

► 21世纪通信网络技术丛书



TD  
SCDMA

移动通信前沿技术系列

# 超宽带通信系统

张中兆 沙学军 张钦宇 吴宣利 著  
张乃通 审校



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子信息科技专著出版专项资金资助出版

21 世纪通信网络技术丛书  
——移动通信前沿技术系列

# 超宽带通信系统

张中兆 沙学军 张钦宇 吴宣利 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

作为 IEEE 802.15.4a 的物理层标准之一以及 IEEE 802.15.3a 的候选技术之一, 脉冲超宽带技术近年来受到了国内外学术界和产业界的广泛关注, 我国的相关部委也投入了大量的人力、物力开展对该技术的研究, 本书就是在国家自然科学基金重点项目“超宽带高速无线接入理论与关键技术”(60432040)的支持下编写完成的。

本书以室内、短距离、高速的通信环境为背景, 以设计满足体积小、简单、功耗低、重量轻, 尽可能简化设备结构、不使用复杂技术等要求的超宽带设备为目标, 突出时域“脉冲”特性, 从系统论的角度, 讨论和论述对组成系统的部件所进行的各种参数折中和优化。其主要内容包括超宽带系统的传播特性及信道模型, 脉冲波形设计, 调制解调及多址接入方式, 脉冲信号接收技术, 天线设计以及超宽带技术的应用和发展等。书中既有对基本概念的分析, 也有对关键技术的详细介绍, 适合于电子通信类专业高年级本科生、研究生以及工程技术人员使用。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

超宽带通信系统 / 张中兆等著. —北京: 电子工业出版社, 2010.3

(21世纪通信网络技术丛书. 移动通信前沿技术系列)

ISBN 978-7-121-10221-9

I. 超… II. 张… III. 宽带通信系统 IV. TN914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第006717号

责任编辑: 王春宁

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 14.25 字数: 358千字

印 次: 2010年3月第1次印刷

印 数: 3500册 定价: 39.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 出版说明

通信网络技术是当今发展最快、应用最广和最前沿的通信领域之一。通信技术发展到今天，已经不是传统意义上的充满神秘色彩的深奥技术了，它已经与日常的应用密不可分。可以说，网络的出现，使通信技术得以有了广阔的用武之地。正是由于有了固定电话网、移动通信网和 Internet，使通信技术的应用在这些平台上有了用武之地，渗透到了我们日常生活的方方面面。

为了促进和推动我国通信产业的发展，电子工业出版社通信分社特策划了一套《21世纪通信网络技术丛书》。这套丛书根据不同的层面，又细分为三个系列：《移动通信前沿技术系列》、《3GPP LTE 无线通信新技术系列》和《网络通信与工程应用系列》。

《移动通信前沿技术系列》是从移动通信技术（3G 技术）的应用现状与发展情况出发，全面介绍当今移动通信领域涉及的关键技术与热点技术，例如：软件无线电；移动 IP 技术；移动数据通信；WCDMA；TD—SCDMA；cdma2000；移动通信系统网络规划与优化；智能天线技术；认知无线电技术；WiMAX，WiFi，ZigBee 宽带无线接入技术；UWB 技术；UMTS 技术；Ad Hoc 技术等。

《3GPP LTE 无线通信新技术系列》是以 3GPP 中 LTE 标准的关键技术在无线、宽带、高速、资源中的有效管理和利用，以及在 B3G/4G 无线通信领域中的应用为主。LTE 作为 3G 技术的一个重要的长期演进计划，代表了国际无线通信领域的最新发展需求和解决方案，例如：基于 OFDM 的上、下行（HSxPA）的多址接入技术；随机接入技术；多天线 MIMO 技术；多链路自适应技术；多播技术；功率控制技术；宽带无线网络的安全性；可移动性；可管理性；高效信源与信道编码和调制 MQAM 技术等。

《网络通信与工程应用系列》是以技术为先导，以构建网络的体系结构、标准、协议为目标所开展的现代无线、移动、宽带通信网络的规划与优化，以及结合工程应用的方向所提出来的。例如：无线网状网、WLAN、无线传感器网络、3G/B3G/4G 通信网工程设计与优化、卫星移动通信网、三网融合技术、网络新安全技术与策略、RFID 应用网络、下一代基于 SIP 的统一通信、光网络与光通信等。

本套丛书依托各高等院校在通信领域从事科研、教学、工程、管理的具有丰富的理论与实践经验的专家、教授；各科研院所的研究员；国内有一定规模和研发实力的科技公司的研发人员，以及国外知名研究实验室的专家、学者等组成编写和翻译队伍，力求实现内容的先进性、实用性和系统性；力求内容组织循序渐进、深入浅出、理论阐述概念清晰、层次分明、经典实例源于实践；力求很强的可读性和可操作性。

本套丛书的主要读者对象是广大从事通信网络技术工作的各科研院所和公司的广大工程技术人员；各高等院校的专业教师和研究生；刚走上工作岗位的大学毕业生；以及与此相关的其他学科的技术人员，供他们阅读和参考。

本套丛书从 2008 年上半年开始陆续推出，希望广大读者能关注它，多对本套丛书提出宝贵意见与建议，欢迎通过电子邮箱 wchn@phei.com.cn 进行探讨、交流和指正，以便今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术类图书。

电子工业出版社  
通信分社

# 序 言

2002年4月美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)发布超宽带(Ultra-Wideband, UWB)设备的初步规范,在此之前UWB技术主要采用冲激无线电(Impulse Radio, IR)形式,且主要用于军事上的雷达和低截获/低侦察率的无线系统。1993年,R. A. Scholtz在军事通信会议上发表了“Multiple Access With Time-hopping Impulse Modulation”的论文,开辟了将IR作为通信载体的超宽带无线通信系统IR-UWB,即脉冲超宽带系统。随着微电子器件的高速发展,脉冲超宽带技术开始应用于民用领域,在国际上也掀起了对其研究、开发和应用的热潮,并被认为是下一代无线通信中的革命性技术之一。我国也针对超宽带技术和系统开展了广泛的研究。国内外相继出版了一批相关的著作、书籍,这些书籍当中已经对超宽带的基本原理、性能及组成系统的相关技术作了比较详细的论述,我们这本书如沿着这些书籍的思路进行编写,势必信息量不大,价值不高。为此,我们首先较为认真地研究了超宽带本身的特性(含传输特性、信号波形特征等)以及可能应用的场合,从而确定本书写作的思路是:

- 系统应用场合为室内、短距离、高速的通信环境;
- 对设备的要求为体积小、简单、功耗低、重量轻,尽可能简化设备结构,采用较低复杂度技术等。
- 系统需要满足的功能为传感(含定位、测距、成像等)/通信一体化的无线通信系统。
- 突出时域“脉冲”特性,不能简单地套用扩频理论。
- 从系统论的角度,讨论和论述对组成系统的部件所进行的多种参数折中、优化。

因此,本书的重点内容安排如下:

- 超宽带系统的载波是窄脉冲而不是传统的正弦波,应用环境是室内短距离,信号的传播有其特殊性,因此安排了注重工程应用的“超宽带信号传播特性及信道模型”作为第2章。
- 由于超宽带系统中使用的脉冲波形影响到系统的传输性能、多用户检测性能、系统容量、与窄带系统共存和兼容等特性,因此从系统对波形的一体化要求出发,安排了“超宽带系统中的脉冲波形”作为第3章。
- 由于载波是纳秒级或亚纳秒级的窄脉冲,对接收技术的要求就有了特殊性;同时,由于应用背景是短距离的室内高速应用,对设备也有相应的要求。因此,从这两点出发,安排了“脉冲信号接收技术”作为第5章。
- 本书是专业技术类的书籍,那么必须考虑技术的应用。脉冲载波的特性之一就是可形成传感/通信一体化的节点,其中传感又包括定位、测距与成像等功能。作为成像等功能的基础,定位测距是首先需要解决的关键问题,因此安排了以定位测距为基础的应用部分“超宽带技术的应用及其未来发展方向”作为第7章。
- 此外,本书还有“超宽带调制及多址”以及“超宽带天线原理及设计”等基础性的章节,以保证本书的完整性。

本书是我们依托国家自然科学基金重点项目的基础上,通过整理我们自己得出的相关研

究成果后编写而成的。参加该重点项目研究的单位还有桂林电子科技大学和南京邮电大学，本书中的内容虽然均是我们自主的研究成果，但在三个单位合作完成该项目的过程中，另外两家单位对于课题总体结构、具体内容上的见解与建议也对我们本书的完成具有启发和充实的作用，同时本书第7章中定位测距演示验证系统的天线也是由南京邮电大学的程崇虎教授提供的，这是由他领导的科研团队所取得的科研成果，在此表示深深的感谢。

本书还得到了国家自然科学基金重点项目“超宽带高速无线接入理论与关键技术”（60432040）的支持，以及国家自然科学基金委信息科学部张兆田主任和熊晓芸处长的大力支持，在此也表示深深的感谢。

本书由张中兆、沙学军、张钦宇、吴宣利等共同所著。其中第1章由张中兆、吴宣利、张霆廷编写；第2章由汪洋、张钦宇、沙学军编写；第3章由吴宣利编写；第4章由沙学军编写；第5章由张钦宇、沙学军、杨志华编写；第6章6.1、6.2节“天线时域特性”由南京邮电大学吕文俊副教授编译和校对，其余部分由吴宣利编写；第7章由张钦宇、吴绍华编写。全书由张中兆统稿，张乃通院士审校。博士及硕士研究生温容慧、宁晓燕、唐珣、邱昕、林迪、沈清华、吴晓涛、詹宗超等协助完成了本书的部分录入和校对工作；电子工业出版社的王春宁编辑也为本书的编辑和出版做了大量的前期工作，在此一并表示感谢。

超宽带是一门正在飞速发展过程中的技术，新技术和新方法不断涌现，由于作者水平有限，书中难免有错误和疏漏之处，望读者批评指正。

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 超宽带无线通信技术概述 .....	(2)
1.2 脉冲超宽带的特点与优势 .....	(3)
1.3 本书后续章节的安排 .....	(5)
参考文献 .....	(7)
<b>第 2 章 超宽带信号传播特性及信道模型</b> .....	(8)
2.1 超宽带信号传播特性综述 .....	(8)
2.1.1 超宽带信号传播的弱衰落性 .....	(8)
2.1.2 超宽带信号的强透射性 .....	(10)
2.2 信道测量技术 .....	(12)
2.2.1 概述 .....	(12)
2.2.2 时域测量技术 .....	(12)
2.2.3 频域测量技术 .....	(13)
2.2.4 时域与频域方法比较 .....	(14)
2.2.5 测量过程 .....	(15)
2.3 时域和频域典型测量案例及后期数据处理方法 .....	(15)
2.3.1 时域测量案例及后期数据处理方法 .....	(15)
2.3.2 频域测量案例及后期数据处理方法 .....	(21)
2.4 信道模型 .....	(26)
2.4.1 自由空间传播的 Friis 传输方程 .....	(26)
2.4.2 带有地面反射传播的双径模型 .....	(28)
2.4.3 超宽带多径传播模型 .....	(31)
2.4.4 IEEE 802.15.3a 超宽带室内信道模型 .....	(35)
2.4.5 现有超宽带信道模型研究的局限性 .....	(39)
2.5 信道模型的进一步研究 .....	(41)
2.5.1 超宽带室内视距环境多径传播模型 .....	(42)
2.5.2 超宽带室内非视距环境多径传播模型 .....	(44)
2.6 本章小结 .....	(49)
参考文献 .....	(50)
<b>第 3 章 超宽带系统中的脉冲波形</b> .....	(52)
3.1 超宽带系统对发射脉冲波形的要求 .....	(52)
3.1.1 基本要求 .....	(52)

3.1.2	增强要求 .....	(54)
3.2	高斯类函数 .....	(56)
3.2.1	高斯脉冲及其导函数 .....	(56)
3.2.2	瑞利脉冲 .....	(58)
3.3	正交 Hermite 脉冲 .....	(59)
3.3.1	正交 Hermite 脉冲的特性 .....	(59)
3.3.2	施密特正交化的正交 Hermite 脉冲 .....	(61)
3.4	椭球波函数 .....	(62)
3.5	Parks-McClellan 算法 .....	(64)
3.6	半正定规划算法 .....	(65)
3.6.1	半正定规划算法的基本思想 .....	(65)
3.6.2	对半正定规划方法的进一步分析与改进 .....	(69)
3.7	基于正交展开的波形设计 .....	(72)
3.7.1	正交展开方法概述 .....	(72)
3.7.2	基于正交 Hermite 脉冲的正交展开方法 .....	(74)
3.7.3	正交波形的设计 .....	(77)
3.7.4	对天线的失真预补偿 .....	(78)
3.7.5	动态频谱接入的波形设计 .....	(79)
3.7.6	仿真实例 .....	(80)
3.8	各种脉冲波形的比较 .....	(86)
3.8.1	对于基本要求的满足情况 .....	(86)
3.8.2	对于增强要求的满足情况 .....	(86)
3.8.3	现有波形的比较 .....	(87)
3.9	本章小结 .....	(87)
	参考文献 .....	(88)
<b>第 4 章</b>	<b>超宽带调制及多址 .....</b>	<b>(90)</b>
4.1	调制技术 .....	(90)
4.1.1	脉冲幅度调制 .....	(90)
4.1.2	脉冲位置调制 .....	(93)
4.1.3	脉冲波形调制 .....	(95)
4.1.4	<i>M</i> -BOK 调制 .....	(96)
4.1.5	几种调制方式的比较 .....	(97)
4.2	多址接入技术 .....	(98)
4.2.1	跳时多址接入 .....	(98)
4.2.2	直接序列多址接入 .....	(101)
4.2.3	脉冲波形多址接入 .....	(103)
4.2.4	几种多址技术接入的比较 .....	(103)
4.3	超宽带发射信号的功率谱特性 .....	(106)
4.3.1	采用 TH 多址接入方式的超宽带系统功率谱分析 .....	(106)



4.3.2	跳时码及调制方式对功率谱的影响 .....	(107)
4.3.3	具有时间抖动的功率谱 .....	(110)
4.3.4	多径信道中 TH 信号的功率谱 .....	(113)
4.3.5	多进制调制对功率谱的影响 .....	(114)
4.4	本章小结 .....	(115)
	参考文献 .....	(116)
<b>第 5 章</b>	<b>脉冲信号接收技术</b> .....	<b>(118)</b>
5.1	RAKE 接收机 .....	(119)
5.1.1	RAKE 接收机的原理 .....	(120)
5.1.2	多径分集接收策略 .....	(121)
5.1.3	多径合并策略 .....	(123)
5.1.4	RAKE 接收机实际传输能力分析 .....	(124)
5.2	传输参考接收机 .....	(127)
5.2.1	简单 TR 接收机 .....	(127)
5.2.2	差分 TR 接收机 .....	(129)
5.2.3	平均 TR 接收机 .....	(131)
5.2.4	各种 TR 接收方式的比较 .....	(131)
5.3	频移参考接收机 .....	(133)
5.4	能量检测接收机 .....	(135)
5.4.1	基于 OOK 调制的能量检测接收机误码率性能分析 .....	(137)
5.4.2	基于 PPM 调制的差分能量检测接收机误码率性能分析 .....	(138)
5.4.3	能量检测接收机的优化 .....	(142)
5.5	能量检测系统的信号捕获 .....	(150)
5.5.1	信号捕获命中集的推导 .....	(151)
5.5.2	不同平均方式的分析 .....	(153)
5.5.3	数值与仿真结果比较 .....	(155)
5.6	本章小结 .....	(159)
	参考文献 .....	(160)
<b>第 6 章</b>	<b>超宽带天线原理及设计</b> .....	<b>(163)</b>
6.1	偶极场 .....	(163)
6.1.1	电偶极场 .....	(163)
6.1.2	磁偶极场 .....	(164)
6.1.3	偶极子的行为 .....	(165)
6.2	线天线和平面天线的时域特性及其实例 .....	(170)
6.2.1	分析的一些基本原理和假设 .....	(170)
6.2.2	实例 .....	(171)
6.3	超宽带天线的基本参数及其与传统天线的不同 .....	(175)
6.3.1	天线带宽 .....	(176)

6.3.2	天线 $Q$ 值 .....	(177)
6.3.3	超宽带天线和传统天线的不同 .....	(177)
6.4	典型超宽带天线 .....	(178)
6.4.1	TEM 喇叭天线 .....	(178)
6.4.2	双圆锥天线 .....	(180)
6.4.3	对数周期天线和螺旋天线 .....	(180)
6.4.4	分形天线 .....	(181)
6.4.5	缝隙天线 .....	(183)
6.5	本章小结 .....	(183)
	参考文献 .....	(185)
<b>第 7 章</b>	<b>超宽带技术的应用及其未来发展方向 .....</b>	<b>(187)</b>
7.1	超宽带技术的应用现状 .....	(187)
7.1.1	军事应用 .....	(188)
7.1.2	商业应用 .....	(189)
7.2	超宽带技术与无线传感器网络的完美结合 .....	(191)
7.2.1	无线传感器网络 .....	(191)
7.2.2	超宽带体制无线传感器网络中的关键技术 .....	(192)
7.3	测距与定位 .....	(193)
7.3.1	脉冲超宽带定位技术 .....	(193)
7.3.2	基于 TOA 测距的超宽带定位 .....	(198)
7.3.3	TOA 估计 .....	(200)
7.3.4	NLOS 问题的处理 .....	(205)
7.4	应用实例 .....	(208)
	参考文献 .....	(213)

# 第1章 绪 论

随着社会的发展，人们对移动通信的需求也在日益提高。下一代无线通信技术要求在全球范围内实现无缝覆盖，同时可以进行包括语音、文本、图像、视频等在内的高速多媒体通信以及探测、定位、成像等中低速感知业务。目前无线通信技术从涵盖范围划分主要分为四大类，即无线个域网（Wireless Personal Area Network, WPAN）、无线局域网（Wireless Local Area Network, WLAN）、无线城域网（Wireless Metropolitan Area Network, WMAN）和无线广域网（Wireless Wide Area Network, WWAN），如图 1-1 所示。其中 WPAN 是为了实现活动半径小、业务类型丰富、面向特定群体、无线无缝连接而提出的新兴无线通信网络技术，可以在便携式移动计算机和家用电器（如数字摄像机、HDTV、数码相机、MP3 播放器、打印机、投影仪、PC、PDA 等）间进行短距离（10 m 以内）的通信。继蓝牙、Zigbee 和 RFID 等之后，超宽带也成为适用于 WPAN 的一项无线技术。

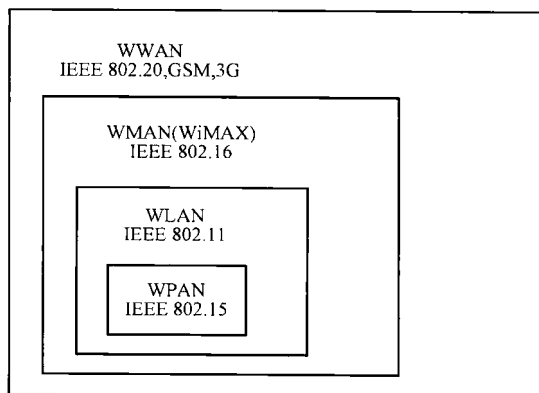


图1-1 无线通信网络层次示意图

为了解决这些问题，美国电子与电气工程师协会（Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE）802.15 工作组对无线个域网做出了定义和说明。802.15 工作组下一共设置了 7 个任务分组（Task Group, TG），其中 TG1 负责制定 802.15.1，处理基于蓝牙 v1.x 版本的速率为 1 Mb/s 的 WPAN 标准；TG2 负责制定 802.15.2，处理在公用 ISM 频段内无线设备的共存问题；TG3 负责制定 802.15.3，这个任务组的目标在于开发高于 20 Mb/s 速率的多媒体和数字图像应用，为了加强对更高速率的 WPAN 技术的研究，802.15 工作组先后成立了 TG3a、TG3b 和 TG3c 任务组；TG4 负责制定 802.15.4，这个任务组研究低数据传输速率的 WPAN 应用，先后发展了 TG4a、TG4b、TG4c、TG4d、TG4e 五个分支结构；TG5 负责制定 802.15.5，研究无线 Mesh 技术在 WPAN 中的应用；TG6 主要研究国家医疗管理机构批准的人体内部无线通信技术，目前还处于标准的研究制定阶段；TGrfid 负责研究 RFID 射频识别技术在 WPAN 中的应用。

在这些任务分组中，TG4 制定的 802.15.4 规范是一种经济、高效、低数据速率的无线技术，主要用于低速个域网（Low Rate WPAN, LR-WPAN），而非多媒体、图像等高速传输场合。这一方案的能耗和复杂度都很低，电池寿命可以达到几个月甚至几年，潜在的应用领域

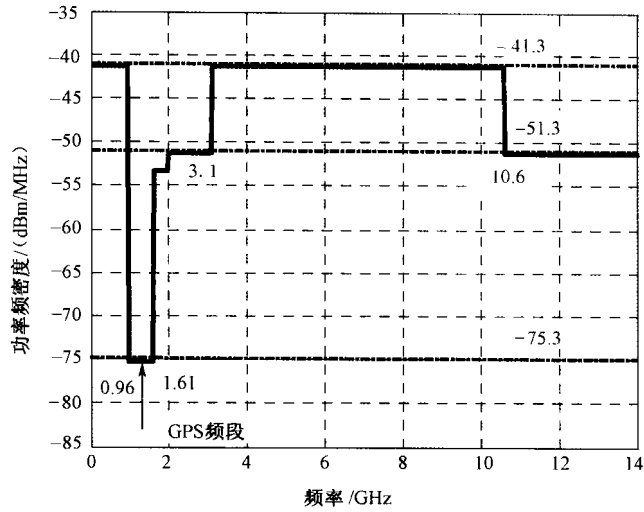
包括传感器、家庭自动化、工业控制、医疗监护等。TG4a 在 802.15.4 的基础上提出了 802.15.4a 标准，在物理层增加了对于高精度测距和定位能力的要求（精度小于 1 m），同时具备 2 Mb/s 的数据传输能力。TG4a 希望这些新增业务能够为市场和用户带来新的应用与机遇。802.15.4a 标准于 2007 年正式公布，脉冲超宽带（Impulse Radio—Ultra Wideband, IR-UWB）技术被选定为主要的物理层标准之一<sup>[1, 2]</sup>。

作为当前通信界的热门话题之一，脉冲超宽带无线技术不仅仅在 802.15.4a 低速通信标准中受到广泛关注，在其他领域也是研究的热点，因而出版的相应图书资料也不少，本书重点解决的是短距离、室内环境下，满足功耗小、体积小、价廉等要求的超宽带系统关键技术及应用场合的研究。

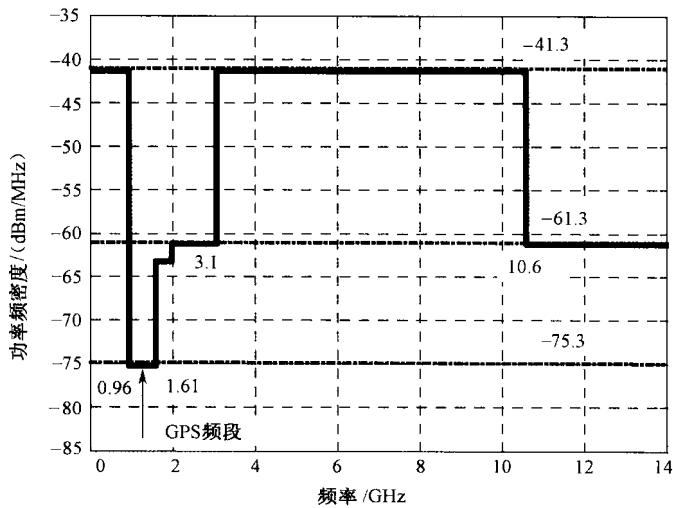
## 1.1 超宽带无线通信技术概述

超宽带技术最早可以追溯到 100 年前波波夫和马可尼发明越洋无线电报的时代，马可尼发明的火花隙发射器的信号就占据了很宽的频带。现代意义上的超宽带无线电，又称为冲激无线电（Impulse Radio, IR）技术，出现于 20 世纪 60 年代。冲激无线电技术出现之后的应用长期仅限于军事、灾害救援搜索、雷达定位及测距等领域。1978 年美国 Sperry 研究中心的 Ross 博士在 IEEE 期刊中以“时域电磁学”为标题对超宽带作了比较全面的综述，论述了超宽带信号波形的产生技术，时域处理方法与时域特征分析技术，相关的天线技术以及基带雷达技术等<sup>[3]</sup>。由于超宽带系统能够与其他窄带系统共享频带，从 80 年代开始，随着频带资源的紧张以及对于高速通信的需求，超宽带技术开始被应用于无线通信领域。Scholtz 在文献[4]中详细地综述了这种被称为“冲激无线电”技术的应用，以及该技术的优点和缺点，表明在同一个区域中冲激无线电通信系统可以容纳大量的用户，而且这种冲激无线电超宽带信号具有比窄带信号更强的抗多径能力，从而使超宽带在无线通信中的应用开始受到广泛的关注。超宽带技术在历史上还有一些其他的名称，如冲激雷达（Impulse Radar）、基带脉冲、无载波技术等，这是因为在早期超宽带信号通常是不用正弦载波调制的窄脉冲，上述名称反映了当时超宽带信号的这个典型特点。

2002 年，美国联邦通信委员会发布了超宽带无线通信的初步规范，正式解除了超宽带技术在民用领域的限制。这是超宽带技术真正走向商业化的一个里程碑，也极大地激发了相关学术研究和产业化进程。FCC 对于超宽带信号的定义为任意相对带宽大于 20% 或绝对带宽大于 500 MHz<sup>[5-7]</sup>，并满足 FCC 功率谱密度限制要求的信号。这里的相对带宽（Fractional Bandwidth）定义为  $(f_U - f_L) / [(f_U + f_L) / 2]$ ，其中  $f_U$  和  $f_L$  分别为发射天线输出 -10 dB 辐射点处所对应的高、低端频点。由上述定义可以看出，现在的超宽带技术包括了任何可以使用超宽带频谱的通信形式。由于其信号在频域上覆盖了很宽的频带，包括现在大多数无线通信系统的工作频段，因此在超宽带技术的发展过程中，FCC 等有关组织对超宽带系统的频谱提出了十分严格的规定，以避免对现有重要通信系统产生可能的干扰。FCC 一方面将超宽带系统的带宽限制在 3.1~10.6 GHz 频带内，另一方面对其辐射功率作出了比 FCC Part 15.209 更为严格的限制，将其等效各向同性辐射功率（Equivalent Isotropic Radiated Power, EIRP）限制在 -41.3 dBm/MHz 以下。对室内通信系统（Indoor Systems）和室外的手持超宽带通信设备（Hand-held Devices）的限制如图 1-2 所示<sup>[8, 9]</sup>。目前允许的超宽带应用中大多数采用的信号已是经过载波调制的信号，或者通过波形设计以及滤波等处理后频谱符合有关规定的信号。



(a) 室内模板



(b) 室外模板

图1-2 FCC规定的超宽带系统有效全向辐射功率限制

## 1.2 脉冲超宽带的特点与优势

超宽带通信系统的实现方式可以分为脉冲无线电和载波调制方式。前者为传统的超宽带通信方式，后者是 FCC 规定了通信频谱的使用范围和功率限制后，在超宽带无线通信标准化过程中逐渐提出来的，是目前主流的宽带无线技术的延伸。常见的超宽带通信体制有三种：脉冲无线电（IR），直接序列扩频超宽带（Direct Sequence Ultra Wideband, DS-UWB）和多带正交频分多路复用（Multi-Band OFDM Alliance, MBOA）。本书重点研究脉冲超宽带技术，后文中提到的超宽带技术如无特殊说明，均是指基于冲激无线电的脉冲超宽带技术。

脉冲超宽带是超宽带通信最经典的实现方式，通信时利用宽度在纳秒或亚纳秒级别的、具有极低占空比的基带窄脉冲序列携带信息。发射信号是由单脉冲（Monocycle）信号组成的时域脉冲序列，无须经过频谱搬移就可以直接辐射。脉冲超宽带具有很多吸引人的特性和优点，在军事应用、航空航天以及民用和商用上具有巨大的潜力，引起了人们广泛的关注。其主要特性和优点如下所述。

## 1. 潜在的支持高数据速率或系统容量的能力

由于超宽带脉冲的时域持续时间比较短，可以通过调整跳时多址接入方式中的占空比或者是 DS 多址接入方式中的序列长度来实现数据传输速率的变化。当需要高速传输时，可以提高脉冲信号的占空比或降低 DS 的序列长度。但是，在密集多径环境中时需要解决多径能量收集的问题才能真正实现高数据速率的传输，否则随着数据传输速率的增加，多径之间的相互影响增大，会极大地限制超宽带系统的峰值传输速率以及对应的系统容量。

近些年来，随着无线通信技术的不断发展以及人们对于传输速率和通信质量要求的提高，频谱资源变得越来越宝贵，因此提出了“空间容量”的概念用以衡量单位面积的传输效率，其定义为：单位区域上传输的数据速率，单位是比特每秒/米<sup>2</sup>（bps/m<sup>2</sup>），该项指标越高，单位区域提供的数据比特率越大，则单位面积的传输效率就越高，这个指标特别适合于评价拥挤空间的无线通信系统，而超宽带系统在这方面具有很强的潜力。现有分析表明 IEEE 802.11b 的空间容量为 1 kbps/m<sup>2</sup>，“蓝牙”（Bluetooth）的空间容量为 30 kbps/m<sup>2</sup>，IEEE 802.11a 的空间容量为 83 kbps/m<sup>2</sup>，超宽带无线的空间容量则为 1000 kbps/m<sup>2</sup>。直观的比较如图 1-3 所示<sup>[10]</sup>。

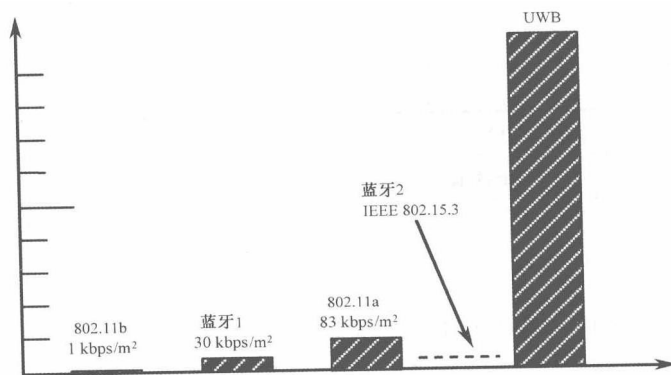


图1-3 空间容量的比较

## 2. 定位精度高，探测能力强<sup>[11, 12]</sup>

超宽带信号的时间分辨能力直接决定了信号到达时间（Time of Arrival, TOA）估计的精确度，通常使用克拉美-劳下界（Cramer-Rao Low Bound, CRLB）来衡量。在加性白高斯噪声（Additive White Gaussian Noise, AWGN）情形下，超宽带信号时延估计的 CRLB 在文献 [13] 中已经给出：

$$\sigma_{\tau}^2 \geq \frac{1}{8\pi^2 F_B^2 \cdot \text{SNR}} \quad (1-1)$$

其中， $\sigma_r$ 表示估计误差的标准偏差； $F_B$ 是测距信号的带宽；SNR是信噪比。超宽带信号的带宽可以达到几GHz，因此能够实现厘米级的定位精度。此外，极窄的脉冲宽度使得脉冲超宽带信号具有很高的探测和成像能力<sup>[14-16]</sup>。

### 3. 共享频谱资源

无线通信技术日益发展的今天，频谱资源日趋紧张。超宽带系统分配的带宽为3.1~10.6GHz，而功率谱密度仅为-41.3dBm/MHz，仅和FCC规定的一台个人计算机允许的辐射相当。工作在如此低的功率谱密度下可以有效避免对其他系统的干扰，从而达到频谱资源共享的目的。

### 4. 穿透能力强

脉冲超宽带信号具有很强的穿透树叶和障碍物的能力，有希望被用来解决常规无线电波信号在丛林中不能传播的难题；它还能实现隔墙成像，与同样具有GHz级带宽的无线电技术相比，脉冲超宽带无线通信信号有更强的穿透力。

### 5. 低截获、抗干扰、保密性好

超宽带系统的发射功率很低，频谱很宽，因此功率谱密度非常低，甚至低于环境噪声电平，很难被基于频谱搜索的电子侦测设备截获。同时，如果超宽带信号采用扩频通信的跳时技术或者直接序列扩频技术，接收机只有已知发送端的扩频码才能解调出发射数据，进一步提高了其保密性能。此外，超宽带信号的占空比极低，可以通过时间窗滤除干扰信号，从而达到增强系统的抗干扰能力和可靠性的目的。

### 6. 低成本、低功耗

脉冲超宽带系统的射频前端、模拟以及数字信号处理部件都相对比较简单，容易实现全数字化的结构，因而可以大大降低成本。为了避免干扰窄带无线系统，FCC规定的超宽带发射功率受到严格的限制，频谱宽度为1.5GHz的UWB通信系统，其总的等效全向辐射功率不超过-9.54dBm，具有非常低的电磁辐射水平，低的发射功率以及简单的发射接收设备，使得脉冲超宽带的功耗也非常低，只要很低的电源功率就能正常工作，非常适合于电池供电的设备。

从以上特点可以看出，脉冲超宽带技术满足低速率WPAN对物理层基本的业务要求，在IEEE 802.15.4a标准中，明确提出使用脉冲超宽带技术作为物理层标准也正是基于上述原因。此外，在高速通信以及传感（含定位、测距、成像等）/通信一体化领域，脉冲超宽带技术也体现出其独特的优势。

## 1.3 本书后续章节的安排

本书重点研究的是脉冲体制的超宽带技术，因此需要考虑“脉冲”所具有的非连续波、低占空比等特性，以及对设备的体积小、简单、功耗低、重量轻，尽可能简化设备结构，不

使用复杂技术等要求, 针对传感(含定位、测距、成像等)/通信一体化的无线通信系统这一功能定位, 构建室内、短距离、高速的通信环境。本章已经给出了超宽带技术的特点与优势, 在后续章节中将从系统论的角度, 对超宽带系统中的关键技术进行多种参数折中优化的讨论和论述, 其具体研究内容如下:

由于超宽带系统一般应用于短距离范围内且用以携带信息的脉冲波形是低占空比的窄脉冲, 因此其信道传输特性和传统窄带系统有很大的不同, 找到适用于超宽带系统的信道传输模型也就成为很多研究人员关注的焦点。本书的第 2 章介绍了超宽带信道的时域及频域两种测量方法, 并结合美国南加州大学的时域测量和 Intel 公司的频域测量实例及数据阐述了测量数据的后期处理过程。在介绍信道测量的基础上, 阐述了信道的路径损耗模型、多径分布模型及相关的信道统计参量等重要的概念, 在此基础上介绍了目前超宽带的室内信道标准 IEEE.15.3a 信道模型, 并对其后续的半确定改进模型(双簇模型)的研究进行了介绍。

作为超宽带核心技术之一的脉冲波形将在第 3 章中进行介绍。第 3 章中首先给出了脉冲超宽带系统中的脉冲波形应该满足的基本要求和增强要求; 然后在介绍了现有超宽带系统中通常使用的高斯函数及其变形之后, 又分别介绍了几种不同类型的脉冲波形及其设计方法, 并重点针对两种具有最优性能的波形设计方法: 半正定规划方法以及正交展开方法, 进行了详细的分析和仿真; 最后对比了不同的波形对于基本要求和增强要求的满足情况, 并给出了不同波形适用的范围。

调制和多址方式是任何通信系统均不可或缺的, 第 4 章对这两个关键技术分别进行了介绍。首先给出了脉冲幅度调制、脉冲位置调制、脉冲波形调制以及  $M$  进制双正交键控等几种调制方式的结构框图以及对应在加性高斯白噪声信道下的误码率; 然后介绍了跳时多址接入、直接序列多址接入以及脉冲波形多址接入等几种多址接入方式; 最后对超宽带系统的功率谱密度特性进行了介绍。

由于超宽带接收机对复杂性要求较高, 因此在第 5 章中首先分别介绍了具有最好接收效果的 RAKE 接收机、性能次最优, 但是可以降低接收机复杂度的传统 TR 接收机、频域参考接收机以及接收机复杂度最低的能量检测接收机。通过分析发现, 能量检测接收机凭借其简单的结构和可接受的系统性能成为比较适合室内应用的接收方案。同时, 给出了能量检测接收机信号捕获理论的基本方法和相应计算公式, 并对不同计算方式下的性能进行了比较, 为超宽带系统的工程应用提供了理论依据。

超宽带信号的发射需要频带很宽的超宽带天线, 但是现有天线远远不能满足这一要求, 因此对超宽带天线的研究也是非常必要的。在第 6 章中首先给出了超宽带天线发送和接收超宽带信号的过程, 分析了超宽带天线同传统天线的不同点; 然后, 介绍了一些常见的超宽带天线及其特性, 最后以两个实例比较了超宽带窄脉冲信号和传统的正弦波信号在天线上所表现出的截然不同的特性。

最后一章给出了超宽带系统的应用现状及未来的发展方向。其中主要介绍了目前应用得最为成熟的超宽带定位测距以及其中涉及到的一些关键问题。此外, 也对一些现有的应用实例如超宽带定位标签, 家电设备和便携设备之间的无线数据连接, 车载雷达, 地下物体探测和医疗应用等方面作了简要介绍, 有利于人们对于超宽带的未来应用前景有一个很好的把握。



## 参 考 文 献

- [1] K. Liu, X. Shen, R. Zhang, et al. Performance Analysis of Distributed Reservation Protocol for UWB-based WPAN[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2):902-913.
- [2] C. Chong, S. Yong. UWB Direct Chaotic Communication Technology for Lowrate WPAN Applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(3):1527-1536.
- [3] C. Bennett, G. Ross. Time-domain Electromagnetics and its Applications[J]. Proceedings of the IEEE, 1978, 66(3):299-318.
- [4] M. Z. Win, R. A. Scholtz. Impulse Radio: How it Works. IEEE Communications Letters. 1998,2(2): 36-38.
- [5] R. Scholtz, R. Weaver, E. Homier, et al. UWB Radio Deployment Challenges[C]//The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. London, UK, 2000, 1:620-625.
- [6] L. Yang, G. Giannakis. Ultra-wideband Communications: An Idea Whose Time Has Come[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, 21(6):26-54.
- [7] A. Tewfik, E. Saberinia. High Bit Rate Ultra-wideband OFDM[C] //IEEE Global Telecommunications Conference. Taipei, 2002, 3:2260-2264.
- [8] F. C. Commission. Rule Part15[M]. 2002. [http://ftp.fcc.gov/oet/info/rules/part15/part15\\_12\\_8\\_03.pdf](http://ftp.fcc.gov/oet/info/rules/part15/part15_12_8_03.pdf).
- [9] 王石记. 脉冲超宽带信号能量收集及捕获研究[D]. 哈尔滨工业大学博士论文, 2006:1-17.
- [10] 王金龙, 王呈贵, 阚春荣, 徐以涛. 无线超宽带(UWB)通信原理与应用. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [11] S. Gezici, Z. Tian, G. Giannakis, et al. Localization via Ultra-wideband Radios: A Look at Positioning Aspects for Future Sensor Networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4):70-84.
- [12] I. Oppermann, L. Stoica, A. Rabbachin, et al. UWB Wireless Sensor Networks: UWEN - a Practical Example[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(12):S27-S32.
- [13] R. Cardinali, L. D. Nardis, P. Lombardo, et al. Lower Bounds for Ranging Accuracy with Multi Band OFDM and Direct Sequence UWB Signals[C]//IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Zurich, Switzerland, 2005:302-307.
- [14] J. Lee, R. Scholtz. Ranging in a Dense Multipath Environment Using an UWB Radio Link[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(9):1677-1683.
- [15] R. Zetik, J. Sachs, R. Thoma. UWB Localization - Active and Passive Approach [ultra Wideband Radar][C]//Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Como, Italy, 2004, 2:1005-1009.
- [16] L. Xu, E. Bond, B. V. Veen, et al. An Overview of Ultra-wideband Microwave Imaging via Space-time Beamforming for Early-stage Breast-cancer Detection[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2005, 47(1):19-34.