2002 年 2 月 14 日对超宽带信号的重新定义以及对超宽带应用频带的划分。美国 FCC 已经批准超宽带无线电产品在部分频段和部分领域的应用，主要规定如表 1-1 所列。

表 1-1 FCC 授权的超宽带无线电应用范围和使用频段

应用范围	使用频段
透地雷达成像系统	960 MHz 以下，3.1~10.6 GHz
墙内成像系统	960 MHz 以下，3.1~10.6 GHz
穿墙成像系统	960 MHz 以下，1.99~10.6 GHz
医疗系统	3.1~10.6 GHz
监视系统	1.99~10.6 GHz
汽车雷达系统	24.075 GHz 以上
通信与测量系统	3.1~10.6GHz

在民用方面，从目前的研究情况来看，超宽带无线传输技术主要会用于短距离高速率传送，这包括消费电子设备、计算机设备（无线 USB2.0）、家用娱乐设备、电子时尚产品、医用健康设备等，用以构建 WLAN 和 WPAN。用于短距离的超宽带无线传输技术设备的成本很低，因此，短距离潜在用户包括几乎每一个计算机用户、每个家用电器用户。超宽带无线传输技术的特点使得其在其他方面的应用也很有前景，如提供中、长距离的安全保密通信、提供精确的位置定位、提供室内隔墙探测和监视等。这种应用的潜在用户可包括军队、警察、消防等部门。

1.3 60GHz 频段无线通信

随着 HDTV 应用以及高清内容的广泛采用，如高清机顶盒、蓝光 DVD 播放机、高清摄像机等，在计算机或笔记本与监视器或者投影仪之间的连接，以及个人手持设备与个人计算机之间的数据同步和大媒体文件的传送等应用都对无线高速传输提出了新的更高的要求，特别是对于某些应用还要求提供无压缩的信息传输，如所图 1-2 示。这些应用需求远远超过了目前无线通信系统所能提供的传送能力，因此，必须通过研究新的技术来满足这些应用需求。目前，主流的室内应用需求主要是在 2~20m 的范围内提供数据速率高达数 Gb/s 的实时无线传输。这些需求主要来自于日益增加的高清设备的无线传输，为此必须研究不同于超宽带系统的高速传输技术，而 60GHz 频段的短距离传输技术为提供了解决问题的可能。

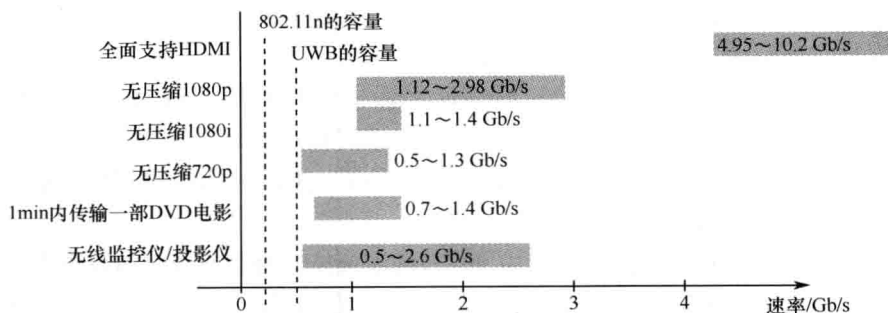


图 1-2 不同高清设备的数据速率需求

60GHz频段的无线通信属于毫米波通信,最早用于空间卫星与卫星之间的通信连接。早在 1995 年, FCC 就将 59~64GHz 分配为免费的频段。随后不久又将这一频段扩展为 57~64GHz, 共 7GHz 带宽的频段, 并且这个频段的发射功率的限制远远没有超宽带所在的 3.1~10.6GHz 频段严格。2001 年, 美国 FCC 在 59~66GHz 频段上分配了 7GHz 的带宽作为免许可的频段。加拿大关于 60GHz 频段的划分与美国是一致的, 是由 IC-SMT (加拿大产业频谱管理与电信) 划分的。2000 年, 日本 MPHPT(公共管理部门, 民政, 邮电)划分了 59~66GHz 频段的带宽作为免许可使用, 与北美不同的是, 日本的条例规定了最大的传输带宽不能超过 2.5GHz。2005 年, 澳大利亚通信和多媒体当局 (ACMA) 追随了日本和北美的脚步, 但是只有 3.5GHz (59.4~62.9GHz) 带宽作为免许可使用。2005 年 6 月, 韩国毫米波频率研究小组 (MFSG) 建议把 57~64GHz 作为一个 7GHz 免许可的频段并且没有使用应用类型的限制。欧洲电讯标准机构 (ETSI) 和欧洲邮政与电讯管理联盟 (CEPT) 共同合作, 建立了一个合理的帧结构来调度免许可的 60GHz 设备。一般来说, 57~66GHz 用作移动宽带和 WLAN 系统的应用。中国开放了 59~64GHz 频段作为免许可使用, 以便适应 60GHz 日渐成熟的无线通信技术和极具潜力的市场需要。各国 60GHz 频段分配可如图 1-3 所示。

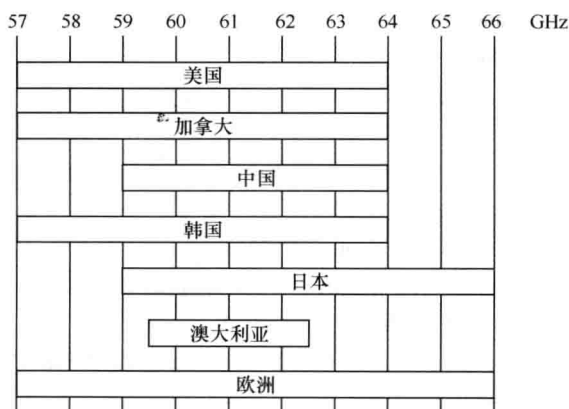


图 1-3 部分国家地区 60GHz 附近频段的规划

60GHz 无线通信技术用于高速的网络、数据及音频传输^[30, 31]具有如下优点。

(1) 良好的国际通用性和免许可性。2001 年, FCC 在 60GHz 频带附近划分出 7GHz 的免许可带宽, 以供全球使用。各国在 60GHz 附近共用大约 5GHz 的共有频域。同时,

如此大的免费资源，加之无线通信的先进技术，使其在经济上具有极大的优势，引发了众多研究者对 60GHz 无线通信技术开发的研究兴趣。

(2) 高安全性。由于氧气吸收在 60GHz 频段上达到峰值，使得邻近的几组 60GHz 网络之间不会存在互相干扰。并且，墙壁及一些障碍物对毫米波具有较大程度的衰减，提高了通信的抗干扰性和安全性。正是由于这些条件，使得 60GHz 毫米波通信在短距离无线通信上具有得天独厚的优势。

(3) 高方向性。60GHz 无线信号中 99.9% 的波束能量聚集在 4.7° 的范围内^[29]，具有极高的方向性，可用来进行点对点通信。若将天线固定在这个频段上发射，则辐射能量同样会集中在 4.7° 的波束范围内，这样一来，无线信号间的干扰会大大降低。

(4) 体积小。相对于微波元器件，毫米波元器件的尺寸要精小很多，这对手机、硬盘等一些原本体积就不大的电子设备来说就很有价值。在雷达防撞系统和卫星通信中这种优势更加明显，大大提高了应用的便利性。

参 考 文 献

- [1] 张禄林, 雷春娟, 郎晓虹, 等. 蓝牙协议及其实现[M]. 人民邮电出版社, 2001.
- [2] 金纯, 等. 蓝牙技术[M]. 电子工业出版社, 2001.
- [3] 金纯, 蒋小宇, 罗祖秋. ZigBee 与蓝牙的分析与比较[J]. 信息技术与标准化, 2004 (6): 17-20.
- [4] 马建仓, 罗亚军, 赵玉亭, 等. 蓝牙核心技术及应用[M]. 科学出版社, 2003.
- [5] 罗辑, 高家利, 秦正. 蓝牙技术的应用现状及发展趋势[J]. 四川兵工学报, 2006, 27(3): 36-37.
- [6] [Online]Available: <http://www.elecfans.com/tongxin/rf/2008091712623.html>
- [7] [Online]Available: <http://www.eepw.com.cn/article/145880.htm>
- [8] [Online]Available: http://baike.baidu.com/link?url=msRJ6UvleOWF4FZWwo5WoCsYB3NMYXDofFoB_hW37lsiecxEXdSUWVdmofPGYHv.
- [9] Bisdikian.C. An overview of the Bluetooth wireless technology[J]. IEEE Commun Mag, 2001, 39(12): 86-94.
- [10] Bluetooth S I G. Specification of the Bluetooth System, version 1.1[J]. <http://www.bluetooth.com>, 2001.
- [11] Bluetooth SIG. Bluetooth Specification[J]. 2007.
- [12] Bluetooth SIG. Bluetooth 3.0+ HS Specification[J]. 2009.
- [13] Bluetooth SIG. Bluetooth specification version 4.0[J]. Bluetooth SIG, 2010.
- [14] Bluetooth SIG 推出蓝牙 4.1 版本[J]. 微电脑世界, 2014.
- [15] Fowler C, Entzminger J, Corum J. Assessment of Ultra-wideband (UWB) Technology, OSD/DARPA, Ultra-wideband Radar Review Panel, 1990.
- [16] FCC First Report and Order: In the matter of Review of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission systems, FCC 02-48, 2002.
- [17] FCC notice of proposed rule making, revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems. Federal Communications Commission, Washington, DC, ET-Docket 98-153.

- [18] Taylor J D. An introduction to ultra-wideband radar technology. Boca Raton, FL: CRC, 1995.
- [19] Barrett T W. History of ultrawideband radar & communications: Pioneers and innovators. PIERS2000 Symposium, Cambridge, MA, 2000.
- [20] Ross G F. The transient analysis of certain TEM mode four-post networks. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1966, 14(11): 528.
- [21] Bennett C L, Ross G F. Time-domain electromagnetics and its applications. Proceedings of the IEEE, 1978, 66(3): 299-318.
- [22] Scholtz R A. Multiple access with time-hopping impulse modulation. IEEE MILCOM, 1993, 2: 447-450.
- [23] Kolenchery S S, Townsend J K, Freebersyser J A, et al. Performance of local power control in peer-to-peer impulse radio networks with bursty traffic. IEEE GLOBECOM, 1997, 2: 910-916.
- [24] Kolenchery S S, Townsend J K, Freebersyser J A. A novel impulse radio network for tactical military wireless communications. IEEE MILCOM, 1998, 1: 59-65.
- [25] Foerster J, Green E, Somayazulu S. Ultra-wideband technology for short- or medium- range wireless communication. http://www.developer.intel.com/technology/itj/q22001/articles/art_4a.htm. 2001.
- [26] UWB standardization collapses; Conflict moves to the market (2006), Microwave Journal 49(3) [online]. 2006, <http://www.mwjjournal-digital.com/mwjjournal/200603/>.
- [27] [Online] Available: http://blog.sina.com.cn/s/blog_74dd95b101014agd.html.
- [28] [Online] Available: http://baike.baidu.com/link?url=XKmmz8TAvpUL9LNqNsdCUV7R5nhOkgFoQUKoGpUsb7AEOQV47gq_umndSxAyv2NB.
- [29] 何仲夏. 60GHz 射频芯片: 无线通信学术和产业界研究的新热点[J]. 前沿科学, 2010, 4(14): 50-56.
- [30] Maruhashi K, et al. Wireless uncompressed-HDTV-signal transmission system utilizing compact 60-GHz-band transmitter and receiver. IEEE MTT-S International in Microwave Symposium Digest, 2005, 1867-1870.
- [31] Amendment of Parts 2, 15 and 97 of the Commission's Rules to Permit Use of Radio Frequencies Above 40 GHz for New Radio Applications. Federal Communications Commission, 1995 [Online]. Available: <ftp://ftp.fcc.gov/pub/Bureaus/Engineering Technology/Orders/1995/fcc95499.txt>.

第2章 60GHz 通信主要应用及标准制定

2.1 高速数据传输

60GHz 无线传输技术是目前最受瞩目的短距离高速无线传输技术之一。众所周知,第一个普及的 Wi-Fi 标准——IEEE 802.11b 支持最大为 11Mb/s 的传输速率^[1], IEEE 802.11g 则支持 54Mb/s 的传输速率^[2]。目前,基于 IEEE 802.11n 协议的无线局域网支持的传输速率已经达到 300Mb/s^[3]。然而它们的工作频率都是在 2.4GHz 和 5GHz,属于厘米波范围。随着人们对于高速海量数据的传输要求不断提高,频谱受限的厘米波技术必定无法满足 Gb/s 乃至 Tb/s 级别的传输速率的要求。并且,现有的无线传输方案,如蓝牙、红外等都存在传输速度慢的问题。正因为如此,苹果公司的 iPod 一直没有搭载无线传输平台,iPod Touch 也仅是支持现有的 Wi-Fi 标准。Equation Chapter (Next) Section 1

60GHz 无线传输技术受到热捧的最大原因是其具有更多免费的可用带宽。在 60GHz 频带范围内,有 7~9GHz 无需许可的带宽可供免费使用。因此,60GHz 频段大大提高了毫米波无线通信的传输速率,多 Gb/s 的传输速率变得不再那么遥远。即使 60GHz 毫米波采用低阶调制,也可达到 3~5Gb/s 的传输速率。毫无疑问,60GHz 毫米波传输技术将成为无线网络发展史上的里程碑,在不久的将来,基于 60GHz 无线传输技术的无线局域网、无线高清接口乃至专用数据传输系统将更为生活带来更多便利。

2010 年 5 月,Wi-Fi 联盟与 WGA 达成了合作协议,该协议规定:双方将共享技术标准,用以开发下一代支持 Wi-Fi 联盟在 60GHz 频段下工作的认证项目,并且支持 WiGig 兼容设备在某些情况下切入到 Wi-Fi 的 2.4GHz 或 5GHz 频段。这份协议的颁布进一步鼓励了 60GHz 技术的产品开发,从而扩展了 Wi-Fi 现有的技术能力,同时意味着 Wi-Fi 下一代标准将采用 60GHz 毫米波技术,以实现其超高的传输速率。

2013 年,电气和电子工程师协会(IEEE)组织宣布,已经批准了 IEEE 802.11ad-2012 修正案,目标是将 Wi-Fi 无线的传输速度进一步提升到 7Gb/s。IEEE 802.11n/ac 两个标准都是 2.4/5GHz 双频段的,IEEE 802.11ad 则会首次演变成三频段,新加入 60GHz 频段。通过新的“快速场景转换”功能,无线设备可以在新的 60GHz 与传统的 2.4/5GHz 之间无缝切换,保证设备始终处于最佳连接状态,优化传输性能和距离。

2014 年 2 月,矽映宣布进军小蜂窝无线回传市场,并发布两款大吞吐量、单芯片 CMOS 波束导向型 60GHz 射频收发器,以应对城市环境中对大容量无线回传链路快速增长的需求。

2014 年底,WLAN 业界团体“Wi-Fi 联盟”将从开始实施相互连接试验,支持 IEEE 802.11ad 的芯片组有望在 2014 年内实现量产。