

王 丹 普杰信 杨 雷 著

超宽带无线通信系统信道估计技术



内 容 简 介

超宽带无线通信是短距离、高速无线网络最热门的物理层技术之一,在通信领域有着极为广阔的应用前景。信道估计可以克服由无线传输信道引起的失真效应,它不仅是超宽带无线通信系统的关键技术之一,也是无线通信信号处理中一个重要的研究方向。本书深入、系统地论述了超宽带无线通信系统中信道估计理论、算法以及一些理论方法之间的内在联系,总结了近年来国际上在该领域的研究进展,并综合了作者近年来的最新研究成果和见解。

本书具有体系结构新、内容选材广、创新程度高、可读性强等特点,可供从事通信、汽车雷达、电子对抗等领域的广大技术人员学习与参考,也可作为高等院校和科研院所信号与信息处理、信息与通信系统等专业的研究生教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

超宽带无线通信系统信道估计技术/王丹,普杰信,杨雷著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-034272-0

I. 超… II. ①王… ②普… ③杨… III. 宽带通信系统-无线电通信-通信信道 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 092137 号

责任编辑:汤 枫 张 宇 韩 默 / 责任校对:朱光兰

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 11 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 11 月第一次印刷 印张: 10 1/2

字数: 199 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

2002年,美国联邦通信委员会通过了超宽带(ultra wideband, UWB)技术可以进入商业应用的协议,并批准了它在通信系统、汽车雷达系统和遥控系统中的使用,点燃了工业界、大学、政府部门对UWB技术研究和开发的热情。2004年,美国有线新闻网将其评选为本年度十大热门技术之首。目前,UWB无线通信已成为短距离、高速无线网络最热门的物理层技术之一。然而,由于实际通信环境的不理想,无线信道的衰落效应限制了UWB系统的误码率性能、吞吐量、容量和网络灵活性。如果信道条件已知,那么由传输信道引起的失真效应,通常可以在接收机得到补偿。尽管传统通信系统采用非相干检测避免了复杂的信道估计,从而简化接收机设计,但对于高斯白噪声信道而言,非相干检测比相干检测有高达3dB左右的性能损失,而在具有大时延扩展的UWB信道中,性能损失可能会更加严重。因此,信道估计,即如何准确恢复信道状态信息,是UWB通信系统的关键技术之一,也是无线通信信号处理中的一个重要研究方向,在通信领域有着极为广阔的应用前景。

本书是关于信道估计理论与算法的一部专著,全书共由10章组成。

第1章主要介绍了UWB无线通信系统的特点、挑战以及目前的研究现状、研究热点与关键技术,使读者能够了解UWB无线通信系统的通信环境和特点。

第2章介绍了窄带无线通信系统信道模型和UWB无线通信系统信道模型的特点,比较了传统窄带通信信道和UWB无线通信信道的不同,并介绍了两种标准UWB信道模型的特性,为后续章节作铺垫。

第3章介绍了传统无线通信系统的信道估计算法,包括非盲信道估计方法、盲信道估计方法、半盲信道估计方法,以及将分形、小波、Bootstrap和鲁棒估计等理论应用于信道估计中的一些方法,并对其特点和性能进行了分析。

第4章全面评述了UWB无线通信系统的信道估计方法,并分析了传统通信系统和UWB系统信道估计算法的特点,使读者具有一定的专业基础知识,并了解UWB信道估计技术的最新进展。

第5章介绍了基于一阶统计量信道盲估计方法。首先重点介绍了多脉冲跳时脉位调制UWB信号结构的盲信道估计方法,并基于此类估计器提出了一种高速的UWB信号传输方案,并研究了高速传输方案下基于一阶统计量的信道盲估计方法,并对信道估计算法的性能进行了分析。然后,基于空时分集提出了一种UWB多天线收发信机结构,给出了相应的检测算法,并将基于一阶统计量的频域

盲信道估计方法经过修改后推广到多天线系统框架下。

第6章主要介绍了基于二阶统计量的盲信道估计方法。着重讨论了基于单人多出互关系子空间模型的盲信道估计方法,包括多信道牛顿、多信道最小均方盲自适应估计方法及变步长多信道最小均方盲自适应估计方法,提出了基于逆乘幂法的迭代子空间盲信道估计方法、基于扰动理论和泰勒级数的逆迭代子空间信道盲估计方法以及基于乘幂法的迭代子空间盲估计方法,并对其特点和性能进行了详尽的分析。

第7章探讨了信道幅度增益和延时联合估计的结构化估计方法。重点论述了基于最大似然准则的最优结构化信道估计方法以及次最优的连续干扰抵消估计算法、滑动窗相关估计算法的性能及特点,并提出了三种基于最小均方准则的结构化并行迭代调整非盲信道估计方法。

第8章介绍了估计信道幅度增益的非结构化估计方法。探讨了经典最小二乘信道估计方法、最小均方误差信道估计方法、傅里叶变换域信道估计方法(低通滤波最小二乘信道估计方法)、时域最大似然信道估计方法的性能及特点,提出了一种噪声方差信息的获得方法,并借助该信息提出了一种基于阈值滤波的低复杂度信道估计方法。

鉴于 UWB 无线通信系统和已有窄带通信系统的共存性,第9章讨论了窄带干扰下的非结构化信道估计方法,介绍了两类鲁棒信道估计方法,即当背景噪声功率和窄带干扰信息先验已知时修改或重新设计的线性信道估计器,以及基于鲁棒概念的在新代价函数下迭代求解的非线性信道估计器。其中,非线性信道估计器只需噪声方差信息,而对窄带干扰信息是盲的。最后提出了一种噪声方差和窄带干扰信息的获得方法,同时提出了一种基于条件中值滤波的低复杂度鲁棒信道估计方法。

由于将多天线技术和 UWB 技术相结合,系统可以获得更高的传输率和可靠性,从而带来更大的性能增益,所以本书的第10章讨论了多天线 UWB 系统下的信道估计方法。首先将多天线技术应用到单载波频域均衡 UWB 系统中以获得频率分集和空间分集。然后,使用高斯约化码间干扰的方法,对接收机条件误码率性能进行理论分析。最后,将单发射天线系统下基于最大似然准则的信道估计和噪声方差估计方法推广到新 UWB 传输方案中。

本书的出版获得河南科技大学学术著作出版基金、河南科技大学博士科研启动基金(09001409)、国家自然科学基金(61101167)、航空科学基金(20110142002)、河南省科技攻关计划项目(112102210431)及河南科技大学青年科学基金项目(2010QN0019)的资助。

本书的研究内容主要来自作者的博士论文以及在国家自然科学基金等项目资助下开展研究的内容。作者在攻读博士学位期间,在通信信号处理领域得到了

导师蒋铃鸽教授开拓性的指导,在此向她表示由衷的感谢。最后,作者还要将此书和谢意献给敬爱的父母、爱人以及女儿,有了他们在生活上的支持,本书的撰写才能顺利完成。

由于作者水平有限,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2012年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 UWB 无线通信	1
1.1.1 UWB 定义及工作频段	1
1.1.2 UWB 技术的标准化进程	3
1.1.3 UWB 的特点与挑战	3
1.1.4 UWB 技术的应用	6
1.2 研究现状	7
1.3 研究方案	10
1.4 研究热点与关键技术	11
1.5 本章小结	15
参考文献	15
第 2 章 传统无线信道和 UWB 信道模型	19
2.1 衰落信道特性和建模	19
2.1.1 平坦衰落信道模型	20
2.1.2 频选衰落信道模型	20
2.2 UWB 信道与传统无线信道的比较	21
2.3 UWB 信道模型及分类	22
2.3.1 IEEE 802.15.3a 标准信道模型	23
2.3.2 IEEE 802.15.4a 标准信道模型	24
2.4 本章小结	26
参考文献	26
第 3 章 窄带或宽带通信系统信道估计方法	27
3.1 非盲信道估计方法	27
3.1.1 经典的信道幅度增益和延时联合估计的方法	28
3.1.2 经典信道幅度增益估计方法	29
3.2 盲信道估计方法	29
3.3 半盲信道估计方法	31
3.3.1 基于 SOS 的半盲估计方法	31
3.3.2 基于 FOS 的半盲估计方法	32

3.4 其他信道估计方法	32
3.4.1 分形理论和小波理论	32
3.4.2 Bootstrap	33
3.4.3 鲁棒的信道估计方法	33
3.5 本章小结	33
参考文献	34
第4章 UWB 无线通信系统信道估计方法	37
4.1 基于脉冲 UWB 系统信道估计方法	37
4.1.1 非盲的 UWB 信道估计方法	37
4.1.2 盲 UWB 信道估计方法	39
4.1.3 半盲 UWB 信道估计方法	42
4.2 基于 MBOFDM UWB 系统信道估计方法	42
4.3 基于 SC-FDE UWB 系统信道估计方法	43
4.4 本章小结	43
参考文献	44
第5章 基于 FOS 信道盲估计方法	47
5.1 单天线多脉冲波形 TH-PPM UWB 收发信机	48
5.1.1 系统模型	48
5.1.2 基于 FOS 盲信道估计算法	49
5.1.3 信号检测算法	50
5.1.4 仿真	51
5.2 多天线 TH-PPM UWB 系统收发信机	53
5.2.1 系统模型	53
5.2.2 基于 FOS 的 MIMO-UWB 信道盲估计方法	55
5.2.3 仿真	56
5.3 本章小结	58
参考文献	58
第6章 基于 SOS 的 CR 子空间盲估计方法	60
6.1 SIMO 信道盲估计问题描述	60
6.1.1 SIMO 系统模型	60
6.1.2 可辨识性条件	61
6.1.3 基于 SOS 盲信道辨识问题描述	61
6.1.4 经典 SS 估计方法	62
6.2 CR 子空间自适应信道盲辨识算法	63
6.2.1 基于 CR 子空间盲信道问题描述	63

6.2.2 自适应 MCLMS 盲估计算法	65
6.2.3 自适应 MCN 盲估计算法	66
6.2.4 自适应变步长 MCLMS 盲估计算法	67
6.2.5 仿真	69
6.3 CR 子空间批处理盲估计方法	72
6.3.1 SVD 批处理盲估计方法	72
6.3.2 基于逆乘幂法的迭代方法	73
6.3.3 基于扰动理论和泰勒级数的迭代方法	74
6.3.4 基于乘幂法的迭代方法	74
6.3.5 算法 MSE 性能分析	74
6.3.6 算法复杂度性能分析	77
6.3.7 算法收敛性能分析	78
6.3.8 仿真	78
6.4 本章小结	84
参考文献	85
第 7 章 幅度增益和延时联合估计的结构化估计方法	87
7.1 脉冲 UWB 系统数学模型	87
7.2 经典结构化信道估计方法	89
7.2.1 ML 估计方法	89
7.2.2 SW 估计方法	90
7.2.3 SC 估计方法	91
7.3 迭代结构化信道估计方法	92
7.3.1 基于延时迭代调整的估计方法	92
7.3.2 基于幅度迭代调整的估计方法	93
7.3.3 基于迭代调整的混合估计方法	93
7.4 算法复杂度性能分析与比较	95
7.5 仿真	97
7.6 本章小结	101
参考文献	102
第 8 章 信道幅度增益的非结构化估计方法	103
8.1 SC-FDE UWB 系统数学模型	104
8.2 经典非结构化信道估计方法	105
8.2.1 频域 LS 估计方法	105
8.2.2 频域 MMSE 估计方法	106
8.2.3 时域 ML 估计方法	106

8.3 频域 LS 信道估计改进方法	107
8.3.1 LPF 频域 LS 估计方法	107
8.3.2 信道子空间噪声抑制频域 LS 估计方法	107
8.4 噪声方差信息辅助的 TFLS 估计方法	108
8.4.1 噪声方差估计算法描述	108
8.4.2 TFBCE 方法	111
8.5 算法复杂度分析与比较	114
8.6 仿真	115
8.7 本章小结	119
参考文献	120
第 9 章 NBI 下的非结构化信道估计方法	122
9.1 NBI 下的 SC-FDE UWB 系统数学模型	122
9.2 经典鲁棒的非结构化信道估计方法	124
9.2.1 修改或重新设计线性信道估计方法	124
9.2.2 基于鲁棒概念的非线性估计方法	126
9.3 基于 CMF 的低复杂度鲁棒信道估计方法	128
9.3.1 基于 LS 信道估计 NBI 检测的 CFAR 问题建模	128
9.3.2 基于次序统计量的鲁棒噪声方差估计方法	130
9.3.3 噪声方差信息辅助的 CMF 信道估计方法	132
9.4 方法复杂度比较	134
9.5 仿真	135
9.6 本章小结	139
参考文献	140
第 10 章 多天线 SC-FDE UWB 系统下信道估计方法	142
10.1 SC-FDE UWB MIMO 传输方案	142
10.1.1 发射方案	142
10.1.2 频域均衡	143
10.2 条件 BER 性能分析	145
10.3 信道及 SNR 估计算法	146
10.3.1 基于 ML 的信道估计算法	147
10.3.2 多天线系统下导频序列优化	148
10.4 仿真	148
10.5 本章小结	153
参考文献	153
缩略语说明	155
公式符号说明	157

第 1 章 绪 论

本章介绍 UWB 无线通信的研究背景、意义和现状,重点介绍 UWB 无线通信系统的特点与挑战,以及目前的研究热点与关键技术。

1.1 UWB 无线通信

随着 Internet 的迅速发展和个人对数据通信需求的快速增长,全球通信产业技术的发展呈现三大趋势:无线化、宽带化和 IP 化。互联网业务的发展推动了市场对宽带网络的需求。在众多的宽带技术中,无线技术尤其是移动通信技术成为近年来通信技术市场的最大亮点,是构成未来通信技术的重要组成部分^[1]。

UWB 技术是目前正被广泛研究的一种新兴无线通信技术。与其他无线通信技术相比,UWB 技术具有许多优点:传输速率高、系统容量大、抗多径能力强、功耗低、成本低。它可通过改变脉冲的幅度、间距或者持续时间来传递信息。与窄带收发信机和蓝牙收发信机相比,脉冲的 UWB 不需要产生正弦载波信号,可以直接发射冲激脉冲序列,因而具有很宽的频谱和很低的平均功率,有利于与其他系统共存,提高频谱利用率。

UWB 技术起源于脉冲通信,发展模式类似于 Wi-Fi,最初主要用于军事领域。近年来,UWB 技术开始用于民用高速、近距离无线通信领域,并取得了较快发展。UWB 无线通信技术可广泛用于军事、国家安全、环境科学、交通管理、反恐维和、灾害预测和智能城市建设等领域,尤其适用于室内等密集多径场所的高速无线接入和军事通信应用中。

目前,UWB 技术发展呈现良好势头,它已经在国际上掀起了研究热潮。2004 年美国有线新闻网将其评选为本年度十大热门技术之首。2006 年年底,美国电气电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronic Engineers,IEEE)的信号处理协会也针对 UWB 性能极限问题举办了专题征稿。可以预计,UWB 技术的发展和广泛应用,将对人们的社会生活和产业变革带来极大的影响和巨大的推动。

1.1.1 UWB 定义及工作频段

虽然对 UWB 信号的描述并不详细,但这项技术有别于传统的“窄带”或“宽带”系统。主要有两方面的区别:一是 UWB 的带宽,它明显大于目前所有通信技术的带宽;二是 UWB 典型的用于无载波应用方式(指脉冲 UWB 系统)。传统的

“窄带”和“宽带”都是采用无线电频率载波来传送信号,频率范围从基带到系统被允许使用的实际载波频率。相反,UWB的实现方式是能够直接地调制一个大的激增和下降时间的“脉冲”,这样所产生的波形占据了几个GHz的带宽。

目前,美国联邦通信委员会对UWB设备带宽的规定为^[2]: -10dB 相对带宽大于0.2或占用带宽大于500MHz。对于中心频率高于2.5GHz的UWB设备和信号,其 -10dB 占用带宽必须大于500MHz,而中心频率低于2.5GHz的UWB设备和信号,其 -10dB 相对带宽至少为0.2。也即

$$2 \frac{f_{\text{high}} - f_{\text{low}}}{f_{\text{high}} + f_{\text{low}}} > 0.2 \quad (1.1.1)$$

其中, f_{high} 和 f_{low} 分别为UWB信号在 -10dB 带宽处的最高频和最低频,它们定义了信号的带宽。图1-1中的“标准Part 15 极限”是美国联邦通信委员会设置的UWB信号最大发射水平。

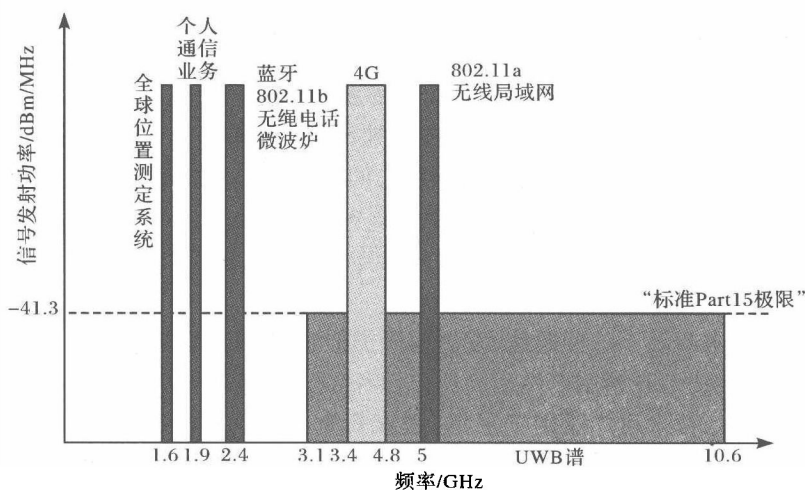


图 1-1 UWB 系统中的谱分配

美国联邦通信委员会将UWB工作频段定义为3.1GHz以上,3.1GHz以下频段系统有2G/3G蜂窝移动通信系统、个人通信业务、无线局域网系统、蓝牙和全球位置测定系统(global positioning system,GPS)等。IEEE的802.11a无线局域网系统则工作在5.2GHz频段上。最近,日本总务省已开始着手修改通信用UWB无线系统的技术条件。用于通信的UWB使用频段包括3400~4800MHz低频段和7250~10250MHz的高频段。其中,3400~4800MHz频段有可能被用于第四代移动通信系统(4th generation,4G)。

1.1.2 UWB 技术的标准化进程

在国际上占主要地位的 UWB 设计方案主要包括直接序列(direct sequence, DS)码分多址(code division multiple access, CDMA)-UWB 方案和多载波正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)-UWB 方案。DS CDMA-UWB 是基于脉冲的 UWB 方案;OFDM-UWB 是基于多载波的 UWB 方案,采用 OFDM 技术传输子带信息。两种技术方案各有优缺点。由于这两大技术阵营的对立,使得 UWB 技术的标准化陷入僵局。2006 年 1 月,IEEE 负责 802.15.3a UWB 标准的任务小组经全体投票一致通过决定解散并将权利放逐市场,消费者将自己选择他们认为最方便、最实用的技术。2007 年 3 月,WiMedia 联盟的多带(multi-band, MB)-OFDM 标准最终通过国际标准化组织认证,正式成为第一个 UWB 的国际标准。而 IEEE 802.15.4a 工作组制定的是低速 UWB 标准,成立于 2003 年。目前 4a 已通过了采用 chirp 扩展频谱传输技术的标准,其工作在 2.4GHz 频段,速率可达 1Mbit/s。

尽管 UWB 论坛阵营已经解散,飞思卡尔仍然在推动着其相关产品无线 USB 的生产和发展。对此,我国 UWB 通信技术研究的先行者——东南大学的毕光国教授也表示,基于 UWB 论坛倡导的 DS-CDMA 标准的产品在 UWB 真正标准化之前,仍然有一定的市场。另外,毕教授还介绍了另外一种高速 UWB 方案,即 C-Wave,是由 Pulse-Link 公司推出的定位于家庭多媒体网络应用,它既可以以基带方式工作也可以以载波调制带通方式工作;既可应用于无线网络,也可用于有线(电力线、电缆)网络,还可应用于有线无线混合应用的场合。因此,将来 C-Wave 对 WiMedia 联盟的 MB-OFDM UWB 有一定的竞争性,也有一定的互补性。因此,UWB 在产业化道路上依然面临巨大的挑战,终端应用成为最后的战场。

1.1.3 UWB 的特点与挑战

由于 UWB 技术具有传输速率高(达 1Gbit/s)、抗多径能力强、功耗低、成本低、穿透能力强、低截获概率和与现有其他无线通信系统共享频谱等特点,目前已成为无线个域网的首选技术。随着 UWB 新技术的发展和进步,无线多媒体应用越来越普及,UWB 在消费电子领域、通信领域将获得大规模应用。开发 UWB 的大规模应用将成为业界竞相追逐的技术新热点,将为产业链、各环节创造效益。但目前 UWB 在发展中仍存在频率管制、理论体系不完善、技术实现及其他无线技术带来的竞争等难题。

1. UWB 技术的优点

① 低成本和低功耗。脉冲 UWB 不需要正弦波调制和上下变频,也不需要本

地振荡器、功放和混频器等,因此体积小,系统的结构比较简单。UWB 信号的处理也比较简单,只需使用很少的射频或微波器件,射频设计简单,系统的频率自适应能力强。可以将脉冲发射机和接收机前端集成到一个芯片上,再加上时间启动器和控制器,就可以构成一部 UWB 通信设备。因此,它的成本可以大大降低。一般 UWB 系统只需要 50~70mW 的电源,是蓝牙技术的十分之一。

② 隐蔽性好。由于脉冲 UWB 信号采用了跳时扩频,其射频带宽可以达到 1GHz 以上,它的发射功率谱密度很低,信号隐蔽在环境噪声和其他信号之中,用传统接收机无法接收和识别,必须采用与发端一致的扩频码脉冲序列才能进行解调,因此增加了系统的安全性。另一方面,由于能量密度低,UWB 设备对于其他设备的干扰就非常低。

③ 脉冲 UWB 信号的衰落比较低,有很强的抗多径衰落能力。UWB 信号的高带宽带来了极大的系统容量,由于脉冲 UWB 无线电信号发射的冲激脉冲占空比极低,所以系统有很高的增益和很强的多径分辨力。UWB 扩频处理增益主要取决于脉冲的占空比和发送每个比特所用的脉冲数。脉冲 UWB 信号的占空比一般为 0.001~0.01,具有比其他扩频系统高得多的处理增益,抗干扰能力强。

④ 由于脉冲 UWB 信号的扩频处理增益比较大,即使采用低增益的全向天线,也可使用小于 1mW 的发射功率实现几公里的通信。如此低的发射功率延长了系统电源的使用时间,非常适合移动通信设备的应用。有研究表明,使用 UWB 的手机待机时间可以达 6 个月,而且低辐射功率可以避免过量的电磁波辐射对人体的伤害。

⑤ 系统容量大。由香农公式^[3]可以看出,在带宽变化的一定范围内,带宽增加使信道容量的提高远远大于信号功率上升所带来的效应,这一点也正是提出 UWB 技术的理论机理。UWB 无线电系统用户数量大大高于 3G 系统。

⑥ 高速的数据传输。UWB 系统使用上吉赫兹的超宽频带,根据香农信道容量公式,即使把发送信号功率密度控制得很低,也可以实现高的信息速率。一般情况下,其最大数据传输速度可以达到几百兆比特每秒到吉比特每秒。

⑦ 定位精确。冲激脉冲具有很高的定位精度,采用 UWB 无线电通信,可在室内和地下进行精确定位,而 GPS 定位系统只能工作在 GPS 定位卫星的可视范围之内。与 GPS 提供绝对地理位置不同,超短脉冲定位器可以给出相对位置,其定位精度可达厘米级。

2. UWB 技术所面临的挑战

尽管 UWB 技术拥有上述的优越性,但还有诸多技术的问题亟待解决。因此,在 UWB 的部署上仍然存着许多技术上的挑战^[4~7]。

① 接收波形的失真。每个独立延时传播径的接收波形失真使得接收信号固有的径分集难以获得^[4]。如何克服接收波形的失真并有效地发挥 UWB 系统潜在的优势是我们所面临的挑战之一。

② 放大器设计的挑战。UWB 无线电中主要的执行挑战之一就是有效的放大器设计。其困难在于大部分现有放大器的有限增益带宽和 UWB 信号的带宽相比不足,因此,要使放大器拥有足够的带宽以通过宽带接收信号且不产生失真,并且获得合理的增益,但目前实现上还很困难。文献[5]给出了一种 UWB 放大器设计的方法。其设计思想是:使新的性能标准,即有效的噪声指数最小。在数字译码过程之后,有效的噪声指数可对放大器导致的接收机性能下降进行测量。此外,UWB 的实用装置还要面临天线设计和脉冲成型等问题。

③ 天线设计。一般来说,便携式通信设备要求很小和不易受损的天线,可以集成到设备中,能够在不同的环境下有效工作。有效天线的设计和实施,也是 UWB 系统设计中的挑战之一。

④ 与有线系统的融合。由于 UWB 传输距离非常有限,在很多家庭应用中必须与有线系统结合才能发挥作用,这就使其无论在产品设计阶段还是在实际环境的安全保护工作中,都需要考虑到与有线系统融合后的情况。

⑤ 干扰问题。干扰问题始终是制约民用 UWB 技术发展和应用的一个重要问题。美国联邦通信委员会规定 UWB 设备主要的工作频段将位于 3.1GHz 至 10.6GHz 之间,其发射功率限制在 -41.3dBm/MHz 以下。而在此频段以外实行更为严格的功率控制标准。除了要考虑对已有通信系统的干扰外,还要考虑对已有非通信业务,如对 GPS、全球移动通信、802.11 业务等可能产生的干扰。除美国联邦通信委员会之外,日本在 2006 年提出了自己的 UWB 频率范围和发射功率控制标准。另外,来自于其他无线通信系统的信号对 UWB 接收机的带内干扰问题亦不容忽视。UWB 设备极低的发射功率谱密度使得接收机易受到噪声和干扰的影响。这是我们所面临的第五个挑战。

⑥ 不完善的理论体系。迄今为止,UWB 理论体系还不完善。关于其工作原理和特性还有很多疑问,如 UWB 信号传播特性、信道模型、解决多径传播以及 UWB 信号处理理论等,而这些问题对 UWB 系统的设计和应用至关重要^[6]。

⑦ 系统复杂性。尽管 UWB 系统有内在的强健性抵抗多径,但也不是完全不受影响。极端信号传播情况会引起室内环境存在大量的多径,导致传播时延持续 10 毫秒至几百毫秒。这引起的码间干扰限制了系统的最大数据速率,除非有一种有效的方法可以用来减轻这些影响。在快速脉冲调制技术下实现有效均衡的成本很高。UWB 还需要多个并行检测器或者高阶调制,因此系统复杂性是另外一个挑战。

1.1.4 UWB 技术的应用

根据 UWB 上述的优点,该技术主要可应用在军事、定位和无线通信领域。无载波脉冲式的 UWB 具有较强的透视功能,可以穿透数层墙壁进行通信、成像或定位。因此,利用 UWB 技术在军用通信、雷达探测、精确定位等方面也有其得天独厚的优势^[8,9]。在军用方面,主要应用于 UWB 雷达、战术手持、UAV/UGC 数据链、探测地雷和探测地下埋藏的军事目标或以叶簇伪装的物体等场合。在民用方面主要包括地质勘探及可穿透障碍物的传感器、汽车防冲撞传感器、穿墙和医用成像机监视设备和家电设备及便携设备之间的无线数据通信等。另外,UWB 技术在无线通信方面的创新性、利益性具有很大的潜力,在商业多媒体设备、家庭和个人网络方面极大地提高了一般消费者和专业人员的适应性和满意度。

1. 透视雷达

- ① 在消防上,UWB 设备可用于搜救火场内、废墟下的幸存者。
- ② 在勘探领域,UWB 技术可以探测地表以下数米深的物质。
- ③ 在军事上,UWB 技术为警察、特种部队士兵等制服藏匿于室内的持枪歹徒提供了强有力的先进工具。

2. 军事通信

现代战争中,通信已成为军队的神经网络,要使指战员在任何地点、任何时间获取信息,发挥最大的战斗效能,要靠移动通信来实现。由于 UWB 信号频谱极宽、功率谱密度低,因此隐蔽性强。又由于发射信号的低占空比特性,使得接收机仅在有信号的时间段工作,因此非常节能。如果合理选择波形和宽度就不会对现有通信系统造成干扰,是军用战术通信的一种良好的备选方案。此外,UWB 信号中的低频分量可以用于水下潜通信和透地精密雷达。总之,利用 UWB 技术可以实现雷达、定位和通信三种功能相结合的产品,便于移动和小型化,可作为战场上单兵装备^[10]。

3. 智能交通系统

UWB 系统的无线通信和优越的定位功能使得该技术方便地应用于智能交通系统^[9,11],为汽车防撞系统、路况探测、智能收费系统、测速和监视系统等提供高性能、低成本的解决方案。比如在汽车防撞系统中,装在汽车上的 UWB 设备不断地发射超短脉冲,测量本车和附近车辆的间距。一旦距离低于安全限下,UWB 设备就会通知汽车内的电脑系统,控制相应的悬挂系统,采取防撞措施。

4. 无线传感网络通信

基于冲激无线的 UWB 技术有许多固有的特性非常适合传感网络的应用^[12]。无线传感网通常要求传感器的功耗非常小,以便连续工作,甚至数年之久而无需充电。目前解决方案为通过设计媒体接入控制和网络层协议,尽量减少不必要的传输,有效地利用无线信道和能量资源。然后,物理层采用极低功耗的 UWB,即可大大简化媒体接入控制层和网络层的复杂度,使系统总体功耗进一步降低。文献[12]给出了 UWB 无线传感网应用于户外滑雪运动和生活方式上的实例。

5. 无线通信

UWB 传输技术不仅可应用于雷达和远距离探测应用中,而且也在无线通信中受到重视^[7,13~15]。近年来,UWB 无线通信成为短距离、高速无线网络最热门的物理层技术之一。正是凭借着短距离传输范围内的高传输速率及高精度度这一巨大优势,UWB 进入民用市场之初就将其应用定位在了无线局域网和无线个域网上。在小范围内进行高速通信,可以使人们摆脱线缆的束缚,使各种设备以高速无线进行连接。各种数字多媒体设备,如数码摄像机、MP3 播放器、数字电视、计算机、投影仪和各种智能家电等,根据需要在小范围内组成自组织式的网络,相互传送多媒体数据,并可通过安装在家中的宽带网关,接入 Internet 构成一个智能家居环境^[8]。由文献[16]知,如果采用无线的方式来进行传输,只有 UWB 技术可以满足各种应用的要求,且其所需的下载时间也最短。

1.2 研究现状

无线通信经历宽带、窄带到宽带的发展过程。UWB 最早的起源可追溯到一个多世纪以前,马可尼采用火花隙作为载波进行人类最早的无线通信。火花隙实际上就是带宽很宽的极窄脉冲,而真正现代意义上的 UWB 无线技术,最初又被称为冲激无线电技术,出现于 20 世纪 60 年代。到了 90 年代,美国南加州大学通信科学研究所论证了采用冲激脉冲进行跳时调制的多址技术,从而开辟了将冲激脉冲作为无线电通信载波的新途径。发展到 1998 年,美国联邦通信委员会开始征集 UWB 通信技术在民用通信中的意见,并于 2002 年 2 月 14 日批准了把 3.1~10.6GHz 的频带免授权分配给民用 UWB 使用的法规,从而拉开了企业界和研发机构竞相研发 UWB 的序幕。在 2003 年之后,国际电信联盟的工作组开始对 UWB 进行测试研究,用了两年多的时间,在 2005 年 10 月确定了各国和各地区 UWB 频谱分配的若干原则,2006 年 2 月国际电信联盟第一研究组批准给予 UWB 全球性监管标准的地位和一系列相关建议,具体规划由各国和各地区的相关

组织自定。欧洲、日本和加拿大等国的研究机构、大学和企业纷纷启动了 UWB 领域的一系列研究项目,一个波澜壮阔的 UWB 技术的研发热潮正在世界范围内兴起。

1. 军事领域

《RFID 射频快报》于 2005 年 11 月 21 日报道称:佐治亚州本宁兵营中的美军在城市地形军事行动训练中采用了位于丹佛 Ubisense 公司的 UWB RFID 系统,跟踪在模拟村庄训练的士兵。综合因特网 2005 年 12 月 20 日报道,美国桑地亚国家实验室将 UWB 无线信号与高级加密技术相结合,开发出一种美国军用安全传感器通信网络^[17]。这种超级安全的 UWB 通信系统承诺能够通过侦测敌方位置,以及加大敌方窃听和干扰军事通信的困难度,来帮助政府保护战场上的军队。2006 年 10 月,以色列的卡梅罗雷达公司研制的“看穿墙壁”的新型监视装置在美国洛杉矶的一次追查逃犯的过程中立下了大功。这种透视雷达系统利用了 UWB 技术绘制出墙后物体的三维立体图像,从而实现透视效果。成像清晰度类似于超声波成像的效果,透视距离可达 30m。该仪器研制的初衷是在灾害现场寻找人员,但研制成功后却引起了军方和警方的高度重视。

2. 民用领域

现在有许多公司在进行 UWB 技术的研究开发工作。美国 Xtreme Spectrun 公司能够提供在各种设备之间无线传输音频、视频的 UWB 芯片组,它采用双相调制技术和 IEEE 802.15.3 媒体接入控制协议,传输速率达到 100Mbit/s。Intel 在 2000 年成立了 UWB 研究实验室。Intel 认为 UWB 在短距离内可以达到 400~500Mbit/s,因此 Intel 称 UWB 为无线 USB。Time Domain 公司利用 UWB 脉冲位置调制(pluse position modulation, PPM)技术,开发了两代 PulsON 芯片,第三代 PulsON 商用产品也即将问世。2003 年 1 月,Philips 和 GA 签订了一个备忘录,利用 Philips 在 BiCOMS 的优势和 GA 的 UWB 技术联合开发速率达 480Mbit/s 的 UWB 芯片组,并支持 IEEE 802.15.3a 标准。Pulse Link 公司在 2003 年第一季度推出了传输速率达 400Mbit/s 的 UWB 芯片组。新加坡的 Cellonics 公司开发了基于非线性动态理论的新技术,它只需要使用一个电感器和一个二极管就可以实现数字调制解调器,不需要混频器、振荡器和锁相环。该技术可以改善 UWB 接收器设计中的相关接收,而且简单、成本低,功耗也低。同年,Motorola 子公司生产出实用的 UWB 收发设备,2004 年 8 月获得美国联邦通信委员会批准。2005 年 10 月,中国海尔和 Freescale 半导体合作生产出了全球第一台基于 UWB 商用产品——数字高清晰电视。美国 Discrete Time 公司开发了多频段 UWB 技术,它采用不同频段发送信息而不是发射单个脉冲。2006 年,英国、日本、韩国等相继开始根据国际电信联盟的规定,陆续公布了 UWB 的监管规范,以