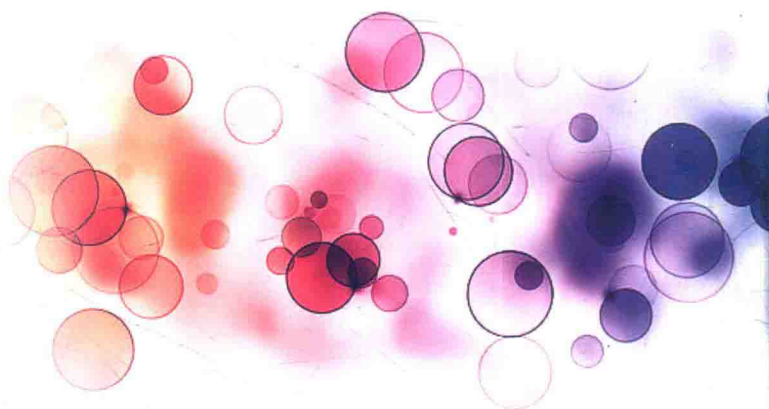




全国普通高校电子信息类专业规划教材

扩频通信技术的应用

王娟 黄玉琴 徐杰 等 编著



清华大学出版社



全国普通高校电子信息类专业规划教材

扩频通信技术的应用

王娟 黄玉琴 徐杰 等 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是专门论述扩频通信技术及应用的教材,在详细介绍扩频通信的基本扩频原理、扩频系统的性能分析、各种扩频通信系统的基本构成及相关技术的基础上,着重介绍了扩频系统的同步技术、扩频技术在电子信息行业的其他应用以及基于 MATLAB 的仿真软件和 FPGA 硬件实现扩频系统关键技术的方法,并通过具体的例子和详细的步骤来说明如何应用 MATLAB 和 FPGA 进行实际的建模和实现。

本书共分为 8 章,内容主要有扩频技术的基本概念、伪随机序列、直扩通信系统、跳频通信系统、扩频通信的同步技术、典型扩频通信系统、扩频通信系统的仿真以及扩频通信系统的 FPGA 设计。全书提供了大量应用实例,每章均附有习题。

本书适合作为通信工程、电子信息、雷达及导航、计算机应用、自动控制等专业相关课程的教材和参考书;另外,本书内容对从事相关工作的工程技术人员也有参考价值。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

扩频通信技术及应用/王娟等编著. —北京:清华大学出版社,2016

全国普通高校电子信息类专业规划教材

ISBN 978-7-302-43006-3

I. ①扩… II. ①王… III. ①扩频通信—通信技术—高等学校—教材 IV. ①TN914.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 026260 号

责任编辑:梁 颖

封面设计:傅瑞学

责任校对:梁 毅

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:15

字 数:373 千字

版 次:2016 年 4 月第 1 版

印 次:2016 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:35.00 元

产品编号:066996-01

前言

FOREWORD

扩展频谱(扩频)通信系统是指待传输信息的频谱用某个特定的扩频函数扩展后成为宽频带信号,然后送入信道中传输,再利用相应手段将其解扩,从而获取传输信息的通信系统。它在传输同样信息时所需的射频带宽,远比大家熟悉的各种调制方式要求的带宽要宽得多。扩频前的信息码元带宽远小于扩频后的扩频码序列的带宽,信息已不再是决定调制信号带宽的一个重要因素,其调制信号的带宽主要由扩频函数来决定。一般常用的扩频函数是伪随机编码信号。与常规的通信系统相比,扩频系统具有很强的抗人为干扰、抗窄带干扰、抗多径的能力,此外还具有信息隐蔽、多址保密通信等优点。由于扩频通信独具特色,自诞生之日起,就受到军方的极大重视。近十多年来,随着信息技术的迅猛发展与日益普及,扩频通信技术已在军用和民用通信领域得到广泛应用,并伴随 GPS 卫星定位、3G 手机等产品迅速进入大众生活,逐渐发展成一门成熟的通信技术。

本书在对扩频技术相关概念进行深入阐述的基础上,全面介绍了扩频通信系统,并根据多年的教学经验和实践认识,对内容体系进行了整体规划,使得全书的知识结构紧凑和实用,并收录了扩频技术在这几年的最新发展,如将混沌序列作为扩频码进行扩频的介绍。

随着大规模集成电路及现场可编程逻辑阵列(FPGA)的广泛应用,扩频通信系统的设计与实现变得容易起来,本书利用两章的篇幅分别介绍了利用 MATLAB 进行扩频通信的仿真和利用 FPGA 实现扩频通信的设计。

扩频通信系统与其他模拟或数字通信系统相比较,其概念更为抽象、技术更为艰深、内容更为庞杂,而市面上大多相关书籍重原理、轻实践,这给广大科技工作者和高校学生对扩频通信技术的学习与掌握带来了较大的困难。基于此,作者在对多年来的科研成果与教学实践进行总结的基础上,对无线扩频通信系统的构成、系统工作原理、系统仿真工具、系统中各功能单元模块设计方法及仿真算法、直扩及跳频系统仿真流程进行了详细的描述,通过多个仿真实例,将扩频通信系统所涉及的基本概念和设计思想有机而形象地联系起来,深入浅出,图文并茂,使读者能从系统层面上对扩频通信技术有一个全面而直观的认识。

全书共分 8 章:第 1 章扩频通信系统技术综述,着重介绍扩频通信系统的发展历史以及基本概念;第 2 章伪随机序列,着重介绍作为常用扩频码之一的伪随机序列的特点、种类以及如何生成这些伪随机序列;第 3、4 章,分别介绍了直扩通信系统和跳频通信系统的基本原理以及发射、接收的关键技术;第 5 章详细介绍了扩频通信系统的各种同步技术;第 6 章典型扩频通信系统,介绍了扩频技术在电子信息行业方面的其他具体应用;第 7 章扩频系统的

仿真,以 MATLAB/Simulink 为基础介绍了扩频系统中关键技术的仿真实现;第 8 章扩频通信系统的 FPGA 实现,介绍了扩频关键技术的硬件实现方法。

本书第 1、2 章由王娟老师编写,第 3、4 章由黄玉琴老师编写,第 5 章由徐杰老师编写,第 6 章由吕中志老师编写,第 7 章由张起晶老师编写,第 8 章由夏洪洋老师编写。

对初次接触扩频通信的读者,在阅读本书感觉困难之时,不妨自己动手,在计算机上进行相关内容的仿真实验,仿真过程及从中得到的仿真波形和仿真结果,将非常有助于对概念、算法、指标的直观理解和把握。通过全书学习,读者将全面熟悉并掌握 MATLAB/Simulink 仿真工具的具体运用,可以很快地将经仿真验证后的算法在 DSP/FPGA 芯片上予以硬件实现,能极大地缩短通信系统产品的研发周期。

在本书的成书过程中,参考了大量的研究成果,在这里对本书所参考文献的作者表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免还有一些缺点和不足之处,希望广大读者批评指正。

编 者

2015 年 11 月

教 学 建 议

教学内容	学习要点及教学要求	课时安排	
		全部讲授	部分选讲
第 1 章 扩频通信技术综述	• 香农公式的含义及其意义。了解和掌握香农公式中信道容量、信道带宽以及信噪比之间的关系和互换意义； • 扩频通信技术的发展历史。了解扩频通信技术的发展过程以及扩频通信目前的研究现状； • 扩频通信技术的基本原理。掌握扩频通信系统的数学模型、物理模型以及信号的最佳形式； • 扩频通信技术的性能特点。了解和掌握扩频通信技术的性能指标参数以及扩频技术的主要特点	2~4	2
第 2 章 伪随机序列	• 了解伪随机序列的基本原理。了解伪随机序列的起源、定义以及特点。掌握伪随机序列产生的方法； • 掌握 m 序列、Gold 序列、M 序列的产生方法以及各自的优点、特点和应用范围。了解其他伪随机序列的种类以及生成方法	4~6	4
第 3、4 章 直扩通信系统、跳频通信系统	• 掌握直扩通信系统的基本原理,理解和掌握直扩通信系统的发射和接收技术,了解直扩通信系统抗干扰性能、多址性能以及测距性能； • 掌握跳频通信系统的基本原理,理解和掌握跳频通信系统的发射和接收技术,了解跳频通信系统的性能参数	8~12	8
第 5 章 扩频通信系统的同步技术	• 掌握扩频通信系统中扩频序列的捕获技术和跟踪技术,了解同步技术的基本要求和特点,掌握几种序列捕获方法的基本原理； • 掌握直扩通信系统的同步技术,理解直扩系统中信号捕获和跟踪的技术基本原理和特点； • 掌握跳频通信系统的同步技术,理解和掌握跳频系统中捕获和跟踪技术的基本原理和特点	6~12	6
第 6 章 典型扩频通信系统	• 了解扩频技术在 WCDMA、TD-SCDMA、GPS 系统、无线局域网、蓝牙技术中的应用。掌握扩频技术在不同通信系统中的具体应用方法和方式	4~8	4
第 7 章 扩频通信系统的仿真	• 了解扩频通信系统的仿真软件。理解和掌握扩频技术的仿真实现的目的和意义。掌握如何实现扩频技术的扩频码的选择、扩频系统的发射和接收技术的仿真验证； • 掌握扩频通信系统的同步技术的仿真实现。掌握在实现扩频通信系统的同步过程中,各个模块的功能以及如何设置	6~12	6

续表

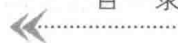
教学内容	学习要点及教学要求	课时安排	
		全部讲授	部分选讲
第 8 章 扩频通信系统的 FPGA 设计	- 了解 FPGA 的基本知识。掌握 FPGA 的工作原理和基本结构,了解 FPGA 的设计流程和基本器件类型; - 掌握如何利用 FPGA 实现扩频通信系统的关键技术和功能元器件的设计,掌握 m 序列、M 序列 FPGA 的设计实现,掌握扩频通信系统的调制解调方法的 FPGA 的实现	6~12	6
	教学总学时建议	36~66	36
	说明:(1) 本教材为电子信息专业《扩频通信技术》课程教材,理论授课学时数为 36~66 学时,不同专业根据不同的教学要求和计划教学学时数可酌情对教材内容进行适当取舍; (2) 本教材理论授课学时数中包含习题课、课堂讨论等必要的课内教学环节		

目录

CONTENTS

第 1 章 扩频通信技术综述	1
1.1 扩频通信技术的理论基础	1
1.2 扩频通信技术的发展现状	3
1.3 扩频通信技术的基本原理	5
1.4 扩频通信技术的性能特点	7
1.5 扩频通信系统的分类	11
本章小结	16
习题	16
第 2 章 伪随机序列	17
2.1 伪随机序列基本原理	17
2.1.1 伪随机序列的定义	17
2.1.2 伪随机序列的产生	19
2.2 m 序列	20
2.2.1 m 序列的产生	21
2.2.2 m 序列的性质	24
2.2.3 m 序列的相关函数	25
2.3 Gold 码	27
2.3.1 Gold 码的产生	27
2.3.2 Gold 序列的性质	29
2.4 M 序列	29
2.4.1 M 序列的构成方法	30
2.4.2 M 序列的性质	32
2.5 组合序列	33
2.5.1 逻辑乘组合码	33
2.5.2 模 2 和组合码	35
2.6 其他伪随机序列	36

2.6.1 沃尔什码序列	36
2.6.2 混沌扩频序列	39
本章小结	41
习题	41
第3章 直扩通信系统	43
3.1 直扩通信系统基本组成及工作原理	43
3.2 直扩通信系统的发射技术	47
3.2.1 直扩通信系统的扩频	47
3.2.2 直扩通信系统的调制技术	48
3.3 直扩通信系统的接收技术	53
3.3.1 直扩通信系统的解扩	53
3.3.2 直扩通信系统的解调	56
3.4 直扩通信系统的性能	61
3.4.1 直扩通信系统的抗干扰性	61
3.4.2 直扩系统中射频带宽的考虑	64
3.4.3 直扩通信系统的多址能力	65
3.4.4 直扩通信系统的测距能力	67
本章小结	69
习题	69
第4章 跳频通信系统	70
4.1 跳频通信系统简介	70
4.2 跳频通信系统的跳频原理	73
4.3 跳频通信系统的发射技术	76
4.3.1 跳频器	76
4.3.2 跳频信号的调制	80
4.4 跳频通信系统的接收技术	82
4.4.1 跳频信号的解跳	82
4.4.2 跳频信号的解调	83
4.5 跳频通信系统的抗干扰性能	85
本章小结	88
习题	88
第5章 扩频通信的同步技术	89
5.1 扩频序列的捕获技术	90
5.1.1 发射参考信号法	91
5.1.2 匹配滤波器搜捕法	92
5.1.3 顺序估计快速捕获法	93



5.2 扩频序列的跟踪技术	95
5.2.1 基带延迟锁定跟踪环	96
5.2.2 非相关延迟锁定跟踪环	98
5.2.3 τ 摆动非相关跟踪环	101
5.3 直扩通信系统的同步技术	103
5.3.1 直扩通信系统的捕获方法	104
5.3.2 直扩通信系统的跟踪方法	106
5.4 跳频系统的同步技术	108
5.4.1 跳频通信系统的捕获方法	109
5.4.2 跳频通信系统的跟踪方法	112
本章小结	113
习题	114

第 6 章 典型扩频通信系统 115

6.1 WCDMA 通信系统	115
6.1.1 信道编码	115
6.1.2 WCDMA 的扩频码和扰码	118
6.1.3 WCDMA 物理信道的扩频调制	121
6.2 TD-SCDMA 通信系统	124
6.2.1 TD-SCDMA 通信系统数据调制	124
6.2.2 TD-SCDMA 信道编码	125
6.2.3 TD-SCDMA 扩频调制	126
6.3 CDMA2000 通信系统	129
6.3.1 前向链路的差错控制	129
6.3.2 前向链路扩频调制方式	131
6.3.3 反向链路的差错控制	135
6.3.4 反向链路扩频调制方式	136
6.4 全球卫星定位系统	138
6.4.1 GPS 系统组成	138
6.4.2 GPS 的信号结构	139
6.4.3 伪码扩频和相关接收	143
6.5 无线局域网	144
6.5.1 无线局域网模型概述	144
6.5.2 直接序列扩频物理层	145
6.5.3 跳频扩频物理层	147
6.6 蓝牙技术	148
6.6.1 跳频选择方案	149
6.6.2 跳频选择内核	150
本章小结	152



习题	153
第7章 扩频通信系统的仿真	154
7.1 MATLAB 简介	154
7.1.1 MATLAB 语言的显著特点	154
7.1.2 MATLAB 基本操作	155
7.1.3 Simulink 仿真平台	156
7.1.4 Simulink 功能	156
7.2 伪随机码的生成及相关函数的计算	157
7.2.1 伪随机码的仿真分析	157
7.3 直扩通信系统的仿真	162
7.4 直扩通信系统伪码同步捕获的仿真	166
7.5 跳频通信系统的仿真	168
本章小结	177
习题	177
第8章 扩频通信系统的 FPGA 设计	178
8.1 FPGA 的原理与结构	178
8.1.1 FPGA 的工作原理	178
8.1.2 FPGA 的基本结构	178
8.1.3 查找表结构	182
8.2 FPGA 设计流程	184
8.3 FPGA 器件简介	187
8.3.1 Altera FPGA 产品介绍	187
8.3.2 Xilinx FPGA 产品介绍	192
8.3.3 Lattice FPGA 产品介绍	198
8.4 数字滤波器的 FPGA 设计	202
8.4.1 FIR 滤波器的结构	202
8.4.2 抽头系数的编码	204
8.4.3 FIR 滤波器的设计	204
8.5 伪随机序列的 FPGA 设计	207
8.5.1 m 序列发生器	207
8.5.2 M 序列发生器	209
8.6 直扩通信系统的 FPGA 设计	212
8.6.1 二进制相位键控(BPSK)调制	212
8.6.2 CPSK 信号的产生	214
8.6.3 DPSK 信号的产生	215

8.6.4	CPSK 调制器的设计	218
8.6.5	DPSK 调制器的设计	219
8.6.6	CPSK 解调器的设计	221
8.6.7	DPSK 解调器的设计	222
本章小结		225
参考文献		226

扩频通信技术综述

导言：扩频通信技术是一种数字传输方式，扩频信号的带宽被展宽了，其带宽的展宽是通过扩频序列对信息调制实现的。在接收端使用扩频序列对扩频信号进行相关解调，恢复出原始信息。由于其较强的抗干扰能力、抗截获能力和抗检测能力，目前已被广泛运用于军事和民用通信系统中。

1.1 扩频通信技术的理论基础

众所周知，传输任何信息都需要一定的频带，称为信息带宽或基带信号频带宽度。例如，人类语音信息的带宽大约为 300~3400Hz，普通电视图像信息带宽大约为 6MHz。在常规通信系统中，为了提高频率利用率，在无线电通信中射频信号的带宽与所传信息的带宽一般是属于同一个数量级的。如用调幅(AM)信号来传送语言信息，因为调制过程中将产生上下两个边带，其带宽为语言信息带宽的两倍。用单边带(SSB)信号来传输其信号带宽更小，即使在普通的调频通信上，人们最大也只把信号带宽放宽到信息带宽的十几倍，这些都是采用了窄带通信技术。而扩频通信属于宽带通信技术，通常的扩频信号带宽与信息带宽之比将高达几百甚至几千倍。长期以来，人们总是想方设法使信号所占频带尽量窄，以充分提高十分宝贵的频率资源的利用率。为什么要用宽频带信号来传输窄带信息呢？简单的回答就是主要为了通信的安全可靠，这一点可以用信息论和抗干扰理论的基本观点加以说明。

1. 香农公式的隐含意义

香农(C. E. Shannon)在其信息论研究中得出了带宽与信噪比互换的关系式，即香农信道容量公式：

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1-1)$$

式中， C 为信道容量，意指单位时间内信道中无差错传输的最大信息量，其单位为 b/s； B 为信号频带宽度，单位为 Hz； S 为信号功率，单位为 W； N 为噪声功率，单位为 W； S/N 为输入功率与噪声功率之比，称为信噪功率比，简称信噪比。

香农公式也可以表示为

$$\frac{C}{B} = 1.44 \ln \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1-2)$$

对于典型干扰环境,有 $S/N \ll 1$, 幂级数展开得

$$\frac{C}{B} \approx 1.44 \frac{S}{N} \quad (1-3)$$

由香农公式中可以看出:

(1) 为了提高信息的信道容量 C , 可以从两种途径实现, 即加大带宽 B 或提高信噪比 S/N ;

(2) 对于任意给定的信噪比 S/N , 只要增加用于传输信息的带宽 B , 就可以增加在信道中无差错地传输信息, 信息传输速率 R 近似等于 C ;

(3) 在信道中, 当传输系统的信噪比 S/N 下降时, 可以用增加系统传输带宽 B 的办法来保持信道容量 C 不变, 而 C 是系统无差错传输信息的速率。

可见, 在保持信道容量 C 不变的条件下, 可以用不同频带宽度 B 和信噪比 S/N 来传输信息, 换言之, 频带 B 和信噪比 S/N 是可以互换的。也就是说, 对于任意给定的信道容量 C , 增加信号带宽可以降低对信噪比的要求, 当信号噪声比 S/N 下降时, 可以用增大系统的传输带宽 B 来获得较低的信息差错率; 甚至在信号被噪声淹没的情况下, 即在 $S/N < 1$ 时, 只要相应地增加信号带宽, 也能进行可靠的通信。扩频通信系统正是利用这一原理, 用高速率的扩频码来扩展待传输信号带宽, 用宽带传输技术来换取信噪比上的好处, 以达到提高系统抗干扰能力的目的, 这就是扩频通信的基本思想和理论依据。

2. 信号带宽与信噪比互换的实例

用扩展频谱的方法换取通信系统接收机输入端对载噪比 (C/N) 或信噪比 (S/N) 的要求, 这对通信设备小型化、低功率化, 减少通信环境电磁干扰来说是十分重要的。以移动通信系统为例, 第一代蜂窝移动通信系统采用语音调频, 接收机输入端要求 $C/N \geq 18\text{dB}$; 第二代数字蜂窝移动通信系统的 GSM 系统采用 TDMA、GMSK 数字语音调制, 接收机输入端要求信干比 $S/I \geq 9\text{dB}$ 就可以; 采用扩频技术的 CDMA 系统接收机输入端在 E_b/n_0 取 4.5dB 时, 相当于载干比 $C/I = -15\text{dB}$ 。

能够实现极限信息速率传输且能达到任意小差错概率的通信系统称为理想带通系统。理想带通系统是一个编码系统, 而编码系统的带宽与信噪比的互换要比非编码系统的优越, 因为编码系统的带宽可以比非编码系统的带宽宽很多。

3. 信号带宽与信号功率互换的实例

由香农公式可见, 当信道容量 C 不变时, 信号带宽 B 和信号功率信噪比 S/N 是可以互换的, 但二者相对变化的速率会怎样呢? 下面的举例说明这个问题。

【例 1.1】 某一系统的信号带宽为 8kHz , 信噪比为 15, 求信道容量 C 。在 C 不变的情况下, 信号带宽分别增大 1 倍和减小一半, 求两种情况下信号功率的相对变化量。

解: 先求出信道容量 C , 由式(1-1)得

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 8 \log_2 (1 + 15) = 32 (\text{kb/s})$$

将信号带宽增大 1 倍, 即 $B_1 = 2B = 16\text{kHz}$, C 不变, 可得

$$\frac{S_1}{N_1} = 2^{\frac{C}{B_1}} - 1 = 3$$

信道噪声变化 $N_1/N = n_0 B_1/n_0 B = 2$, 由此可得信号功率的相对变化为

$$\frac{S_1/N_1}{S/N} = \frac{3}{15}$$

$$\frac{S_1}{S} = \frac{N_1}{N} \times \frac{3}{15} = 2 \times \frac{3}{15} = 0.4$$

此时, 信号功率约为原来信号功率的 40%。

将信号带宽减小一半, 即 $B_2 = 0.5B = 4\text{kHz}$, C 不变, 可得

$$\frac{S_2}{N_2} = 2^{\frac{C}{B_2}} - 1 = 255$$

信道噪声变化 $\frac{N_2}{N} = \frac{n_0 B_2}{n_0 B} = 0.5$, 由此可得信号功率的相对变化为

$$\frac{S_2}{S} = \frac{N_2}{N} \times \frac{255}{15} = 0.5 \times \frac{255}{15} = 8.5$$

即带宽减小一半, 功率需增大到原信号功率的 8.5 倍。

由上例可知, 当信道容量不变时, 增加信号带宽 B 可使系统的信噪比迅速下降, 即信号的发射功率可迅速减小; 同样, 增加信噪比, 也可以减小信号带宽, 但信号功率的增加远远比带宽下降的速度快。由式(1-1)可知, 信号带宽 B 与信道容量 C 成正比, 而信道容量 C 与信噪比 S/N 成对数关系, 所以增加信道带宽 B 比增加信噪比 S/N 或增加发射功率更有效。

1.2 扩频通信技术的发展现状

扩频通信技术的概念最初并非来自军方, 而是由好莱坞女演员 Hedy Lamarr 和钢琴家 George Anthell 提出的。第二次世界大战期间, 干扰和抗干扰技术成为决定胜负的重要因素。在战后, 扩频技术引起了美国军方的重视, 最初的应用包括军事对抗干扰通信、导航系统、抗多径实验系统和其他方面。

在扩频通信技术发展的前几十年, 其应用一直在军事通信领域, 而个人通信业务的发展终于使扩频技术迎来了另一次大发展的机遇。美国联邦通信委员会于 1985 年 5 月发布了一份将扩频技术应用到民用通信的报告。

因此扩频通信的历史经历了两个主要的阶段: 军事应用中的发展和民事应用中的发展。

1. 在军事通信中的发展

扩频技术的最初构想是在第二次世界大战期间形成的。1935 年, 德国的德律风根 (Telefunken) 公司的工程师 Paul Kotowski 和 Kuit Dannehl 申请了用于模拟语音加密的专利, 其中伪装语音设备发射机是由一个旋转器产生等带宽的噪声对语音进行伪装, 接收端利用一个相同的旋转器产生相同的噪声去除噪声, 该专利构成早期扩频通信系统的基本要素。在第二次世界大战后期, 干扰和抗干扰技术成为决定胜负的重要因素, 并得出了“最好的抗干扰措施就是好的工程设计和扩展工作频率”的结论。1944 年, 美国国际电话与电报公司提出跳频通信的思想, 即: 如果对窄带信号使用编码的频率控制, 则可以使其在任何时间占据宽频段中的任何一部分。而直序扩频则起源于导航系统中高精度测距。

真正实用的扩频通信系统是在 20 世纪 50 年代中期发展起来的。1949 年 Derosa 和

Rogoff 在美国联邦通信实验室(FTL)完成世界上第一个扩频通信系统,并成功地应用于新泽西(New Jersey)和加利福尼亚(California)之间的通信线路上。1950年,Basore 首先提出扩展频谱系统 NOMACD(noise modulation and correlation detection system)。1952年,麻省理工学院林肯实验室研制出 P9D 型 NOMACS 系统,并进行实验;接着在 1955 年研制出扩频通信系统 F9C-A/Rake 无线电传机系统,被公认为第一个成功的扩频通信系统,该系统首次提出了瑞克(Rake)接收的概念并成功应用,是第一个真正实用的宽带通信系统。同时,跳频扩频通信系统 BLADES 也研制成功,并第一次利用移位寄存序列实现纠错编码。在此期间,喷气实验室(JPL)在其空间任务中完成了伪码产生器的设计以及跟踪环路的设计。

此后的 20 年,扩频技术的发展由于硬件的限制,没有得到广泛的应用,随着晶体管、集成电路和各种信号处理器的问世,扩频技术才有了重大突破和进展,并在实际中显示出优越性。

2. 在民用通信中的发展

20 世纪 80 年代中期,扩频通信技术被推广应用于卫星通信、数据传输、定位、定时系统中。1985 年 5 月美国联邦通信委员会(FCC)发布了一份关于将扩频技术应用到民用通信的报告,从此,扩频通信技术获得了更加广阔的应用空间。

扩频技术最初在无绳电话中获得成功应用,因为当时已经没有可用的频段供无绳电话使用,所以无绳电话的通信系统采用扩频技术以允许它与其他通信系统共用频段。1982 年 J. K 霍姆斯提出了相干扩频系统。1990 年 1 月,国际无线电咨询委员会(CCIR)研究未来公众陆地移动通信系统(future public land mobil telecommunication system, FPLMTS)的第八工作组提出的实现 FPLMTS 计划的技术报告中,明确建议采用扩频通信技术。而真正使扩频通信技术成为当今通信领域研究热点是 1996 年投入商业运营的码分多址(CDMA)的应用。CDMA 在多用户通信系统中所有用户共享同一频段,但是通过给每个用户分配不同的扩频码实现多址通信。利用扩频码的自相关特性能够实现对给定用户信号的正确接收;将其他用户的信号看作干扰,利用扩频码的互相关特性,能够有效抑制用户之间的干扰。此外由于扩频用户具有类似白噪声的宽带特性,它对其他共享频段的传统用户的干扰也达到最小。由于采用 CDMA 技术能够实现与传统用户共享频谱,因此它也就成为个人通信(personal communication system, PCS)首选的多址方案。2000 年,国际电信联盟(ITU)将采用扩频技术的 CDMA 作为核心技术应用于第三代移动通信(3G)中。

目前,扩频通信技术已经成为移动通信领域不可或缺的关键技术,被广泛应用于第 4 代移动通信(4G)、雷达、测距及导航等系统中,显示了强大的生命力。

扩频技术由于其本身具备的优良性能而得到广泛应用,到目前为止,最主要的两个应用领域仍然是军事抗干扰通信和移动通信系统;而跳频(frequency-hopping spread spectrum, FH-SS)系统与直扩(direct-sequence spread spectrum, DS-SS)系统则分别是在这两个领域应用最多的扩频方式,其中跳频系统主要用于军事通信中对抗故意干扰和卫星通信中的保密通信,而直扩系统则主要是一种民用技术。

对跳频系统的分析,现在仍集中在其对抗各种干扰的性能方面,如对抗部分边带干扰以及多频干扰等。而直扩系统,即 DS-CDMA 系统,在移动通信系统中的应用则成为扩频技术的主流。欧洲的 GSM 标准和北美的以 CDMA 技术为基础的 IS-95 都在第二代移动通信

系统(2G)的应用中取得了巨大的成功。第三代移动通信系统(3G)标准中(除了EDGE)都采用了某种形式的CDMA。因此CDMA技术成为目前扩频技术中研究最多的对象,其中又以码捕获技术和多用户检测(MUD)技术代表了目前扩频技术研究的现状。

1) 码捕获

同步的实现是直扩系统中一个关键问题。只有在接收机将本地产生的伪码和接收信号中调制信息的伪码实现同步以后,才有可能实现直序扩频通信的各种优点。同步过程分两个阶段:首先是捕获阶段,实现对接收信号中伪码的粗跟踪;然后是跟踪阶段,实现对伪码的精确跟踪。目前的研究主要集中在码捕获过程。

目前对码捕获的研究主要集中在对周期较长的码实现捕获的问题,也就是快速捕获的问题。以前采用的主要是串行捕获方法,这种方法实现简单,但捕获速度不能满足要求。而现在大规模集成电路的应用使并行捕获方案成为可能,但系统的复杂度很高,因此研究的目标是实现码捕获时间性能和系统复杂度之间的折中。在串行捕获方案中,双停顿时间搜索法和序贯检测法都是缩短捕获时间的有效方法,如何利用新的搜索算法进一步改进这些系统的性能成为研究的热点。此外以前主要研究的是高斯信道下的捕获性能,现在则是考虑非高斯信道下的捕获性能,以及在有频偏等影响条件下的捕获性能。

2) 多用户检测

CDMA系统容量受到来自其他用户的多址干扰的限制,多用户检测能够利用这些多址干扰来改善接收机的性能,因此是一种提高系统容量的有效方法。传统的CDMA接收机是由一系列单用户检测器组成,每个检测器都是与特定扩频码对应的相关器,它并没有考虑多址干扰的结构,而是把来自其他用户的干扰当成加性噪声,因此当用户数量增加时,其性能急剧下降。通过对所有用户的联合译码可以极大地改善CDMA系统的性能。但是最优的多用户接收机,其复杂度随用户数量成指数增长,因此在实际通信系统中几乎不可能实现。这样寻找在性能和复杂度之间折中的次最优多用户检测器成为研究的热点。

目前研究的次最优多用户检测器主要可分为两大类:线性检测器和反馈检测器。前者包括解相关检测器、最小均方误差序列检测器等;后者则包括多级检测器、判决反馈检测器、顺序干扰撤销和并行干扰撤销检测器等。信道编码的多用户接收机可以分为非迭代接收机和迭代接收机。这些检测器的实现都需要知道预期用户的扩频码、定时信息以及信道冲击响应,有时还需要知道多用户干扰。这些信息可以通过发送导频序列获得,但使用导频序列就降低了系统的频谱利用效率,因此不使用导频序列的多用户检测方法,又称为盲多用户检测器,是目前深入研究的热点之一。

1.3 扩频通信技术的基本原理

1. 扩频通信系统的数学模型

图1-1为扩频通信系统的数学模型。扩频系统可以认为是扩频和解扩的变换对。要传输的信号 $s(t)$ 经过扩频变换,将频带较窄的信号 $s(t)$ 扩展到一很宽的频带 B 上去,发射的信号为 $T_s(s(t))$ 。扩频信号通过信道后,叠加噪声 $n(t)$ 和干扰信号 $J(t)$,送入解扩器的输入端。对解扩器而言,其解扩过程正好是扩频过程的逆过程,从而,对信号进行 $T_s^{-1}[\cdot]$ 处理,还原出 $s(t)$,即 $T_s^{-1}[T_s(s(t))] = s(t)$,而对噪声 $n(t)$ 和干扰信号 $J(t)$,有 $T_s^{-1}[n(t)] =$