



高等学校电子与通信类专业“十二五”规划教材

扩频通信技术 及应用

(第二版)

暴宇 李新民 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子信息类专业“十二五”规划教材

扩频通信技术的应用

(第二版)

暴宇 李新民 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了扩频通信技术的基本概念、原理、分析方法及其应用和仿真。

全书共9章,分为两个部分。前5章为基础理论部分,内容包括扩频通信的原理、伪随机编码、直扩系统、跳频系统、伪码同步;后4章为应用部分,内容包括扩频系统实例分析、芯片使用案例和系统 MATLAB 仿真。

本书可作为高等院校通信工程、信息工程、电子信息与科学等专业的专业课教材,也可作为从事无线电通信技术研发工作的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

扩频通信技术及应用/暴宇,李新民编著. —2版. —西安:西安电子科技大学出版社,2011.7

高等学校电子与通信类专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2592-8

I. ①扩… II. ①暴… ②李… 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(2011)第 095934 号

策 划 毛红兵

责任编辑 阎 彬 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2011年7月第2版 2011年7月第3次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 16.5

字 数 385千字

印 数 7001~10 000册

定 价 29.00元

ISBN 978-7-5606-2592-8/TN·0604

XDUP 2884002-3

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

韦惠民教授主编的《扩频通信技术及应用》一书自出版以来,已作为本、专科学生教材使用了近5年时间。该教材既有理论教学内容,又有实际应用内容,具有很好的理论指导和应用参考价值,受到了广大师生的认可和赞誉。

近年来,扩频技术在移动通信系统、无线局域网、定位测距及军用系统中被广泛应用,所涉及的理论问题、技术难点需要进一步的分析和讲述。为此,作者结合多年的教学经验,对《扩频通信技术及应用》一书进行了修订。本版书对上版书的主体内容进行了重新编排,并增加了一些新内容,使该书内容与时俱进,更利于理论学习和应用参考。

本版书所做的主要修订包括:

(1)对一些章节内容进行了调整。在第1章将一个扩频系统从发端讲述到收端,同时给出该系统的性能分析,可使学生更完整、更清晰地理解各个扩频系统。第2章讲述伪随机码的内容,便于学生更好地理解各个系统在接收时的相关处理。另外,本版书还将上版书中的扩频技术应用和扩频系统设计两部分内容分开,在不同章进行介绍,使全书内容安排得更加合理。

(2)修改并补充了一些内容。在第2章中给出了伪随机码的数学定义,介绍了本原多项式的概念,给出了 m 序列的个数的计算函数,介绍了Walsh码和巴克码。在第3章中分析了直扩系统的载波抑制问题及多址和测距能力,简单介绍了RAKE接收技术。在第4章中给出了跳频图案的生成方法及跳频系统的相关解跳的电路结构,并且简单介绍了跳时系统。在第5章中介绍了伪码捕获的新技术(包括滑动相关捕获法的改进、顺序估计快速捕获法等)。在第6章中将直扩技术在IS-95 CDMA系统中的应用改为了在CDMA 2000系统中的应用,使内容更加新颖。同时,在讲述GPS系统的内容中还补充了GPS卫星信号及GPS信号的捕获和跟踪问题等内容,使讲述更加深入透彻。

(3)新编写了第9章。该章给出了扩频通信课程部分内容的程序和仿真,比如一些伪码的生成程序、直扩系统的收发及同步的Simulink仿真等,可使读者对相关的知识有更直观的认识和理解,这是本版书的一大特点。

本书共分9章。第1章阐述扩频通信技术的原理和理论基础;第2章讲述伪随机编码技术;第3章系统讲述直扩系统的组成和性能分析;第4章主要讲述跳频系统的组成和性能分析;第5章较为详细地讲述扩频系统的伪码同步技术;第6章讲述扩频技术的应用;第7、8章结合一些核心芯片讲述扩频的设计;第9章给出扩频通信课程涉及的程序和仿真。

本书由暴宇和李新民编著。其中,第1、2、4、6、8章由暴宇编写,第3、5、7、9章由李新民编写。全书由暴宇统稿。

在这里，特别要感谢韦惠民老师对本书出版所做的大量工作，感谢西安电子科技大学出版社毛红兵和阎彬编辑的热情帮助。另外，本书在编写过程中参考了田日才、赵刚、梅文华及曾一凡等几位学者的著述或教材，在此对他们也深表谢意。

由于编者水平有限，疏漏在所难免，恳请读者不吝指正。

编 者

2010年3月于西安

第一版前言

扩展频谱通信(简称扩频通信)技术是当今信息社会最为先进的无线电通信技术之一。由于扩频技术具有抗干扰能力强,抗截获,抗多径、多址能力强,保密性好及测距精度高等一系列优点,因而越来越受到人们的重视。随着大规模和超大规模集成电路技术、微电子技术、数字信号处理技术的迅猛发展,以及一些新型器件的出现,使得扩频技术在无线局域网,皮网,2G、3G移动通信,卫星全球定位,军用通信,航天通信和深空探测等诸多领域都得到了较为广泛的应用。

多年来,各高校的扩频通信课程多为硕士研究生开设,少有的两三本教材也都是为研究生所编写。近年来,不少院校都为本科通信工程、信息工程、电子信息与科学等专业开设了扩频通信课,但尚没有一本供本、专科教学用扩频通信课的教材。本书正是为适应这一需求而编写的。编者集多年从事研究生和本科移动通信、扩频通信等专业课教学经验,努力使十分庞杂的讲课内容压缩在前5章之内,以适应大学专业课课时受限制的要求。新编《扩频通信技术及应用》一书具有以下特点:

(1) 面向高等学校通信工程、信息工程、电子信息与科学等本、专科,适合32~36学时安排,内容充实,知识系统,较好地反映了当今技术现状。

(2) 偏重理论联系实际,符合“面向21世纪,注重能力培养”的教材编写宗旨。

(3) 从结构上分为两大部分:第一部分由第1~5章构成理论教学篇,供课堂授课之用;第6~9章构成实际应用篇,供任课教师教学参考,也可供学生进行课程设计和毕业设计参考之用。其中有多种最新专用集成电路(ASIC)的介绍和系统设计的应用。

新编教材较为系统地阐述了扩频通信的基本原理和各种技术特点,较为完整地描述了各类扩频收、发信机的构成原理和多种实用伪随机编码技术,较为明确地分析了扩频信号的解扩与解调原理,较为详细地介绍了各类扩频通信系统的同步捕获和同步跟踪技术。

本书共分9章。第1章阐述扩频通信技术的原理和理论依据;第2章介绍4种扩频通信系统的工作原理;第3章讲述多种扩频系统用伪随机编码技术;第4章系统地讲解扩频接收机的解扩和解调;第5章较为详细地讲述扩频通信系统的同步捕获和同步跟踪技术。上述5章供课堂教学之用。后4章为实际应用而编写,有直接序列扩频技术的应用,跳频扩频技术的应用,混合扩频和线性调频技术的应用,声表面波滤波器件在扩频通信系统中的应用。

建议授课学时:第1章为4课时;第2、3、4章均为8课时;第5章为4课时。

本教材在编写中重点参考了查光明、熊贤祚、曾兴雯、刘乃安、孙献璞、王秉钧、朱近康等学者所编写的研究生教材,在此表示对这几位学者的敬意。

本书除了适合各类高等学校通信工程、信息工程、电子信息与科学等专业作专业课教学使用外,也可供从事无线电通信的工程技术人员作为学习和研发参考用书。

本书由韦惠民主编。第1~5章由韦惠民编写;第6~9章由殷晓虎、暴宇编写。全书由

韦惠民统稿，崔星、殷晓虎录入和校对。

本书在编写过程中得到了李国民、李白萍的大力支持，也得到了西安电子科技大学出版社领导和编辑部的关心。对他们的支持和关心在此深表谢意。特别感谢夏大平、毛红兵编辑为本书按时出版所付出的辛劳；没有夏大平责任编辑的细心编校，就没有本书的顺利出版。对他们特别认真负责的工作作风深表敬意。

最后，我们还应感谢本书的主审张邦宁教授。他对本书的编写有较高的评价，同时也提出了一些修改意见，在此对他的支持表示深深的谢意。

由于编者水平有限，差错在所难免，恳请读者不吝指正。

编 者

2007年7月于西安

目 录

第 1 章 扩频通信技术原理	1
1.1 扩频通信的发展历程	1
1.2 扩频通信的基本概念和理论基础	2
1.2.1 扩频通信的含义	2
1.2.2 扩频的理论基础	3
1.3 扩频的基本原理和扩频方式	4
1.3.1 扩频的基本原理	4
1.3.2 主要的扩频方式	5
1.4 扩频通信的系统参数和特点	9
1.4.1 处理增益和干扰容限	9
1.4.2 扩频系统的特点	10
习题	11
第 2 章 伪随机序列	12
2.1 伪随机码的基本概念	12
2.1.1 相关性的概念	12
2.1.2 码序列的相关函数	14
2.1.3 伪随机码的定义	14
2.2 m 序列	15
2.2.1 m 序列的产生	15
2.2.2 m 序列的特性	19
2.2.3 m 序列的功率谱	22
2.2.4 m 序列的个数	23
2.3 Gold 序列	24
2.3.1 m 序列的优选对	24
2.3.2 Gold 序列的产生	25
2.3.3 Gold 序列的特性	25
2.3.4 平衡 Gold 序列	26
2.3.5 平衡 Gold 码的产生方法	27
2.4 M 序列	31
2.4.1 M 序列的产生	31
2.4.2 M 序列的特性	32
2.4.3 M 序列的数量	32
2.5 组合码	33
2.5.1 组合码的构造方法	33
2.5.2 逻辑乘组合码	33

2.5.3 模 2 和组合码	35
2.6 其他扩频码	37
2.6.1 R-S 码	37
2.6.2 Walsh 序列	38
2.6.3 巴克码	39
习题	40
第 3 章 直接序列扩频系统	41
3.1 直扩系统简介	41
3.2 直扩系统的数学分析	42
3.3 直扩系统的发送端	45
3.3.1 直扩系统的载波抑制	45
3.3.2 直扩系统的射频带宽和处理增益	46
3.3.3 直扩系统的调制方式	47
3.4 直扩系统的接收端	53
3.4.1 相关接收机	53
3.4.2 相关解扩	55
3.4.3 相关器的性能	58
3.4.4 基带解调(基带恢复)与载波同步	61
3.5 直扩系统的抗干扰能力	66
3.5.1 加性白噪声干扰	66
3.5.2 窄带干扰和单频干扰	67
3.5.3 正弦脉冲干扰	68
3.5.4 多径干扰和 RAKE 接收	68
3.6 直扩系统的多址能力	72
3.7 直扩系统的测距能力	75
3.8 软扩频	76
3.9 直扩系统的特点	78
习题	78
第 4 章 跳频通信系统	80
4.1 跳频系统简介	80
4.2 跳频系统的信号分析	81
4.3 跳频系统的跳频图案	82
4.3.1 跳频图案的概念和设计要求	82
4.3.2 m 序列生成跳频序列	84
4.3.3 R-S 码生成跳频序列	86
4.4 跳频系统的发送端	88
4.4.1 信息的调制方式	88
4.4.2 常用的非相干跳频系统	89
4.4.3 跳频速率和跳频数目	91
4.5 跳频系统的接收端	94
4.5.1 跳频系统的接收机结构	95

4.5.2	二进制跳频系统的相关解跳	95
4.5.3	多进制跳频系统的相关解跳	98
4.5.4	跳频系统的非相干解调	99
4.6	跳频系统的抗干扰性能	102
4.7	跳频系统的特点及其与直扩系统的比较	105
4.8	跳时系统	106
4.9	混合扩频系统	107
	习题	109
第 5 章 扩频通信的扩频码同步		110
5.1	同步不确定性的来源	110
5.2	直扩系统的伪码同步	112
5.2.1	伪码同步的概念及实现步骤	112
5.2.2	伪码的捕获方法	113
5.3	滑动相关捕获法	116
5.3.1	单积分滑动相关捕获法	116
5.3.2	双积分滑动相关捕获法	118
5.4	匹配滤波器捕获法	120
5.5	顺序估计快速捕获法	122
5.6	直扩同步的跟踪	123
5.6.1	延迟锁定环	123
5.6.2	双 Δ 值延迟锁定环	125
5.6.3	τ 抖动环	126
5.7	跳频系统的同步	128
5.7.1	跳频同步的内容和要求	129
5.7.2	跳频图案的同步	130
5.7.3	跳频系统的跟踪	133
5.8	跳频系统的扫描驻留同步法	135
5.8.1	基本原理	135
5.8.2	同步头的结构	136
5.8.3	扫描驻留同步	137
	习题	138
第 6 章 典型扩频通信系统举例		139
6.1	CDMA 2000 系统	139
6.1.1	CDMA 2000 系统概述	139
6.1.2	CDMA 2000 物理信道结构	140
6.1.3	物理信道的扩频调制	142
6.1.4	扩频码	146
6.2	GPS 全球卫星定位系统	148
6.2.1	系统概述	148
6.2.2	GPS 的码和信号	149
6.2.3	GPS 的定位原理	154

6.2.4	GPS 信号的捕获和跟踪	155
6.3	无线局域网中的扩频技术	156
6.4	蓝牙技术	157
6.5	时分多址混合扩频系统——JTIDS	160
第 7 章	扩频系统的方案设计(一)	165
7.1	用 ASIC(Stel-2000 和 Z87200)构成数传收发机	165
7.1.1	直扩专用芯片 Stel-2000A 的工作原理	165
7.1.2	用 Z87200 构成数传收发机	171
7.2	用 SX043 芯片实现高处理增益的扩频系统	187
7.3	电力线载波通信用收发信机电路设计	192
7.3.1	电路框图	192
7.3.2	芯片介绍	193
7.3.3	电力线扩频载波电路图及工作原理	200
7.3.4	程序流程图和程序清单	202
第 8 章	扩频系统的方案设计(二)	205
8.1	用 AD9852+PLL 实现高速跳频器	205
8.1.1	实现跳频器的关键问题	205
8.1.2	芯片选择和芯片工作原理	206
8.1.3	PN 码发生器的设计	211
8.1.4	高速跳变频率合成器的设计方案	212
8.2	FH/DS 混合扩频数传系统的设计	221
8.2.1	发射/接收模块原理性设计	221
8.2.2	采用 DSP 和 FPGA 模块的方案设计(一)	221
8.2.3	采用 DSP 和 FPGA 模块的方案设计(二)	224
8.2.4	采用 CPLD 芯片的方案设计	226
8.3	Chirp 扩频技术的应用	227
第 9 章	扩频系统的仿真	237
9.1	伪随机码的生成及相关函数的计算	237
9.2	直扩系统发送端的仿真	241
9.3	直扩系统接收端的仿真	244
9.4	直扩系统伪码同步仿真	247
9.5	跳频序列的设计	250
参考文献	252

第1章 扩频通信技术原理

通信现代化是人类社会进入信息时代的重要标志。在现代通信中,干扰问题是一个重要的问题。随着通信事业的发展,各类通信网不断建立,使得有限的频率资源更加拥挤,相互之间的干扰更为严重。如何在恶劣的环境条件下,保证通信有效、准确、迅速地进行是摆在当今通信科研人员面前的一个难题。

扩展频谱(SS, Spread Spectrum, 简称扩频)技术具有许多特有的优点。将其用于通信系统中,可以大大提高通信系统的抗干扰性能,这在当今世界电磁环境越来越恶劣的情况下,尤为引人注目。将其用于移动通信系统,不但可以实现 CDMA 移动通信系统,而且能减轻甚至消除由于移动信道多径时延扩展所引起的频率选择性衰落对数字移动通信系统性能的影响。扩频通信技术已成为当今无线电通信的主流技术。因此,为什么要扩展数据信息的频谱以及如何扩展信号的频谱就成为我们首先要研究的问题。

1.1 扩频通信的发展历程

扩频通信技术是一种非常重要的抗干扰通信技术。它最初是在军事抗干扰通信中发展起来的,目前在民用移动通信中也得到了广泛的应用,处于繁荣阶段。它与光纤通信、卫星通信一同被称为进入信息时代的三大高技术通信传输方式。

早在 20 世纪 20 年代中期诞生的 RADAR(Radio Detection and Ranging)系统,利用回波证明了电离层的存在,其发射频谱宽度大于回波频谱宽度,具备了扩频通信系统的基本特征。30 年代,德国工程师 Paul Kotowski 和 Kurt Dannehl 申请的专利中设计的伪装语音设备已具有了扩频通信的一些基本要素。

1948 年前后,香农(C. E. Shannon)著名的《通信中的数学理论》等论文的发表,奠定了信息论的基础,并且这些理论也成为扩频技术的理论依据。1949 年,Derosa 和 Rogoff 完成了世界上第一个直接序列扩频系统。随后在 1950 年,美国麻省理工学院在此基础上成功研制出 NOMAC(Noise Modulation and Correlation)系统,这是一个成熟的扩频通信系统。而在 1941 年, Hedy K. Markey 和 George Antheil 提出了世界上第一个跳频技术专利,但直到 1963 年,美国海军 Sylvania 的 BLADES(Buffalo Laboratories Application of Digitally Exact Spectra)系统才成为世界上第一个研制成功的跳频通信系统。

进入 20 世纪 60 年代以后,随着科学技术的迅速发展,特别是在晶体管、集成电路和各种信号处理器问世后,扩频技术才有了重大的突破和发展,使扩频系统得到了广泛的应用。在军事通信领域出现了全球定位(GPS)系统、通信数据转发卫星系统(TDESS)、

SINGARS 系统及 JTIDS 系统等。

1985 年 5 月美国联邦通信委员会(FCC)制定了民用公共安全、工业、科学与医疗和业余无线电采用扩频通信的标准和规范,从此扩频技术获得了更加广泛的应用。1995 年美国 Qualcomm 公司推出了 IS-95 CDMA 系统,首次将直扩技术用于民用的蜂窝移动通信中,获得了巨大的成功。2000 年,国际电信联盟(ITU)接纳扩频技术的 CDMA 为第三代移动通信的三大主流技术的核心技术,表明扩频技术已经处于其发展的鼎盛时期。目前除了应用于军事安全保密通信外,扩频技术正广泛应用于卫星通信、第三代和未来的第四代移动通信、定位、无线局域网、蓝牙及最新的超宽带(UWB)系统中,显示出其强大的生命力。

1.2 扩频通信的基本概念和理论基础

1.2.1 扩频通信的含义

扩频通信技术是一种信息传输方式,在发端采用扩频码调制,使信号所占的频带宽度远大于所传信息需要的带宽;在收端采用相同的扩频码进行相关处理后再进行解调,以恢复所传信息数据。这一定义其实包含了以下三方面含义:

(1) 信号的频谱被展宽了。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,人类语音的信息带宽为 300~3400 Hz,电视图像的信息带宽为 6 MHz。在常规通信系统中,为了提高频率利用率,通常都尽量采用带宽大体相当的信号来传输信息,亦即在无线电通信中射频信号的带宽与所传信息的带宽是相比拟的,即一般属于同一个数量级。如用调幅(AM)信号来传送语言信息,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,即使是调频(FM)或脉冲编码调制(PCM)信号,其带宽也只是信息带宽的几倍。扩频通信的信号带宽与信息带宽之比则高达 100~1000,属于宽带通信,为什么要用频带这么宽的信号来传输信息呢?这样岂不是太浪费宝贵的频率资源吗?后文将用信息论和抗干扰理论来回答这个问题。

(2) 采用扩频码序列调制的方式来展宽信号频谱。由信号理论可知,在时间上有限的信号,其频谱是无限的。脉冲信号宽度越窄,其频谱就越宽。作为工程估算,信号的频带宽度与其脉冲宽度近似成反比。例如,1 μ s 脉冲的带宽约为 1 MHz。因此,如果很窄的脉冲码序列被所传信息调制,则可产生很宽频带的信号,这种很窄的脉冲码序列(其码速率是很高的)即可作为扩频码序列。其他的扩频系统(如跳频系统)也都是采用扩频码调制的方式来实现信号频谱扩展的。需要说明的是,所采用的扩频码序列与所传的信息数据是无关的,也就是说,它与一般的正弦载波信号是相类似的,丝毫不影响信息传输的透明性,仅仅起扩展信号频谱的作用。

(3) 在接收端用相关处理来解扩。正如在一般的窄带通信中,已调信号在接收端都要进行解调来恢复发端所传的信息一样,在扩频通信中接收端则用与发端完全相同的扩频码序列与收到的扩频信号进行相关解扩,然后通过解调电路恢复出数据。

这种在发端把窄带信息扩展成宽带信号,而在收端又将其解扩成窄带信息的处理过程,具有一系列好处,我们将在后面作进一步说明。

1.2.2 扩频的理论基础

长期以来,人们总是想方设法使信号所占频谱尽量窄,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基本公式加以说明。

香农在其信息论中得出了带宽与信噪比互换的关系式,即香农公式:

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

式中, C 为信道容量,单位为 b/s; B 为信号频带宽度,单位为 Hz; S 为信号平均功率,单位为 W; N 为噪声平均功率,单位为 W。

香农公式指出,在给定信号平均功率 S 和白噪声平均功率 N 的情况下,只要采用某种编码系统,就能以任意小的差错概率,以接近于 C 的传输速率来传送信息。这个公式还暗示,在保持信息传输速率 C 不变的条件下,可以用不同频带宽度 B 和信噪功率比(简称信噪比)来传输信息。换言之,频带 B 和信噪比是可以互换的。也就是说,如果增加信号频带宽度,就可以在较低信噪比的条件下以任意小的差错概率来传输信息。甚至在信号被噪声淹没的情况下,只要相应地增加信号带宽,也能进行可靠的通信。由此可见,扩频通信系统具有较强的抗噪声干扰的能力。

需要指出的是,当 B 增加到一定程度后,信道容量 C 不可能无限地增加。由式(1-1)可知,信道容量 C 与信号带宽成正比,增加 B ,势必会增加 C ,但当 B 增加到一定程度后, C 增加缓慢。由于 $N = n_0 B$,因而随着 B 的增加, N 也要增加,从而使信噪比 S/N 下降,影响到 C 的增加。考虑极限情况,令 $B \rightarrow \infty$,我们来看 C 的极限值:

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \lim_{B \rightarrow \infty} B \text{lb} \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \quad (1-2)$$

考虑到极限

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{x} \text{lb}(1+x) = \text{lb} e = 1.44 \quad (1-3)$$

则可得

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = 1.44 \frac{S}{n_0} \quad (1-4)$$

由此可见,在信号功率 S 和噪声功率谱密度 n_0 一定时,信道容量 C 是有限的。

由上面的结论,可以推导出信息速率 R 达到极限信息速率,即 $R = R_{\max} = C$,且带宽 $B \rightarrow \infty$ 时,信道要求的最小信噪比 E_b/n_0 的值。 E_b 为码元能量, $S = E_b R_{\max}$,由式(1-4)知

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = R_{\max} = 1.44 \frac{S}{n_0}$$

可得

$$\frac{E_b}{n_0} = \frac{S}{n_0 R_{\max}} = \frac{1}{1.44} \quad (1-5)$$

由此可得信道要求的最小信噪比为

$$\left(\frac{E_b}{n_0} \right)_{\min} = \frac{1}{1.44} = 0.694 = -1.6 \text{ dB}$$

用扩展频谱的方法换取通信系统接收机输入端对 C/N (载噪比)或 S/N (信噪比)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,很能说明问题。第一代蜂窝移动通信系统采用话音调频(FM);接收机输入端要求 $(C/N) \geq 18$ dB;第二代数字蜂窝移动通信系统的 GSM 系统采用 TDMA、GMSK 数字话音调制,接收机输入端信干比要求 $(S/I) \geq 9$ 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 4.5 dB 时,相当于载干比 $(C/I) = -15$ dB。

1.3 扩频的基本原理和扩频方式

1.3.1 扩频的基本原理

为了弄清扩频原理,必须了解信号波形与频谱的关系。任何周期性的时间波形都可以看成是许多不同幅度和频率的正弦波之和。这些不同的频率成分,在频谱上就占有一定的频带宽度。在扩频通信中,最常用的是周期性矩形脉冲序列,下面着重讨论周期性矩形脉冲序列的频谱形状。

图 1-1(a)为一周期性脉冲序列 $g(t)$ 的波形及其频谱函数 $A(f)$ 。图中 E 为脉冲的幅度, τ_0 为脉冲宽度, T_0 为脉冲的重复周期,并设 $T_0 = 5\tau_0$ 。根据傅氏变换,其频谱分布为一列离散谱线,由基波频率 f_0 及 $2f_0$ 、 $3f_0$ 、 \dots 高次谐波所组成。随着谐波频率的升高,幅度逐渐减小。对于棱角分明的波形,在理论上包含有无限多的频谱成分。简单来说,时间有限的波形,在频谱上是无限的。反之,频谱有限的信号,在时间上也是无限的。但一般来说,信号的能量主要集中在频谱的主瓣内,即频率从 0 到 $A(f)$ 的第一个零点的频变为止的宽度内。这个宽度常称为信号的频带宽度,记作 B (或 B_{f_0})。如图 1-1(a)所示的频带宽度 B_{f_0} 为

$$B_{f_0} = \frac{1}{\tau_0} = \frac{5}{T_0} = 5f_0 \quad (1-6)$$

信号的频谱间隔取决于脉冲序列的重复周期,即 $f_0 = 1/T_0$ 。如图 1-1(a)所示的 5 条谱线 f_0 、 $2f_0$ 、 $3f_0$ 、 $4f_0$ 和 $5f_0$,相邻的谱线间隔均为 f_0 。图 1-1(b)中,脉冲宽度仍为 τ_0 ,但脉冲周期为 $2T_0 = 10\tau_0$,即与图 1-1(a)相比较,其脉冲宽度 τ_0 不变,而脉冲周期增加一倍。因此其频带宽度不变(频带宽度取决于脉冲宽度),即仍为 $1/\tau_0$,而基波频率减半,即为 $f_0/2$,各个谱线的频率分别为 $f_0/2$, f_0 , $(3/2)f_0$, \dots , $5f_0$ 共 10 个。由此可知,脉冲重复周期增加一倍,基频降低一半,谱线间隔也减小一半,谱线密度增加一倍。

图 1-1(c)中,脉冲宽度 τ_1 缩窄一半,即 $\tau_1 = \tau_0/2$,而脉冲重复周期同图 1-1(a)相同,仍为 T_0 。根据上述分析,脉冲信号的谱线间隔取决于脉冲序列的周期,因此图 1-1(c)的谱线间隔仍为 $1/T_0 = f_0$,而脉冲信号的谱线带宽取决于脉冲信号宽度,此时带宽为图 1-1(a)的两倍,即

$$B_{f_1} = \frac{1}{\tau_1} = \frac{2}{\tau_0} = \frac{10}{T_0} = 2B_{f_0}$$

由图 1-1(c)可见,频谱线间隔不变,但信号的频带宽度增加一倍。此外,由图 1-1 还可以看出,无论是脉冲重复周期的增大还是脉冲宽度的减小,都使频谱函数的幅度降低了。

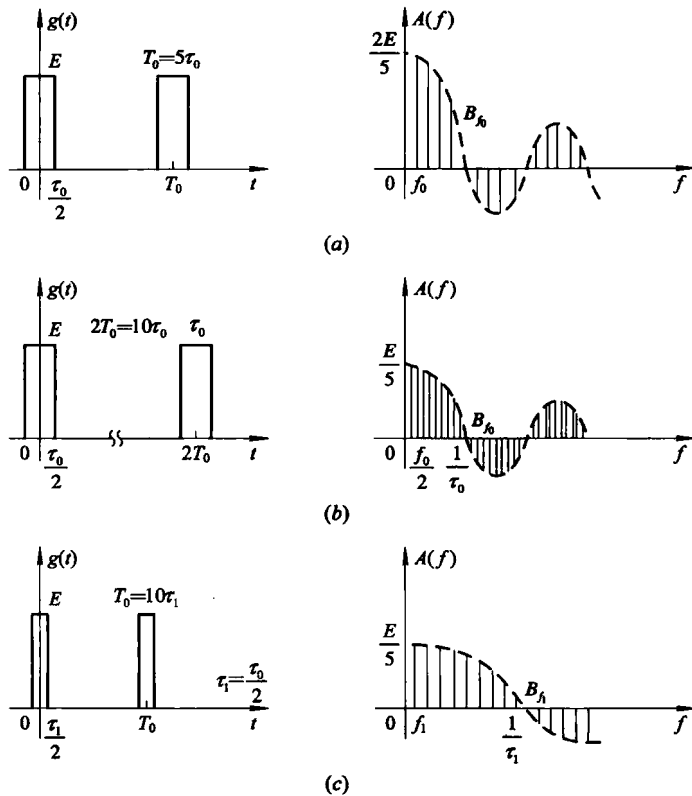


图 1-1 周期性矩形脉冲序列波形及其频谱

(a) 脉冲宽度 τ_0 , 脉冲周期 $T_0 = 5\tau_0$; (b) 脉冲宽度 τ_0 , 脉冲周期为 $2T_0$;

(c) 脉冲宽度 $\tau_0/2$, 脉冲周期为 T_0 。

从上面的讨论中可以得到三个重要的结论：

(1) 为了扩展信号的频谱，可以采用窄的脉冲序列调制某一载波。采用的脉冲宽度越窄，扩展的频谱就越宽。如果脉冲的重复周期为脉冲宽度的 2 倍，即 $T = 2\tau$ ，则脉冲宽度缩窄对应于码重复频率的提高，即采用高速率的脉冲序列调制，可获得扩展频谱的目的。直接序列扩展频谱正是应用了这一原理，直接用重复频率很高的窄脉冲序列来展宽信号的频谱。

(2) 如果信号的总能量不变，则频谱的展宽势必使各频谱成分的幅度下降，换句话说，使信号的功率谱密度降低。这就是为什么可以用扩频信号进行隐蔽通信，及扩频信号具有低的被截获概率的原因。

(3) 在较宽的信息周期内，如果载送信息的符号波形是一个窄脉冲，那么其信号的频谱要比所传信息的带宽要宽，跳时系统利用的正是这个原理。

1.3.2 主要的扩频方式

扩频通信的一般原理如图 1-2 所示。在发端输入的信息经信息调制形成数字信号，然后由扩频码发生器产生的扩频码序列调制数字信号以展宽信号的频谱。展宽以后的信号再对载频进行调制(如 PSK 或 QPSK、OQPSK 等)，通过射频功率放大后送至天线发射。在

收端，从接收天线上收到的宽带射频信号，经过输入电路、高频放大器后送入变频器，下变频至中频，然后由本地产生的与发端完全相同的扩频码序列解扩，最后经信息解调，恢复成原始信息输出。

由图 1-2 可见，扩频通信系统与普通数字通信系统相比较，就是多了扩频调制和解扩部分。

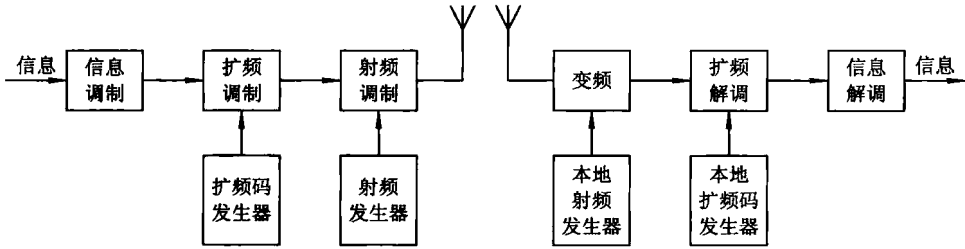


图 1-2 扩频通信原理方框图

按照扩展频谱的方式不同，目前的扩频通信系统可分为直接序列(DS)扩频、跳频(FH)、跳时(TH)、线性调频(Chirp)，以及上述几种方式的组合。下面分别作一些简要的说明。

1. 直接序列(DS)扩频

直接序列(DS, Direct Sequence)扩频就是直接用具有高码率的扩频码序列在发端扩展信号的频谱。而在收端，用相同的扩频码序列进行解扩，把展宽的扩频信号还原成原始的信息。直接序列扩频的原理如图 1-3 所示。例如，我们用窄脉冲序列对某一载波进行二相相移键控调制。如果采用平衡调制器，则调制后的输出为二相相移键控信号，它相当于载波抑制的调幅双边带信号。图 1-3 中输入载波信号的频率为 f_c ，窄脉冲序列的频谱函数为 $G(f)$ ，它具有很宽的频带，平衡调制器的输出则为两倍脉冲频谱宽度，而 f_c 被抑制的双边带展宽了扩频信号，其频谱函数为 $f_c + G(f)$ 。以后我们将说明，在接收端应用相同的平衡调制器作为解扩器，可将频谱为 $f_c + G(f)$ 的扩频信号，用相同的码序列进行再调制，将其恢复成原始的载波信号 f_c 。关于直接序列扩频系统的组成和工作原理及抗干扰性能等问题，将在第 3 章作较为详细的介绍。

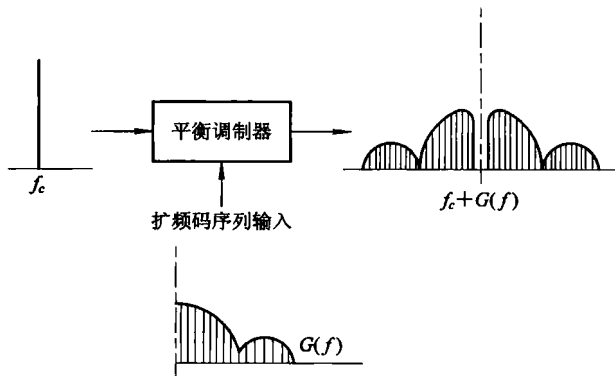


图 1-3 直接序列扩展频谱原理图