

超宽带无线通信

Ultra Wide Band Wireless Communications

葛利嘉 曾凡鑫 刘郁林 岳光荣 编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

超宽带无线通信

Ultra Wide Band Wireless Communications

葛利嘉 曾凡鑫 刘郁林 岳光荣 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

超宽带无线通信/葛利嘉等编著. —北京:国防工业出版社,2005.8

ISBN 7-118-03979-9

I. 超... II. 葛... III. 宽带通信系统—无线电通信—通信技术 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 064675 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 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10% 259 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举措必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金 评审委员会

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	彭华良	蔡镛		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜	

前 言

从 20 世纪 60 年代起就有学者开始尝试用短脉冲而不是正弦波传播无线电信号,这曾被称为“脉冲无线电”、“非正弦系统”、“时域通信”等。由于技术发展水平的限制,自 20 世纪末以来,这类技术才开始得到实质性关注。1990 年,美国国防部首先定义了“超宽带(UWB, Ultra Wide Band)”概念,超宽带无线通信开始得到美国军方和政府部门的重视。2002 年 4 月,美国 FCC 通过了超宽带技术的商用许可,超宽带无线通信在民用领域开始受到普遍关注。目前“超宽带”的定义只是针对信号频谱的相对带宽(或绝对带宽)而言,没有界定信号的时域波形特征,因此,有多种方式产生超宽带信号。其中,最典型的方法是利用纳秒级的窄脉冲(又称为冲激脉冲, Impulse)的频谱特性来实现。通常,将基于发射窄脉冲的超宽带无线电称为超宽带冲激无线电(UWB-IR, Ultra Wide Band Impulse Radio)。由于本书是以超宽带冲激无线电为重点,除非特别说明,为了简便,书中所称超宽带无线电都是指超宽带冲激无线电。

超宽带无线电是对基于正弦载波的常规无线电的一次突破。几十年来,无线通信都是以正弦载波为信息载体,而超宽带无线通信则以纳秒级的窄脉冲作为信息载体。其信号产生、信道特性、调制解调、信号同步和实际应用等方面都与常规无线通信有很大的差别;在信号隐蔽性、系统处理增益、多径分辨能力、数据传输速率(比特/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$): $\text{b}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、体积和成本等方面,具有独特的优势。因此,建立和完善超宽带无线通信的理论基础,解决其关键技术,对无线通信的发展具有重要的科学意义和现实意义。

超宽带无线通信在军事领域应用的独特优点是信号具隐蔽

性。长期以来,提高无线电信号的隐蔽性一直是人们努力的目标之一。猝发通信,从时域的角度将待发送的数据进行压缩、瞬间发送,以减少无线电波在空间的暴露时间;直接序列扩谱技术,从频域的角度将待发信息用伪随机序列进行频谱展宽,降低发送信号的功率密度谱。这些都是有效的低截获检测概率(LPI/D, Low Probabilities of Intercept and Detection)技术,在军事通信中获得了重要的应用。超宽带无线电可以同时从时域和频域的角度来实现 LPI/D。从频域看,脉冲越窄,频谱越宽,加上低的脉冲占空比,使得脉冲的能量密度谱很低;从时域看,采用跳时技术的超宽带无线电,利用伪随机跳时序列对窄脉冲的发射时刻进行伪随机控制,接收端只有利用相同的伪随机跳时序列进行相关解调,才能恢复信号,伪随机跳时序列也使得信号的功率密度谱更加平滑。超宽带技术也可看成一种特殊的扩谱技术,它将信息符号映射为窄脉冲发射,由于脉冲宽度很窄,频谱宽带很宽,其发射信号的有效频谱带宽与基带信号的带宽相比很大,即具有很高的处理增益。例如,可以将 8kb/s 的语音信号映射为 0.5ns 宽度的窄脉冲序列,从而提高信号的隐蔽性。此外,窄脉冲的采用,有利于将测距、定位和通信一体化,这对军事领域的应用也有特别的意义。

超宽带无线通信的另一个重要特点是能够在密集的多径环境下实现高速传输。由于脉冲持续时间很短,多径分量在时域上不易重叠,不像连续的正弦信号那样容易造成严重的多径衰落,同时,多径分辨能力高,通过先进的多径分离技术或瑞克(Rake)接收机,可以充分利用多径分量。这些特点使得超宽带无线通信特别适合室内无线网络。

另一方面,由于超宽带信号占用的频谱很宽,不能作为大功率发射,以免对其它电子系统造成干扰,因此,超宽带无线通信主要应用中短程场合。

本书在综合分析、整理国外大量最新文献的基础上,结合作者近年来在超宽带无线通信方面的部分研究成果,力图比较系统地阐述超宽带无线通信的基本理论和关键技术。全书分为 10 章:第

1 章超宽带无线通信概述;第 2 章超宽带脉冲信号;第 3 章超宽带信道模型;第 4 章信号调制及其功率谱;第 5 章接收机技术;第 6 章超宽带信号的隐蔽性和抗干扰性能;第 7 章跳时序列;第 8 章信号同步;第 9 章超宽带无线网络;第 10 章共存性。

本书具有以下主要特点。

(1) 题材新。就作者所知,在本书开始写作时,还没有见到国内出版的超宽带无线通信著作。本书反映了近年来国际上超宽带无线通信研究的重要进展。

(2) 系统性强。本书以超宽带冲激无线电为主线,精心选材,从信号产生、调制解调、跳时序列的设计和同步,到网络应用和共存性等,构成比较系统的超宽带无线通信理论框架。

(3) 学术性和实用性相结合。在阐述理论的同时,结合工程应用,对关键的技术问题亦进行了讨论。

(4) 可读性强。本书把可读性放在重要位置,力求通俗阐述,尽量避免复杂的数学推导,通过大量的仿真例子加强对基本概念的理解。

总之,我们希望能读者奉献一部全面介绍超宽带无线通信的著作,以此抛砖引玉,对国内超宽带无线通信的研究和开发起到一些促进作用。当然,由于内容新、发展快,我们又希望尽快将此书奉献给读者,同时恳请广大读者对书中的不足之处提出批评指正。

本书由葛利嘉教授组织编写。由葛利嘉教授、曾凡鑫教授、刘郁林副教授和岳光荣博士分工编写初稿,葛利嘉教授负责修改定稿。本书的前言、第 1 章、第 2 章、第 8 章和第 9 章由葛利嘉编写,第 7 章由曾凡鑫编写,第 3 章和第 5 章的初稿由刘郁林编写,第 4 章、第 6 章和第 10 章的初稿由岳光荣编写。

电子科技大学陈天麒教授、重庆大学曾孝平教授阅读了本书的部分初稿,提出了宝贵的修改意见,并推荐本书申请国防科技图书出版基金资助。基金评审委员会对本书的写作提出了指导性意见。张振宇、李长勇、朱林、张卓、曾静、张宜扬、陈帮富、洪蕾等,参

与了超宽带无线通信项目的研究,其研究结果为本书的写作提供了部分素材,研究生袁晓芳、刘耀东、陈帮富、王婷婷、杨献哲等,为书稿的整理和图表的绘制做了工作,国防工业出版社江洪湖编辑对本书的出版给予了帮助和指导,在此向他们表示感谢。

我们从事超宽带无线通信的研究,先后得到军队立项项目(项目编号:7364)和重庆市应用基础项目(项目编号:8030)以及国家自然科学基金项目(项目编号:60272083)的资助,在此,一并表示谢意。

最后,衷心感谢国防科技图书出版基金的资助!

作者

目 录

第 1 章 超宽带无线通信概述	1
1.1 超宽带无线通信的概念	1
1.2 超宽带无线通信的特点	4
1.3 超宽带无线通信的简史和现状	7
1.3.1 超宽带无线通信简史	7
1.3.2 超宽带无线通信的现状	8
参考文献	10
第 2 章 超宽带脉冲信号	11
2.1 高斯脉冲.....	11
2.1.1 高斯脉冲的时域波形	11
2.1.2 高斯脉冲的频谱	17
2.2 其它窄脉冲信号.....	20
2.2.1 基于正弦波的窄脉冲信号.....	20
2.2.2 Hermite 多项式脉冲.....	20
2.2.3 频谱匹配.....	25
2.3 窄脉冲信号的产生与辐射.....	27
2.3.1 窄脉冲信号的产生	27
2.3.2 脉冲辐射与超宽带天线	31
参考文献	34
第 3 章 超宽带信道模型	38
3.1 超宽带传播特点.....	39
3.1.1 无线信道传播机制	39
3.1.2 超宽带无线传播特点	39
3.1.3 对信道模型的基本要求	40

3.2	超宽带传播信道的测量	41
3.2.1	超宽带信道探测原理	42
3.2.2	数据处理技术	44
3.3	超宽带信道模型	50
3.3.1	室内信道模型	51
3.3.2	室外信道模型	61
3.3.3	IEEE 802.15.3a 建议的信道模型	64
3.4	信道模型的实现	68
3.5	本章小结	72
	参考文献	73
第4章	信号调制及其功率谱	76
4.1	基本调制方式	76
4.1.1	脉冲位置调制(PPM)	76
4.1.2	脉冲幅度调制(PAM)	82
4.2	其它调制方式	82
4.2.1	DS-UWB 调制	82
4.2.2	混合调制	83
4.2.3	数字脉冲间隔调制	83
4.2.4	载波干涉超宽带(CI-UWB)调制	86
4.2.5	多频带调制	87
4.3	调制信号的功率谱	90
4.3.1	具有时间抖动的跳时信号的通用功率谱公式	90
4.3.2	几种调制信号的功率谱	96
4.3.3	选通技术对功率谱的影响	102
4.4	信号的幅度概率分布	102
4.4.1	幅度概率分布的定义	103
4.4.2	带限超宽带信号的 APD	104
4.4.3	利用 APD 预测接收机的性能	105
4.5	本章小结	106
	参考文献	107

第 5 章 接收机技术	110
5.1 解调技术	110
5.1.1 TH-PPM 信号解调	110
5.1.2 TH-PAM 信号解调	113
5.1.3 DS-UWB 信号解调.....	114
5.1.4 CI-UWB 信号解调	117
5.2 多径性能	118
5.2.1 TH-PPM 系统的多径性能	118
5.2.2 TH-PAM 系统的多径性能	122
5.2.3 TH-PPM 系统和 TH-PAM 系统的多径性能比较.....	123
5.3 Rake 接收技术	128
5.3.1 Rake 接收基本原理	129
5.3.2 超宽带 Rake 接收机	130
5.4 基于引导脉冲的接收技术	132
5.4.1 发射参考脉冲的接收技术	132
5.4.2 引导脉冲的优化设计	134
5.5 超宽带接收的其它信号处理问题	139
5.6 本章小结	141
参考文献	142
第 6 章 超宽带信号的隐蔽性和抗干扰性能	147
6.1 超宽带信号的隐蔽性	147
6.1.1 与直接序列扩谱信号的比较	147
6.1.2 超宽带信号的检测性能	149
6.2 TH-PPM 调制信号抗干扰性能	152
6.2.1 单频正弦干扰下的性能	152
6.2.2 阻塞噪声干扰下的性能	155
6.2.3 部分频带噪声干扰下的性能	156
6.2.4 QAM 信号对 TH-PPM 信号的干扰	157
6.2.5 数字 FM 信号对 TH-PPM 信号的干扰	158
6.3 TH-PAM 调制信号抗干扰性能.....	159

6.4	DS-UWB 调制信号抗干扰性能	159
6.5	超宽带无线通信中的抗干扰技术	161
6.5.1	Rake 接收机对窄带干扰的抑制	161
6.5.2	其它抗干扰技术	164
6.6	本章小结	165
	参考文献	166
第 7 章	跳时序列	169
7.1	数学基础知识	170
7.1.1	有限域基本概念	170
7.1.2	有限域的表示	174
7.1.3	置换的基本概念	179
7.2	跳时序列的相关函数	181
7.2.1	相关函数的计算方法	181
7.2.2	相关函数的典型上界	185
7.2.3	跳时码的 Johnson 上界	187
7.3	跳时图案	189
7.4	同余跳时序列	191
7.4.1	平方剩余跳时码	191
7.4.2	举例	192
7.4.3	平方剩余跳时码的性质 ^[13]	193
7.4.4	多项式同余跳时序列 ^[6]	196
7.4.5	双曲同余跳时序列	199
7.4.6	跳时序列数量的扩张	201
7.5	置换跳时序列 ^[6,7]	201
7.5.1	$f^*(x)$ 的性质	201
7.5.2	置换跳时序列的构造	203
7.5.3	举例	205
7.5.4	广义置换跳时序列	206
7.5.5	举例	212
7.6	本章小结	215

参考文献	216
第 8 章 信号同步	220
8.1 基本捕获方法	220
8.2 密集多径信道的超宽带信号捕获	222
8.2.1 多径环境中超宽带信号捕获的特点	222
8.2.2 搜索算法	224
8.2.3 几种搜索算法的仿真比较	231
8.3 差分检测捕获方法	233
8.3.1 差分检测捕获方法的原理	233
8.3.2 多用户情况下的差分检测捕获方法	237
8.3.3 差分检测捕获的性能	242
8.4 定时偏差及抖动的影响	248
8.5 本章小结	251
参考文献	252
第 9 章 超宽带无线网络	255
9.1 媒体访问控制	256
9.1.1 超宽带信道划分	256
9.1.2 随机接入技术在超宽带网络中的性能	257
9.2 路由技术	265
9.2.1 路由算法与协议	265
9.2.2 定位辅助路由	266
9.3 超宽带无线网络的应用	273
9.3.1 ATM-UWB 网络	273
9.3.2 超宽带战术无线网	275
9.3.3 IEEE 802.15.3a PWWAN	277
9.3.4 超宽带无线传感器网络	278
9.4 本章小结	280
参考文献	281
第 10 章 共存性	284
10.1 超宽带信号对常规扩谱系统的干扰	284

10.1.1	超宽带 TH-PPM 信号对直接序列扩谱通信的干扰	284
10.1.2	超宽带 TH-PAM 信号对直接序列扩谱通信的干扰	291
10.2	超宽带信号对 GPS 系统的干扰	293
10.2.1	GPS 系统简介	293
10.2.2	测试参数	294
10.2.3	几种超宽带无线电信号通过 GPS 接收机滤波器 后的 APD	297
10.2.4	测试结果分析	299
10.2.5	超宽带无线通信与 GPS 接收机兼容性的评价	300
10.3	超宽带无线电信号与其它系统兼容性的评价	302
10.3.1	单个超宽带信号干扰时的测量结果	302
10.3.2	超宽带累积信号干扰时的测量结果	303
10.4	本章小结	304
	参考文献	305

Contents

CHAPTER 1 Introduction	1
1.1 Concepts of UWB Wireless Communications	1
1.2 Characteristics of UWB Wireless Communications	4
1.3 Brief History and Current Situation of UWB Wireless Communications	7
1.3.1 Brief History	7
1.3.2 Current Situation	8
References	10
CHAPTER 2 Ultra Wide Band pulse Signals	11
2.1 Gaussian Impulse	11
2.1.1 Waveform of Gaussian Impulse	11
2.1.2 Spectra of Gaussian Impulse	17
2.2 Other Narrow Pulses	20
2.2.1 Narrow Pulses Based on Sine Waves	20
2.2.2 Narrow Pulses Based on Hermite polynomials	20
2.2.3 Spectra Matching	25
2.3 Generation and Emission of Narrow Pulses	27
2.3.1 Generation of Narrow Pulses	27
2.3.2 Pulses Emission and UWB antennas	31
References	34
CHAPTER 3 Ultra Wide Band Channel Modeling	38
3.1 Characterization of UWB propagation	39
3.1.1 Wireless Propagation Phenomena	39
3.1.2 UWB Propagation	39
3.1.3 Channel Modeling Requirements	40