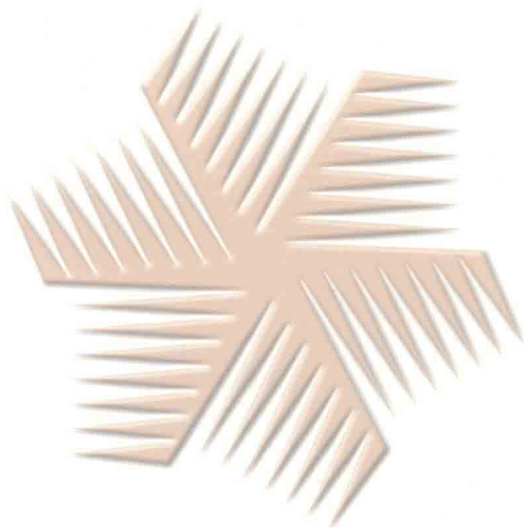


信息通信专业教材系列

扩展频谱通信

KUOZHAN PINPU TONGXIN

刘焕淋 向劲松 代少升 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

信息通信专业教材系列

扩展频谱通信

刘焕淋 向劲松 代少升 编著

北京邮电大学出版社
·北京·

内 容 简 介

扩展频谱通信是现代通信技术发展的一类重要通信方式和技术。全书分7章介绍扩展频谱通信技术原理的主要内容。第1章介绍了扩频通信的理论基础、性能参数及数学模型,并概述了扩展频谱通信的特点。第2章分析了扩展频谱通信系统的抗干扰能力、多址能力及精确测速和测距性能。第3章概述了直接序列扩频、跳频扩频、跳时系统及混合扩频系统的组成及工作原理,并讨论了表面声波器件在扩展频谱系统中的应用。第4章讨论了扩展频谱通信中几种常用的序列,包括伪随机序列、m序列、M序列、Gold序列和其他扩频序列。第5章讨论了扩频序列的同步捕获及判决检测方法。第6章专门讨论了扩频序列的同步跟踪问题,介绍了几种跟踪回路。第7章是扩展频谱技术的应用举例。

本书可作为高等学校通信工程专业高年级学生和息类专业硕士研究生的扩频通信技术课程的教材,也可以作为通信工程相近专业或相关领域工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

扩展频谱通信/刘焕淋,向劲松,代少升编著. --北京:北京邮电大学出版社,2008

ISBN 978-7-5635-1864-7

I. 扩… II. ①刘…②向…③代… III. 扩频通信 IV. TN914.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 150483 号

书 名: 扩展频谱通信

作 者: 刘焕淋 向劲松 代少升

责任编辑: 陈 瑶

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市梦宇印务有限公司

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

印 张: 13

字 数: 284 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1864-7

定 价: 22.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

扩展频谱通信技术是建立在信息论基础上的一种新通信体制,是当今信息社会最为先进的无线电通信技术之一。由于扩展频谱通信具有很强的抗干扰、抗截获、抗多径能力,以及具有多址能力强、保密性好和测量精确等优点,不仅在军事通信中占有重要的地位,在民用通信中也得到越来越广泛的应用。随着微电子技术、超大规模集成电路技术、数字信号处理技术的迅速发展和新型器件的出现,扩展频谱通信技术在无线局域网、2G/3G 移动通信、卫星通信、军用通信、航空航天和深空探测等诸多领域都得到了较为广泛的应用,扩展频谱技术是提高强电子干扰环境下通信设备抗干扰能力的最有效通信手段。

面对通信技术的飞速发展,造就一批能够适应现代科技发展、掌握扩展频谱通信理论和技术需求的人才培养迫在眉睫。在高等院校的通信工程本科专业、通信与信息系统、信号与信息处理等相近研究生专业的教学计划中,都开设了扩展频谱通信原理和技术课程。本书正是为了适应专业人才教学和培养要求、跟踪通信科技发展需求而编写的。编者集多年从事研究生和本科生扩展频谱通信原理等专业课教学经验,努力使庞杂的授课内容压缩在有限的 32 学时之内。

本书的第 1 章介绍了扩频通信的理论基础、性能参数及数学模型,并概述了扩展频谱通信的特点。第 2 章分析了扩展频谱通信系统的抗干扰能力、多址能力及精确测速和测距性能。第 3 章概述了直接序列扩频、跳频扩频、跳时系统及混合扩频系统的组成及工作原理,并讨论了表面声波器件在扩展频谱系统中的应用。第 4 章讨论了扩展频谱通信中几种常用的序列,包括伪随机序列、m 序列、M 序列、Gold 序列和其他扩频序列。第 5 章讨论了扩频序列的同步捕获及判决检测方法。第 6 章专门讨论了扩频序列的同步跟踪问题,介绍了几种跟踪回路。第 7 章介绍了扩展频谱技术的应用。每章都配有一定量的练习思考题,供学习参考之用。

本书在编写过程中得到主讲老师向劲松、代少升老师的大力支持,他们参与了重点章节的编写工作。在成书过程中,重点参考了查光明、熊贤祚、曾兴雯、曾一凡、朱近康、田日才、何世彪、王秉均、刘乃安等学者所编写的教材和研究成果,在这里对本书所有参考文献的作者表示衷心感谢。

本书可作为高等学校通信工程专业高年级学生和信息类专业硕士研究生的扩频通信技术课程的教材,也可以作为通信工程相近专业或相关领域工程技术人员参考书。

由于作者水平有限,书中难免有错误和疏漏不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 扩展频谱通信概述

1.1 引言	1
1.2 扩展频谱通信的基本原理	3
1.3 扩展频谱通信的基本性能参数	6
1.4 扩展频谱通信系统模型	8
1.5 扩展频谱通信的特点	11
习题与思考题	13

第 2 章 扩展频谱通信系统的性能分析

2.1 引言	14
2.2 抗干扰的能力分析	16
2.2.1 抗广义平稳干扰能力分析	16
2.2.2 抗窄带与单频干扰能力分析	19
2.2.3 抗多径干扰能力分析	21
2.3 扩频通信的多址能力分析	24
2.4 扩展频谱通信系统的测距和测速能力分析	27
习题与思考题	30

第 3 章 扩展频谱通信系统

3.1 引言	32
3.2 直接序列扩频系统	32
3.2.1 直扩系统的组成及工作原理	32
3.2.2 直扩系统的调制方式	33
3.2.3 直扩信号的频谱特性	40
3.2.4 直扩信号的解扩	42
3.2.5 基带解调与载波同步	46
3.2.6 直扩系统的几个参数及抗干扰能力	50
3.3 跳频扩频系统	57

3.3.1 跳频系统的组成及工作原理	57
3.3.2 跳频系统的基本调制方式	60
3.3.3 跳频系统的主要性能参数	64
3.3.4 跳频器	66
3.3.5 跳频序列设计	74
3.3.6 跳频信号的解跳与解调	77
3.3.7 跳频系统的抗干扰能力	82
3.4 跳时系统	85
3.5 3种扩频方式性能比较	86
3.6 混合扩频系统	88
3.7 表面波器件	91
3.7.1 声表面波器件的结构	92
3.7.2 声表面波抽头延迟线	93
3.7.3 声表面波相关/卷积器	95
习题与思考题	97

第4章 扩频序列

4.1 引言	99
4.2 移位寄存器序列	101
4.3 m序列	104
4.3.1 m序列的产生	104
4.3.2 m序列的性质	109
4.3.3 m序列的相关函数	111
4.4 M序列	114
4.5 Gold序列	116
4.5.1 m序列优选对	118
4.5.2 Gold序列族	120
4.5.3 平衡Gold序列	121
4.6 其他扩频序列	125
4.6.1 截短m序列	125
4.6.2 混沌扩频序列	126
4.6.3 正交序列	129
4.6.4 多相序列	130
习题与思考题	132

第5章 扩频序列的捕获

5.1 引言	134
--------	-----

5.2 捕获方法	137
5.2.1 串行和并行捕获方法	137
5.2.2 匹配滤波器法	140
5.2.3 发射参考信号法	142
5.2.4 顺序估计快速捕获方法	143
5.3 捕获的判决检测方法	144
5.3.1 固定积分时间检测	144
5.3.2 多次驻留时间检测	148
5.3.3 序列检测	149
习题与思考题	153
第 6 章 扩频序列的跟踪	
6.1 引言	154
6.2 宽带信号的最佳跟踪	155
6.3 基带延迟锁定跟踪环	157
6.4 非相干延迟锁定跟踪环	159
6.5 τ 摆动非相干跟踪环	163
6.6 双摆动非相干跟踪环	167
6.7 跳频系统跟踪回路	169
习题与思考题	175
第 7 章 扩展频谱技术的应用	
7.1 引言	176
7.2 扩频测距的应用	177
7.3 在 CDMA 系统中的应用	180
7.4 在卫星通信中的应用	186
7.5 在数字水印技术中的应用	191
7.6 在电力线通信中的应用	193
7.7 其他应用	195
习题与思考题	198
参考文献	199

第 1 章

扩展频谱通信概述

1.1 引 言

扩展频谱通信是现代通信技术的热点技术之一。几十年来,通信技术不断发展和演变,从有线(电缆、光纤)到无线(短波、VHF/UHF、微波、卫星),基本上都是媒质和信道的变化,而突破性的进展并不多。扩展频谱通信系统的出现,是通信技术的一次重大突破。通常的超短波(VHF/UHF)通信,10 W 电台能通信 20~30 km 远,而采用扩展频谱通信,10 mW 电台能传输 30~50 km,也就是说扩展频谱系统能带来 30 dB 以上的信噪比改善。从 1876 年贝尔发明电话以来,人们几十年来为信噪比的改善做出了极大的努力,使信噪比一个分贝一个分贝地改进和提高,而扩展频谱通信使 30 dB 甚至更大分贝的信噪比改善成为现实,仅此一点,已经足以说明扩展频谱通信是当代通信技术的重大突破。

扩展频谱(SS: Spread Spectrum)通信技术是一种非常重要的抗干扰通信技术,目前已被广泛运用在军事与民用通信系统中,它与光纤通信、卫星通信,一同被誉为进入信息时代的三大高技术通信传输方式。扩展频谱一般简称为扩频,扩频是指用于传输信号的带宽远大于信息本身所需带宽的一种通信方式。显然,扩频通信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被传信息进行调制实现的;在接收端使用相同的扩频序列对扩频信号进行相关解调,还原出被传信息。

我们知道,传输任何信息都需要一定的带宽,如人类语音的信息带宽一般为 300~3 400 Hz,电视等视频信息带宽为几兆赫,为了充分利用有限的频率资源,其他通信系统通常是尽量采用大致相当的带宽来传送信息。如用调幅信号传送语音信号所需的带宽约为一般语音信号带宽的 2 倍;电视广播的射频信号带宽是其视频信号带宽的 1 倍多些,我们把调制后信号带宽与调制前信号带宽比值为 1~2 的通信称为窄带通信,人们现今使用的电话、广播系统,无论是采用调幅、调频或脉冲编码调制制式,通信方式都属于窄带通信;只有调制带宽比值大于 100 甚至 1 000 的通信方式才称为扩频通信。扩频通信占用如此宽的频带传输信号是为了使信号具有强抗干扰能力,其理论基础将在下节说明。

扩展频谱通信技术最初是在军事抗干扰通信中发展起来的,后来又在移动通信中得

到广泛的应用,因此扩展频谱技术经历了两个发展阶段,目前,它在这两个领域仍占据重要的地位。扩展频谱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 Kurt Dannehl 申请了一个专利,专利中的伪装语音设备(masking voice device)发射机是由一个旋转产生器产生等带宽的噪声对话音进行“伪装”,接收时则利用一个相同的旋转器产生相同的噪声去除噪声对话音信号的影响,该专利虽然应用于模拟话音的加密,但却具有了早期扩展频谱通信系统的一些基本要素。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,并且在战后得出了“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(ITT; International Telephone and Telegraph Corp.)在向国家防御研究委员会(NDRC; National Defense Research Committee)提交的一份报告中建议采用编码控制窄带信号的频率偏移,使得信号在每一时间段占据宽频率段中的某一部分,敌人将不得不采用宽带的干扰信号。这一建议虽然未被采用,但它提出的通信思想即是今天人们熟悉的跳频通信。

世界上第一个直接序列扩展频谱系统是由 Derosa 和 Rogoff 于 1949 年在美国的联邦通信实验室(FTL)完成的,并一直成功地工作在 New Jersey 和 California 之间的通信线路上。理论研究紧跟其上,1950 年 Basore 首先提出把这种扩展频谱系统称作 NO-MACS(Noise Modulation And Correlation Detection System),这个名称被使用相当长的时间。1951 年后,美国的 ASC(Army Signal Corps; 陆军通信兵)要求进一步研究 NO-MACS,想把它应用于高频无线电传通信线路,以对抗敌人的干扰。1952 年由 Lincoln Laboratory 研制出 P9D 型 NOMACS 系统,并进行了试验。此后,在 1953—1955 年,Lincoln Lab 研制出了 F9C 型无限电传机系统。很快,美国海军和空军也开始研究他们自己的扩展频谱系统,空军使用名称为“Phantom”(鬼怪,幻影)和“Hush-Up”(遮掩),海军使用名称为“Blades”(桨叶)。那时扩展频谱通信系统的设备是用电子管装的,体积庞大,要装几间屋子,使应用受到限制。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,使扩展频谱系统得到广泛使用,并在实际的使用和实验中显示出优越性。第一本有关扩展频谱系统的专著是 R. C. Dixon 于 1976 年出版的,是一本 IEEE 通信汇刊的扩谱通信集。1978 年在日本举行了国际无线通信咨询委员会(CCIR),全会集中反映了当时扩谱通信研究的状况与成果,从此也开始了世界工业园内扩频通信技术及应用的研究。最近的二十几年,扩展频谱技术得到越来越广泛的使用。比如美国的全球定位系统(GPS)设备简单,定位精度高,全球使用;通信数据转发卫星系统(TDESS),码分多址(CDMA)卫星通信系统,特别是 NASA 和军用卫星通信系统几乎都使用扩展频谱技术;还有码分多址移动通信系统,这些都是直接序列扩频系统;跳时(FH)系统,如多种跳频电台[如 SINCGARS(30~80 MHz)];跳时-跳频混合型,如 JTIDS 系统(Joint Tactical Information Distribution System)。

一直到 20 世纪 80 年代初期,扩展频谱通信的概念都只是在军事通信系统中得到应用,这种状况到了 80 年代中期才得到改变,并在卫星通信、数据传输、定位、定时系统中都有使用。美国联邦通信委员会(FCC)于 1985 年 5 月发布了一份关于将扩展频谱技术应用到民用通信的报告,从此扩展频谱通信技术获得了更加广阔的应用空间。

扩展频谱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,而扩展频谱通信技术允许与其他通信系统共用频段,所以扩展频谱技术无绳电话的通信系统中获得了其在民用通信系统中应用的第一次成功经历。而真正使扩展频谱通信技术成为当今通信领域研究热点的是 1996 年投入商业运营的 CDMA 的应用,到 2000 年,采用扩频技术的 CDMA 被国际电信联盟(ITU)接纳为第三代移动通信的三大主流标准的核心技术。20 世纪 90 年代初,在第一代模拟蜂窝通信系统的基础上,出现了个人通信(PCS:Personal Communication System)研究的热潮。要实现 PCS 并考虑其长期发展,需要为其分配 100~200 MHz 的带宽,而与频谱分配相关的一个重要技术因素就是多址技术。当时频谱资源的分配已经是非常拥挤,不存在还未分配且可用的一段宽达 100 MHz 的频谱资源。要为 PCS 分配可用的频段就只有两种方案:一是为 PCS 分配一段专用频谱,使正在使用该频谱的用户换到其他的频段;另一种办法就是让 PCS 与其他用户共享一段频谱。采取第一种方案将要遇到巨大的政治和经济阻碍:当时只有政府使用的一些频段还比较宽松,因此只能是让政府用户换用其他频段来为 PCS 腾出频谱资源;同时换用频段意味着已有设备的射频部分需要改造,因此第二种方案成为合理的选择。扩展频谱技术为共享频谱提供了可能。使用扩展频谱技术能够实现码分多址,即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展频谱码实现多址通信。利用扩展频谱码的自相关特性能够实现给定用户信号的正确接收,将其他用户的信号看作干扰,利用扩展频谱码的互相关特性,能够有效抑制用户之间的干扰。此外由于扩展频谱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。

随着 PCS 以及蜂窝移动通信的发展,CDMA 技术已经成为移动通信领域不可或缺的关键技术,扩频技术除了在军事安全保密通信中的应用以外,正迅速地渗透到民用通信的各个领域,广泛地应用于卫星通信、第 3 代和未来的第 4 代移动通信、雷达、测距、定位及导航等系统,成为通信的一种重要方式,并显示了其强大的生命力。目前,扩展频谱通信技术正与人类社会发展的新兴技术相结合,提高扩展频谱通信的有效性和可靠性将成为扩频技术新的研究热点。

1.2 扩展频谱通信的基本原理

扩展频谱通信把信号调制扩频到一个很宽的频带上发送,系统的传输带宽比原始信号的带宽宽很多,其系统的复杂度比其他的窄带或宽带系统大很多,付出了高昂的代价。

长期以来,通信工程师们总是想法使信号所占频谱尽量窄,广泛选择不同调制方式,采用宽频信道(同轴电缆、微波和光纤等)和压缩频带等措施,同时力求使传输的媒介中传输的信号占用尽量窄的带宽,以充分利用十分宝贵的频谱资源。扩展频谱通信为什么要用这样的宽频带的信号来传送信息呢?简单的回答就是主要为了通信的安全可靠。

扩展频谱通信的理论基础是与香农(Shannon)的信息理论在同一时期发展并建立起来的。1948年,香农首次将统计理论有效地引入到通信领域,提出了著名的香农定理,开创了信息论与统计通信理论,为通信技术的发展奠定了坚实的理论基础,他证明了信号发射功率、带宽和加性噪声将限制信息的传输速率。

香农定理:在高斯白噪声干扰条件下,设信号带宽为 B (单位 Hz),信道输出信号平均功率为 S (单位 W),输出加性高斯噪声功率为 N (单位 W),则该通信系统的信道容量(单位 bit/s)为

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

式(1-1)给出了当信号与信道加性高斯噪声的平均功率给定时,在具有一定频带宽度 B 的信道上,理论上单位时间内可能传输的信息量的极限数值。只要信源的信息传输速率 R_i 小于等于信道容量,即 $R_i \leq C$,则总可以找到一种编码方式实现信号的无差错传输;若传输速率大于信道容量,则不可能实现信号的无差错传输。

若信道中噪声的单边功率谱密度为 N_0 ,则在信号带宽 B 内的噪声功率 $N = N_0 B$,则香农定理的另一表达形式为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 B} \right) \quad (1-2)$$

由香农定理可以得到如下结论。

增大信号功率 S 可以增加信道容量,从而增加了信息传输速率 R_i 的极限值。若信号功率趋于无穷大,则信道容量也趋于无穷大,即

$$\lim_{S \rightarrow \infty} C = \lim_{S \rightarrow \infty} B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 B} \right) \rightarrow \infty \quad (1-3)$$

减小噪声功率 N (或减小噪声功率谱密度 N_0)可以增加信道容量,若噪声功率趋于 0(或噪声功率谱密度 N_0 趋于 0),则信道容量趋于无穷大,即

$$\lim_{N \rightarrow 0} C = \lim_{N \rightarrow 0} B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \rightarrow \infty \quad (1-4)$$

增加信号带宽 B 可以增加信道容量,但不能无限制地增大 B 。当信号带宽 B 趋于无穷大时,信道容量的极限值为

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \lim_{B \rightarrow \infty} B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 B} \right) \quad (1-5)$$

考虑极限情况,即

$$\lim_{x \rightarrow \infty} x \log_2 \left(1 + \frac{1}{x} \right) = \log_2 e \approx 1.44 \quad (1-6)$$

令 $x = S/(N_0 B)$, 代入式(1-5)得

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \frac{S}{N_0} \lim_{B \rightarrow \infty} \frac{N_0 B}{S} \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 B} \right) = \frac{S}{N_0} \log_2 e = 1.44 \times \frac{S}{N_0} \quad (1-7)$$

式(1-7)表明,保持 S/N_0 一定,即使增加信号带宽 $B \rightarrow \infty$,信道容量 C 也是有限的。原因是当信号带宽 $B \rightarrow \infty$ 时,噪声功率 N 也趋于无穷大。

香农定理给出了通信系统所能达到的极限信息传输速率,达到极限速率的通信系统称为理想通信系统。在一定的信道容量条件下,信号带宽 B 、信号噪声功率比 S/N 是可以互换的,即可通过增加信号带宽 B 来减小发送信号功率,也可以通过增加发送功率来减小信号的带宽。那么,信号功率与信号带宽相对变化的速率如何呢?

设信道容量 C 给定,由于信道噪声的单边功率谱密度 N_0 往往也是给定的,互换前信号带宽和信号噪声功率比分别为 B_1 和 S_1/N_1 ,互换后的信号带宽和信号噪声功率比分别为 B_2 和 S_2/N_2 ,则代入式(1-2)有

$$B_1 \log_2 \left(1 + \frac{S_1}{N_0 B_1} \right) = B_2 \log_2 \left(1 + \frac{S_2}{N_0 B_2} \right) \quad (1-8)$$

例 1-1 某一系统的信号带宽 $B = 4 \text{ kHz}$,信噪比为 15,求该系统保证信息无差错通过信道的极限速率。在该值不变的条件下,若信号带宽分别增加 1 倍和减小一半,求该信号发射功率的相对变化值分别为多少?

解 根据香农定理,可求出系统的信道容量 C 值,由式(1-1)得

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 4000 \times \log_2 (1 + 15) = 16 \text{ kbit/s}$$

其中,信号的功率为 $S = 15N = 15BN_0$ 。

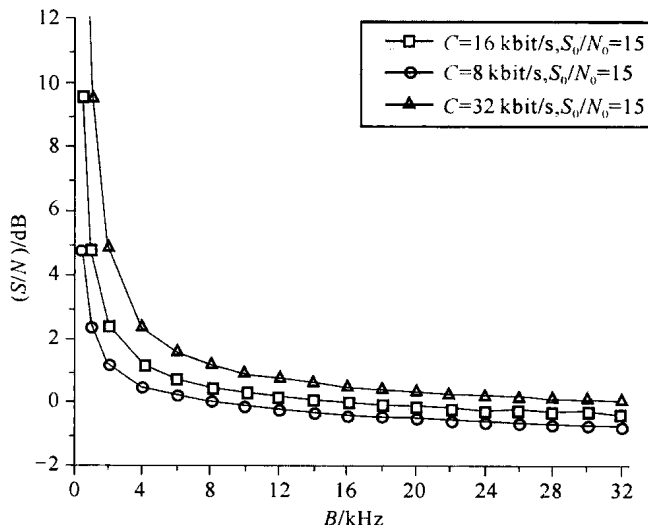


图 1-1 信噪比与带宽的互换关系

将信号带宽增加 1 倍, 即 $B_1 = 2B = 8 \text{ kHz}$, $N_1 = N_0 B_1$, C 不变, 代入式(1-2)可得 $S_1 = N_1(2^{C/B_1} - 1) = N_0 B_1(2^{C/B_1} - 1) = 6BN_0$ 。则 $\frac{S_1}{S} = \frac{6BN_0}{15BN_0} = 0.4$, 可见, 信号带宽增加 1 倍, 信号功率约减小为原来功率的 40%。

将信号带宽减小一半, 即 $B_2 = 0.5B = 2 \text{ kHz}$, $N_2 = N_0 B_2$, C 不变, 代入式(1-2)可得 $S_2 = N_2(2^{C/B_2} - 1) = N_0 B_2(2^{C/B_2} - 1) = 127.5BN_0$ (单位为 W)。则 $\frac{S_2}{S} = \frac{127.5BN_0}{15BN_0} = 8.5$, 即, 信号带宽增加 1 倍, 信号功率须增加为原来功率的 8.5 倍。

由图 1-1 可见, 在 C 不变的情况下, 信号带宽 B 与信号功率噪声比 S/N 是可以互换的。当 B 较小时, 增加 B 可使系统要求的信噪比迅速下降, 即信号发射功率可迅速减小; 而当 B 增加到一定程度时, S/N 下降比较缓慢, 即信号发射功率减少不多。同样, 增加 S/N , 也可减小 B 值, 但信号功率的增加远比带宽下降速度快, 由式(1-1)知, B 与 C 成正比关系, 而 C 与 S/N 成对数关系, 因此增加 B 比增加 S/N (或发射功率 S) 更加有效。在实践应用中, 信号带宽与信号发射功率 S 的互换作用涉及最优化选择 S/N 和 B 值的关系问题。

香农公式指明了扩展信号频谱增加带宽的方法可以换取信噪比的降低, 将信息展宽 100 倍, 甚至 1 000 倍以上来传输信息, 从而提高了通信的抗干扰能力, 实现强干扰环境下可靠安全的信息传输。这正是扩展频谱通信的基本理想和理论基础。

1.3 扩展频谱通信的基本性能参数

扩展频谱通信系统在发送端扩展了信号频谱, 在接收端解扩后恢复所传输的信息, 这一处理过程带来信噪比上的好处, 即使接收机输出的信噪比相对于输入端的信噪比大大降低, 从而提高了系统的抗干扰能力。因此, 我们可以用系统输出信噪比与输入信噪比的比值来表征扩频通信系统的抗干扰能力, 表示扩频系统信噪比改善的程度, 此比值称为扩频处理增益 G_p 。

1. 扩频处理增益

在一个信息处理系统中, 系统的输入信噪比、输出信噪比分别为 $(S/N)_{\text{in}}$, 和 $(S/N)_{\text{out}}$, 由系统的扩频处理增益 G_p 表示了信噪比的改善程度, 定义为

$$G_p = \frac{(S/N)_{\text{out}}}{(S/N)_{\text{in}}} \text{ 或 } G_p(\text{dB}) = 10\lg\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{out}} - 10\lg\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{in}} (\text{dB}) \quad (1-9)$$

由于高斯白噪声的功率谱近似均匀分布, 因此也常用扩频前后带宽的比值来近似估算系统的扩频处理增益, 即

$$G_p = \frac{B}{\Delta f} \quad (1-10)$$

式(1-10)中, B 代表已扩频后信号的射频带宽, Δf 代表原始(基带)信号带宽。在扩频通信系统中, 接收机作扩频解调后, 只提取伪随机编码相关处理后的带宽为 Δf 的信息, 而排除宽频带 B 中的外部干扰、噪声和其他用户的通信影响。

例 1-2 一个扩频系统的处理增益为 35 dB, 要求进入基带解调器的最小输出信噪比 $(S/N)_{\text{out}} = 18$ dB, 则系统的输入信噪比 $(S/N)_{\text{in}} = (S/N)_{\text{out}} - G_p = -17$ dB。

例 1-3 有一个扩展频谱通信系统, 信号扩频后带宽为 20 MHz, 原始基带信号带宽为 20 kHz, 则系统的扩频处理增益为 $G_p = 10 \lg[20 \times 10^6 \times / (20 \times 10^3)] = 30$ dB。

例 1-3 说明扩频系统在接收机射频信号输入端和基带信号输出端之间有 30 dB 的信噪比改善。

扩展频谱处理增益的大小, 决定了系统抗干扰能力的强弱, 目前国外在工程上能实现的直扩系统处理增益可达到 70 dB。若系统的基带滤波器输出信噪比为 10 dB, 同这个系统的输入端的信噪比为 -60 dB, 也就是说, 信号功率可在低于干扰功率 60 dB 的恶劣环境下正常地工作。因此, 扩展频谱系统在深空超远距离的通信工程中有着显著的地位。

对于不同的扩展频谱系统, 扩频处理增益的具体表示方式又有所不同, 为了便于比较, 表 1-1 列出常用扩展频谱系统的处理增益计算方式。

表 1-1 常用扩展频谱系统的处理增益计算

扩频方式	G_p 的近似计算式	参数说明
直接序列扩频(DS)	$G_p = B / \Delta F = B / R_i$	B 为扩频带宽, ΔF 是基带信号带宽
跳频扩频(FH)	$G_p = N$	N 表示跳频频率点数
跳时扩频(TH)	$1/\tau$	τ 表示占空比
线性调频(Chirp)	$G_p = T \cdot \Delta F = T / T_c$	T 为直扩序列周期, T_c 为跳扩码元宽度
(直接序列扩频/跳频)/dB	$G_p = G_{p(\text{DS})} + G_{p(\text{FH})}$	
(直接序列扩频/跳时)/dB	$G_p = G_{p(\text{DS})} + G_{p(\text{TH})}$	
(跳频/跳时)/dB	$G_p = G_{p(\text{FH})} + G_{p(\text{TH})}$	

2. 干扰容限

所谓干扰容限, 指在保证系统正常工作的条件(系统输出信噪比一定)下, 接收机能够承受的干扰信号比有用信号高出的分贝(dB)数, 用 M_i 表示, 其数学式为

$$M_i = G_p - \left[L_s + \left(\frac{S}{N} \right)_{\text{out}} \right] \text{dB} \quad (1-11)$$

式(1-11)中, M_i 表示抗干扰容限; G_p 为系统的扩频处理增益; $(S/N)_{\text{out}}$ 为信息数据被正

确解调而要求的最小输出信噪比; L_s 表示接收系统工作的内部损耗。

干扰容限反映了扩展频谱系统接收机能在多大干扰环境下正常工作的能力和可能抵抗极限干扰的强度,只有当干扰机的干扰功率超过干扰容限后,才能对扩频系统形成干扰。因此,干扰容限往往比扩频处理增益更能确切地反映系统的抗干扰能力。

例 1-4 一个扩频系统的处理增益为 35 dB。要求系统在误码率小于 10^{-5} 时,信息数据解调的最小的输出信噪比 $(S/N)_{out} < 10$ dB,系统内部损耗 $L_s = 3$ dB,则系统的干扰容限 $M_i = 35 - (3 + 10) = 22$ dB。

这说明,该系统能在干扰输入功率电平比扩频信号功率电平高 22 dB 的范围内正常工作,也就是该系统能够在接收端输入信噪比大于或等于 -22 dB 的环境下正常工作。

3. 干扰门限

在实际工程应用中,扩展频谱系统接收机的相关解扩器和解调器常达不到理想的线性要求,系统的非线性特性和伪随机码跟踪误差都会导致信噪比损失,且在输入信噪比很低(即 $S \ll N$) 时存在门限效应,因此在扩频接收机中实际上允许的输入干扰与信号功率比值比干扰容限还要低。门限效应对确定系统在噪声干扰条件下的工作情况具有重要的意义,通常将系统输出信噪比比大输入信噪比下的输出信噪比下降 1 dB 时的 $(S/N)_m$ 定义为“门限信噪比”,而系统实际允许输入的输入干扰电平称为“干扰门限”。设系统输入干扰功率为 J ,用 J/S 代换式(1-11)中的干扰容限 M_i ,并整理得

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out} = G_p - [L_s + \left(\frac{J}{S}\right)_{in}] \text{ dB} \quad (1-12)$$

在扩频接收机设计中,在干扰门限范围内成立的工作系统,还应使干扰门限满足如下电平关系:

$$\left[G_p - L_s - \left(\frac{J}{S}\right)_{in \text{ 设计值}}\right] - \left[\left(\frac{S}{N}\right)_{out \text{ 输出值}}\right] = 1 \text{ dB} \quad (1-13)$$

实际系统都存在干扰门限,通过精心设计可把门限点搬移至系统正常工作区域外。国内外厂商已研制出各种低门限效应的鉴频器/鉴相器可供选作相关解调器中的乘法器。

1.4 扩展频谱通信系统模型

扩展频谱通信系统的基本组成框图如图 1-2 所示,发送端输入的信息先经信息调制后形成数字信号,然后由扩频码发生器产生的扩频码序列去调制数字信号以展宽信号的频谱。展宽频谱以后,信号被调制到射频并从天线发射出去。在接收端,接收机收到叠加干扰的宽射频信号,变频至中频,然后与本地产生的与发端完全同步的扩频码序列进行解

扩。最后,经信息解调,恢复成原始信息输出。因此,一般的扩展频谱通信系统都要进行三次调制和三次解调。第一次调制为信息调制,第二次调制为扩频调制,第三次调制为射频调制,以及相应的信息解调、扩频解调和射频解调。与一般通信系统相比,扩展频谱通信系统多了扩频调制和扩频解调部分。按照扩展频谱方式的不同,现有的扩频通信系统分为直接序列(DS)扩频、跳频(FH)扩频、跳时(TH)扩频和线性调频(Chirp)几种,以上几种方式组合可以得到多种混合扩频系统。

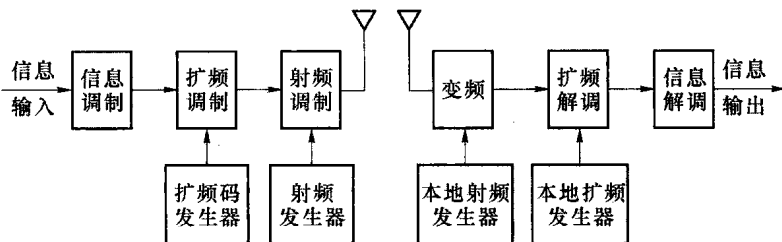


图 1-2 扩展频谱通信系统模型

在图 1-2 中,发送端对输入信息首先在某个载波频率 f_0 上进行信息调制,模拟信息一般采用频带调制(FM)方式;对于数字信息,有二相通断键控(OOK: On-off Keying)、二相或四相的相移键控(PSK: Phase Shift Keying)和频移键控(FSK: Frequency Shift Keying)3种数字载波调制方式,其中 PSK 调制的性能最好,现代的直接序列扩频调制系统中载波调制一般选用 BPSK(相干二相相移键控)或 DPSK(相干四相相移键控)方式。

以 DS 系统为例,设输入信息 $a(t)$ 速率为 R_i ,经过信息调制后,输出的信号 $b(t)$ 是带宽为 $2R_i$ 的窄带已调信号,信息调制器载波频率为 f_i ,射频调制器载波频率为 f_c 。在伪随机码发生器作用下,产生用一个码速率为 R_c 的伪随机码序列对窄带信号扩频调制,输出带宽为 $2R_c$ 的扩频信号,其频带被大大地展宽,信号的能量几乎均匀地分散在带宽的频带内,从而大大地降低了传输信号的频谱密度。接收机接收混有干扰的扩频信号后,经过前置放大和频率变换,送入扩频解调器,在同步电路控制作用下,有用的扩频信号重新集中起来成为窄带信号 $b(t)$,而干扰信号在解扩时受到相移键控器的扩频,其频率反而被展宽变成宽带信号,干扰信号谱密度大大降低。然后,信号通过带宽与原始已调信号带宽相同的窄带滤波器后,经过信息解调器滤掉有用信号的带外干扰,从而降低干扰信号的强度,改善了信噪比,还原出原始信号。上述过程的频谱变换关系如图 1-3 所示。