

普通高等教育规划教材



# 扩频通信原理

曾一凡 李晖 编

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育规划教材

# 扩频通信原理

曾一凡 李 晖 编

机械工业出版社

本书是一本专门论述扩频通信原理的著作，书中介绍了扩展频谱通信的基本原理、扩频通信系统的性能分析、各种扩频通信系统的基本构成及相关技术。全书共分为七章，内容包括：扩频通信的一般概念，扩频通信的性能分析，扩频通信系统，扩频通信用锁相环和频率合成器，扩频序列，扩频通信的解调、同步及跟踪，扩频通信的应用等内容。

本书可作为通信、电子、计算机等专业的高年级本科生和研究生的教学参考书，也可供从事通信、电子、定位、导航、雷达、电子对抗及天线电技术及其他相近专业的研究人员和工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

扩频通信原理/曾一凡, 李晖编. —北京: 机械工业出版社, 2005.8

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-17301-5

I. 扩... II. ①曾...②李... III. 扩频通信 - 高等学校 - 教材  
IV. TN914.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 099441 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王小东 责任编辑: 王小东、苏颖杰

版式设计: 张世琴 责任校对: 李秋荣

封面设计: 陈沛 责任印制: 杨曦

北京机工印刷厂印刷

2005 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> · 11.75 印张 · 287 千字

定价: 18.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

扩展频谱通信是建立在 Claude E. Shannon 的信息论基础之上的一种新型的通信体制。由于扩频通信体制具有抗干扰能力强、截获率低、码分多址、信号隐蔽、测距和易于组网等一系列优点，自从问世之后便引起了世界各国的极大关注，并率先应用在军事通信中。随着近年来大规模、超大规模集成电路和微处理器技术的广泛应用，以及一些新型器件的应用，扩频技术的应用形成了新的高潮。事实上，扩频通信已成为电子对抗环境下提高通信设备抗干扰能力的最有效的手段，并在近十几年来爆发的几场现代化战争中发挥了巨大的威力。随着 CDMA 扩频通信技术在民用通信中的深入应用和不断渗透，以及在卫星通信、深空通信、武器制导、GPS 全球定位系统和跳频通信等民用和国防军事通信的强烈需求下，扩频通信技术的地位越来越重要了。

面对通信技术的飞速发展，我们必加快人才培养的步伐，造就一支能够适应现代通信科技发展、掌握扩频通信理论和技术的人才队伍。在高等院校通信工程专业本科和相近专业及研究生教学活动中，开设扩频通信原理课程，正是体现了这种培养人才、跟踪通信科技发展的需求。

本书以扩频通信的基本原理为基础，介绍了扩频通信的基本模型；对于扩频通信系统的性能进行了细致的分析；针对各种不同的扩频通信体制的特点，论述了不同扩频通信体制的构成、参数、特性；并对于扩频通信涉及到的锁相环路、频率合成方法、扩频序列、捕获与同步方面的内容进行了详细的介绍；最后给出了扩频通信在军用、民用通信、测控等领域的应用实例。

本书的特点在于从扩频通信的基础理论出发，结合各种扩频通信体制进行分析，按照各种扩频体制的特点来介绍锁相与频率合成器、扩频序列、捕获与同步等内容，最后给出应用实例。

本书主要以通信和测控类、电子类在校本科生和研究生为对象，着重介绍扩频通信系统的工作原理，强调给予读者在理论体系上构建扩频通信系统的基本结构，为读者今后深入研究扩频通信及其应用打下坚实的基础。

阅读本书的读者应具备随机过程、信息论、数字通信原理、锁相技术等方面的知识基础。

本书由曾一凡主编并编写了第 1、4、6、7 章。李晖编写了第 2、3、5 章。由颖绘制了第 1、2、3、5、6 章的插图，曾辉绘制了第 4、7 章的插图。此外，沈阳工业大学信息学院通信教研室全体同仁对于本书的出版给予了大量的帮助，

对此，我们表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中难免有错误和疏漏之处，恳请读者批评指正。

**作 者**

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 扩频通信的一般概念 ..... 1

### 1.1 引言 ..... 1

### 1.2 扩频通信的基本原理 ..... 2

#### 1.2.1 理想通信系统的带宽和 $S/N$ 的关系 ..... 3

#### 1.2.2 扩频通信的原理 ..... 3

#### 1.2.3 直接序列扩频 ..... 4

#### 1.2.4 跳频系统 ..... 5

#### 1.2.5 跳时系统 ..... 6

#### 1.2.6 宽带线性调频系统 ..... 6

### 1.3 扩频通信的基本参数 ..... 7

#### 1.3.1 处理增益 (Process Gain) ..... 7

#### 1.3.2 频带效率 (Spectral Efficiency) ..... 7

#### 1.3.3 干扰容限 (Interference Margin) ..... 8

### 1.4 扩频通信的特点 ..... 8

## 第 2 章 扩频通信的性能分析 ..... 11

### 2.1 扩频通信系统模型 ..... 11

### 2.2 扩频通信的信噪比和误码率 ..... 14

### 2.3 扩频通信的抗干扰能力及抗多径干扰能力 ..... 18

#### 2.3.1 扩频通信的抗干扰能力 ..... 18

#### 2.3.2 扩频通信的抗多径干扰能力 ..... 20

### 2.4 扩频通信的多址能力及数据传输能力 ..... 22

#### 2.4.1 扩频通信的多址能力 ..... 22

#### 2.4.2 扩频通信的数据传输能力 ..... 26

### 2.5 扩频通信的测距能力 ..... 26

## 第 3 章 扩展频谱系统 ..... 30

### 3.1 直接序列 (DS) 扩频系统 ..... 30

#### 3.1.1 BPSK 直接序列扩展频谱系统 ..... 33

#### 3.1.2 QPSK-DS 系统 ..... 36

#### 3.1.3 MSK-DS 系统 ..... 39

### 3.2 跳频 (FH) 扩频系统 ..... 41

#### 3.2.1 跳频系统的原理 ..... 41

#### 3.2.2 跳频系统的重要参数 ..... 43

#### 3.2.3 跳频系统的抗干扰性 ..... 43

#### 3.2.4 跳频速率和跳频数的选择 ..... 45

#### 3.2.5 跳频器 ..... 47

### 3.3 跳时 (TH) 系统 ..... 48

### 3.4 线性调频 (CHIRP) 系统 ..... 49

### 3.5 混合扩频系统 ..... 51

### 3.6 典型扩频系统的比较 ..... 54

## 第 4 章 扩频通信用锁相环和频率合成器 ..... 55

### 4.1 引言 ..... 55

### 4.2 锁相环的工作原理 ..... 55

#### 4.2.1 鉴相器 ..... 55

#### 4.2.2 环路滤波器 ..... 58

#### 4.2.3 压控振荡器 (VCO) ..... 59

### 4.3 环路的传输函数 ..... 60

#### 4.3.1 环路的动态方程 ..... 60

#### 4.3.2 环路的线性相位模型与传递函数 ..... 60

#### 4.3.3 环路等效噪声带宽 ..... 61

#### 4.3.4 锁相环路的主要性能 ..... 62

### 4.4 频率合成器的基本概念与要求 ..... 64

### 4.5 锁相式间接频率合成器 ..... 65

#### 4.5.1 变模分频合成器 ..... 65

#### 4.5.2 小数分频频率合成器 ..... 66

### 4.6 直接数字频率合成器 (DDS) ..... 68

#### 4.6.1 概述 ..... 68

#### 4.6.2 直接数字频率合成器的工作原理 ..... 68

4.6.3	DDS的杂散以及来源	69	6.3.1	扩频序列同步跟踪环	134
4.7	集成锁相频率合成器	72	6.3.2	基带相关同步跟踪环	136
4.7.1	中大规模锁相式集成频率合成器	72	6.3.3	包络相关同步跟踪环	140
4.7.2	直接数字频率合成器	74	6.3.4	单相关器的同步跟踪环	144
6.3.5	简易捕捉同步方法	147	6.4	跳频序列的同步	151
<b>第5章</b>	<b>扩频序列</b>	<b>77</b>	<b>第7章</b>	<b>扩频通信技术的应用</b>	<b>157</b>
5.1	移位寄存器序列	78	7.1	扩频通信技术在军事上的应用	157
5.2	$m$ 序列	80	7.1.1	现代战争中的跳频通信体制	157
5.2.1	$m$ 序列的产生	80	7.1.2	联合作战信息分配系统和定位报告系统	158
5.2.2	$m$ 序列的性质	87	7.1.3	扩频雷达	163
5.2.3	$m$ 序列的相关函数	90	7.2	扩频通信技术在民用通信中的应用	166
5.2.4	功率谱密度	93	7.2.1	CDMA的特点	166
5.3	$M$ 序列	94	7.2.2	DS-CDMA的基本单元	167
5.4	组合码	97	7.2.3	CDMA个人通信系统关键技术	168
5.4.1	组合码的构造方法	97	7.3	全球定位系统	170
5.4.2	Gold码	99	7.4	电力线载波通信	173
5.5	跳频图案设计与码序列	102	7.4.1	电力线载波通信概述	173
5.5.1	跳频序列的设计要求及参数	103	7.4.2	电力线载波通信的特点	174
5.5.2	$m$ 序列生成的跳频序列	104	7.4.3	电力线载波通信芯片简介	174
5.5.3	RS码构成的跳频序列	110	7.5	蓝牙技术	175
5.5.4	非重复跳频序列族的构成	113	7.6	其他应用	176
<b>第6章</b>	<b>扩频通信的解调、捕获与同步</b>	<b>115</b>	7.6.1	在长江汽渡收费管理中的运用	176
6.1	扩频信号的解扩	115	7.6.2	在运河监控及管理上的运用	177
6.1.1	抑制载波跟踪环	116	7.6.3	在不停车电子收费系统中的运用	177
6.1.2	频率跳变信号的解调	121	7.6.4	个人通信网	177
6.2	扩频序列的捕获	126	7.6.5	室内无线扩频通信	177
6.2.1	扩频序列捕获的原理	126	7.6.6	矿井通信	178
6.2.2	扩频序列相位搜索捕获	128	<b>参考文献</b>	<b>179</b>	
6.2.3	序列相关捕获	129			
6.2.4	滑动相关捕获法	130			
6.2.5	SAW器件捕获法	131			
6.3	扩频序列的跟踪	133			

# 第 1 章 扩频通信的一般概念

## 1.1 引言

扩展频谱 (Spread Spectrum) 通信系统是将基带信号 (即信息) 的频谱扩展至很宽的频带上, 然后再进行传输的一种系统, 即将待传送的信息数据用伪随机编码 (扩频序列: Spreading Sequence) 调制, 实现频谱扩展后再传输, 接收端则采用同样的编码进行解调及相关处理, 恢复原始信息数据。这种系统占用的频率带宽比基带信号的频率带宽要宽得多。显然, 这种通信方式与一般常见的窄带通信方式相反, 是在扩展频谱后进行宽带通信, 再作相关处理恢复成窄带后解调数据。因此, 具有伪随机编码调制和信号相关处理两大特点。正是这两大特点, 使扩展频谱通信方式有许多优点, 如抗干扰、抗噪声、抗多径衰落、低功率谱密度下工作、保密性强、可多址复用和任意选址、高精度测量等。扩展频谱通信作为一种新型通信方式, 特别引人注目, 因而得到了迅速发展和广泛应用。

20 世纪 50 年代, 伍德华特 (P.M. Woodward) 发现在雷达测距和测速中, 采用白噪声信号, 其测量误差最小, 这为扩频技术的应用开辟了道路。20 世纪 50 年代美国麻省理工学院研究成功 NO MAC 系统 (Noise Modulation and Correlation System), 就成为扩频通信研究发展的开端, 从此, 军事通信部门对军事通信、空间探测、卫星侦查、导弹制导等方面广泛应用扩频通信方式的研究就十分活跃了。20 世纪 60 年代初, 美国开始将扩频通信应用于军事卫星, 大约在 20 世纪 60 年代中期, Magnavox 公司研制成功频谱展宽话音调制解调器 MX-170C, 用于 VRC-12 型超短波电台, 其频率为 30 ~ 76MHz。该电台装置了这个扩频终端后, 大大提高了抗干扰能力, 这个电台可以在敌方干扰信号比所传输的伪噪声调制信号高 10 倍的情况下, 在 2s 内就能捕获到有用信号, 一旦捕获到信号后, 系统可以在干扰信号比传输信号高 20 倍的情况下进行通信。我们还不能忘记在 20 世纪 40 年代初, 世界上第一个发明跳频扩频技术来明确地构想抗干扰通信系统的好莱坞 (Hollywood) 女演员赫蒂 (Hedy K. Markey)。

从扩频通信的历史发展看, 这种通信方式虽然早在 20 世纪 40 年代就提出来了, 但没有得到应有的重视和发展, 主要原因是由于这种通信方式与常规的使用带宽尽量窄的通信方式相比较, 需要使用一特殊编码调制, 把信息数据展宽成宽带信号传输, 接收端还要相关解调, 是一种全新观念的、不同原理的通信方式。初期学者们进行了大量的实验研究, 给人一种在实验结果基础上导致理论发展的感觉。

随着民用、军用通信事业的发展, 频带拥挤的矛盾日益突出。而信号处理技术、大规模集成电路和计算机技术的发展, 推动了扩频通信理论、方法、技术等各方面的研究发展和应用普及。基带的编码和相关信号处理都变得愈来愈容易实现和完善了, 使得扩频通信从军用不断地向民用方面普及。目前的第三代移动通信, 其核心技术就是扩频通信。

在实际应用中, 扩频通信的基本工作方式有四种:

1. 直接序列扩频 (Direct Sequence Spreads Spectrum) 工作方式 (简称直扩 (DS) 方式)



这种工作方式是直接用伪噪声序列对载波进行调制，要传送的数据信息需要经过信道编码后，与伪噪声序列进行模 2 和生成复合码去调制载波。接收机在收到发射信号后，首先通过伪码同步捕获电路来捕获发送来的伪码的精确相位，并由此产生跟发送端的伪码相位完全一致的伪码序列，作为本地解扩信号，以便能够及时恢复出数据信息，完成整个直扩通信系统的信号接收。

### 2. 跳变频率 (Frequency Hopping) 工作方式 (简称跳频 (FH) 方式)

这种工作方式是经过数据信息调制后的基带信号，作发射载波调制后发射，但发射载波频率受伪噪声序列发生器控制，并在一定频带内，随机地跳变。这种工作方式需要有个关键部件就是快速响应的频率合成器。因此，载波调制大多数采用跟相位无关的调频方式，其跳频工作称为非相干 FH 方式。扩展频带由整个频率合成器生成的最小频率间隔和频率间隔数目来共同决定。

### 3. 跳变时间 (Time Hopping) 工作方式 (简称跳时 (TH) 工作方式)

信息数据送入受伪噪声序列控制的脉冲调制发射机，发射出携带信息数据的伪噪声间隔射频信号。这种工作方式允许在随机时分多址通信应用中，发射机和接收机使用同一天线。在实际应用中，很少采用这种工作方式，一般需要与其他工作方式混合使用才能构成一个实际工程系统。

### 4. 宽带线性调频 (Chirp Modulation) 工作方式 (简称 Chirp 方式)

宽带线性调频方式过去是作为雷达测距的一种工作方式使用的，基本原理为发射波是一个频偏为  $f$  的宽带调频波 (通常是线性调频)，接收机解调用具有高频率范围、延迟时间短的脉冲压缩滤波器，其输出为极窄的压缩脉冲，最近已有人使用这种工作方式作为通信系统的基本工作方式，用来克服多普勒效应 (Doppler) 对通信的影响。典型的是 WCCS (Wide Band Command and Control System) 系统以及某些电力线载波通信系统。

上述四种工作方式是基本的工作方式，最常用的是直扩方式和跳频方式两种。但在实际系统中，仅仅采用单一工作方式不能达到所希望的性能时，往往采用两种或两种以上的工作方式的混合形式。

## 1.2 扩频通信的基本原理

扩频通信的基础理论根据是信息论中的 Shannon 公式，即

$$C = B \log_2(1 + S/N) \quad (1-1)$$

式中， $C$  为系统信道容量 (bit/s)； $B$  为系统信道带宽； $N$  为噪声功率； $S$  为信号功率。

Shannon 公式表明了一个系统信道无误差地传输信息的能力与存在于信道中的信噪比 ( $S/N$ ) 以及用于传输信息的系统信道带宽 ( $B$ ) 之间的关系。该公式说明了两个最重要的概念：一个是在一定的信道容量条件下，可以用减少发送信号功率、增加信道带宽的办法达到信道容量的要求；一个是可以采用减少带宽而增加信号功率的办法来达到。这就说明了信道容量可以通过带宽与信噪比的互换而保持不变。实际工程中，信道的噪声功率谱密度是不能随意选定的，所以，在功率谱密度一定、系统信道容量为  $C$  的条件下，只能是系统信道带宽 ( $B$ ) 与信号功率 ( $S$ ) 的互换。也就是说，为了保证一定的  $C$  值，可用改变  $B$  值或提高  $S$  值的办法来实现。但是，如果传输信号的带宽变窄，将导致信号功率大幅度地提高，这就是说要消耗很大的功率能源；而如果采用增加信号带宽去换取信号的功率减小的办法，

就能节省很多的信号功率能源。所以,要提高信道容量,采用增加信号带宽比提高信号功率的方法要有效得多。

由于噪声功率  $N$  与信道带宽  $B$  有关,若噪声功率谱密度幅值为  $n_0$  时,则噪声功率为

$$N = n_0 B$$

式(1-1)可以用另一种方式来表示

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \quad (1-2)$$

式(1-2)清晰的表明了一个实际信道的容量是受三个要素所限制,即系统频带宽度  $B$ 、噪声功率谱密度的幅值  $n_0$  以及信号功率  $S$ 。只要这三个要素确定了,系统的信道容量也就确定了。

### 1.2.1 理想通信系统的带宽和 $S/N$ 的关系

带宽和信号功率的互换过程并不是自动进行的,而是必须要通过信号编码,使之具有所要求的带宽。实际上,对信息进行编码的系统比没有进行编码的系统要优越得多,这是由于通过编码的系统会具有更宽的信号带宽。我们把能够实现极限信息速率传送,而且又能达到任意小的差错概率 ( $P_e$ ) 的通信系统,称为理想通信系统。

假如  $C$  是希望具有的信道容量,我们把式(1-2)变换成由  $C$  来求带宽  $B$ ,也就是把式(1-2)换成以  $e$  为底的对数

$$C/B = 1.44 \ln(1 + S/N) \quad (1-3)$$

对于干扰环境中的典型情况,  $S/N \ll 1$ , 对上式用幂级数展开,略去高次项,得

$$C/B = 1.44 S/N \quad (1-4)$$

将式(1-4)改写成

$$C/B = 1.44 S/N \approx S/N \quad (1-5a)$$

故

$$B = CN/S \quad (1-5b)$$

我们从式(1-5a)可以看出,对于任意给定的噪声信号比,只要增加用于传输信息的带宽,理论上来说,就可以增加在信道中无误差地传输的信息。例如,我们希望一个系统工作于干扰比信号大 100 倍的环境中,要求的传输信息速率为 4kbit/s,由式(1-5)可知,系统应有的带宽为

$$B = 1 \times 4 \times 10^3 / 1.44 \text{ Hz} = 2.77 \times 10^5 \text{ Hz}$$

由此可见,只要将欲传输的信息先用某种方式扩展其频谱,再把接收的扩展频谱信号的频谱变换到原始的信息带宽,信噪比就可以大大提高。Shannon 公式论述了采用信号频谱扩展,可以提高通信系统的抗干扰性的原理,也就是指明了用扩频方法可以取得很高的  $S/N$  比的好处。公式虽然从理论上证明了“理想信道的存在”,指出了只要通过一定的调制或随机编码,增加带宽就可以提高  $S/N$  比,但是并没有指出这种编码信道的调制方法。

### 1.2.2 扩频通信的原理

扩频通信,从电磁波利用来看,与一般现有的常规通信方式完全不同。扩频通信用伪随机编码把基带信号(信息数据窄带信号)的频谱进行扩展,形成相当宽带的低功率谱密度信号发射。使用不同的伪随机编码,不同通信用户可在同一频段、同一时间工作,互不影响或

影响极小地进行通信。常规通信是在频段上细分（频分）或时间上细分（时分）给通信用户，彼此互不干扰地分别使用。因此，扩频通信在调制、解调上是与众不同的。

扩频通信的基本原理如图 1-1 所示。信息数据  $D$  经通常的数据调制后变成带宽为  $B_1$  的信号（ $B_1$  为基带信号带宽），用扩频编码发生器产生的伪随机编码（PN 编码：Pseudo Noise Code）去对基带信号作扩频调制，形成带宽为  $B_2$ （ $B_2 \gg B_1$ ）、功率谱密度极低的扩频信号后再发射。众多的通信用户，使用各自不同的伪随机编码，可以同时使用带宽为  $B_2$  的同一频带。在接收端，首先使用与扩频信号发送者相同的伪随机编码作扩频解调处理，把宽带信号恢复成通常的基带信号，再使用通常的通信处理手段解调出发送来的信息数据  $D$ 。显然，当接收端不知道发送的扩频信号所使用的伪随机编码时，要进行扩频解调是非常困难、甚至是不可能的。这就实现了信息数据的保密通信。如果接收端用某一伪随机编码在接收某一发送端发送来的信号时，通信信道中的另一些伪随机编码调制的扩频信号不能在该接收端的扩频解调处理器中形成明显的信号输出，即不会对接收端的扩频解调处理形成干扰。这样，接收端使用不同扩频信号发送者所用的不同伪随机编码作扩频解调，就可得到不同发送者发送来的信息数据，实现多用户（或多址）通信。

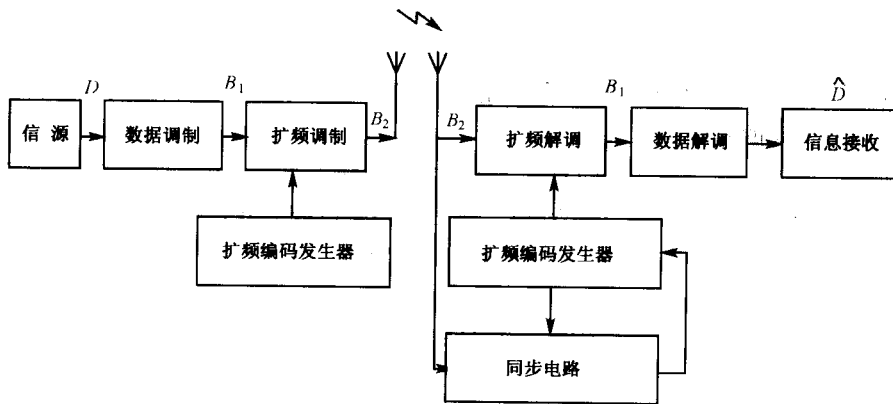


图 1-1 扩频通信基本原理图

扩频通信的主要特征是使用速率远远高于基带信息数据速率的伪随机码，对于基带信息数据进行调制，使之成为极低功率谱密度的宽带信号。接收端使用相关处理方法，把要接收的宽带扩频信号，恢复成基带信号。这些特征使扩频通信信号不易受干扰，也不容易干扰他人，信号隐蔽，有保密性；多重扩频信号可共用同一频带，可采用随机多址通信方式，通信寻址简单方便，有较好的过负荷能力，能和其他的通信方式混合使用；有高精度的测距、定位能力。因此，扩频通信技术主要应用于通信、测距及与此相关的领域。

### 1.2.3 直接序列扩频

直接序列扩频（Direct Sequence Spread Spectrum）工作方式，简称直扩方式（DS 方式）系统基本结构如图 1-2 所示。输入的数据信息  $D$ ，经过信息调制后变成了带宽为  $B_1$  的调频（FM）或调相（PM）的信号，再由伪随机编码（PN 码）调制成带宽为  $B_2$  的宽带信号发射。接收机接收到发射信号后，首先通过同步电路捕捉发送来的 PN 码的准确相位，由此产生与

发送来的伪随机编码相位完全一致的接收用 PN 码，作为扩频解调用的本地信号，以便准确恢复成窄带信号，从而获得对发送来的信息数据  $D$  的估值  $\hat{D}$  完成接收。

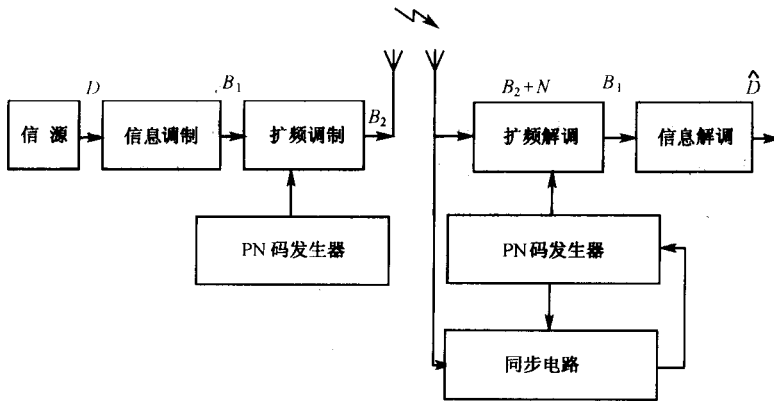


图 1-2 直扩系统基本结构

这种方式同其他扩频工作方式比较，实现频谱扩展方便，无论对通信、测距或是对其他应用都很适合，是目前应用得最多、也是最典型的一种。

### 1.2.4 跳频系统

跳变频率 (Frequency Hopping) 工作方式，简称跳频方式 (FH 方式)。

这种方式的基本结构如图 1-3 所示。信息数据  $D$  经信息调制成带宽为  $B_1$  的基带信号后，作发射载波调制后发射，发射信号的带宽仍为  $B_1$ ，但发射载波频率受伪随机编码发生器控制，在带宽为  $B_2$  ( $B_2 \gg B_1$ ) 的频带内，随机跳变，实现基带信号带宽  $B_1$  到发射信号使用的带宽  $B_2$  的频谱扩展。受伪随机编码发生器控制的发射载波频率生成器，实际是高速数字控制频率跳变的频率合成器，因此，载波调制多半使用与相位无关的调频方式，其跳频工作被称为非相干 FH 方式。扩展频带由整个频率合成器生成的最小频率间隔和频率间隔数目决

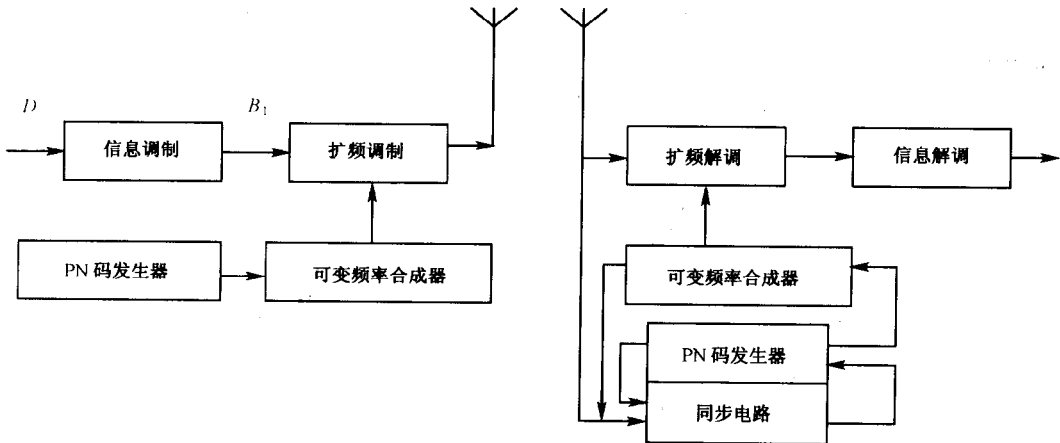


图 1-3 跳频系统基本结构

定。跳频速度由信号种类、信息数据速率、纠错方法等决定，有高速、中速、低速跳频之分。

### 1.2.5 跳时系统

跳变时间 (Time Hopping) 工作方式，简称跳时方式 (TH 方式)。

跳时系统基本结构如图 1-4 所示。信息数据送入受伪随机编码控制的脉冲调制发射机，发射出携带信息数据的伪随机间隔射频信号。这种工作方式，允许在随机时分多址通信中，发射机和接收机使用同一天线。在实际应用系统中，很少单一使用这种方式，多半与其他工作方式混合使用，构成需要的实际系统。

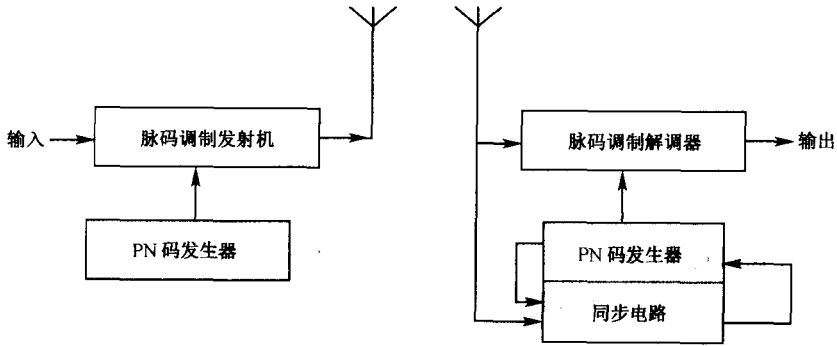


图 1-4 跳时系统基本结构

### 1.2.6 宽带线性调频系统

宽带线性调频 (Chirp Modulation) 工作方式，简称 Chirp 方式。

宽带线性调频，过去是作为雷达测距的一种工作方式使用的，其基本原理如图 1-5 所示。发射波是一个宽脉冲，被变换成频偏为  $f$  的宽带调频波（通常是线性调频）发射（如图 1-5b、c 所示），接收机解调用具有高频率范围、延迟时间短的脉冲压缩滤波器（特性如图 1-5d 所示），其输出为极窄的压缩脉冲（如图 1-5e 所示），最近已有人使用这种工作方式作为通信系统的基本工作方式，用来克服多普勒效应 (Doppler) 对通信的影响。典型的是 WCCM (Wide Band Command and Control System) 系统。

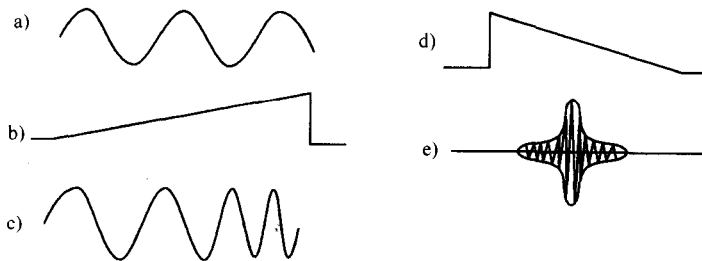


图 1-5 宽带线性调频方式基本原理

### 1.3 扩频通信的基本参数

反映扩频通信特征的重要参数有处理增益、频带效率、干扰容限等。

#### 1.3.1 处理增益 (Process Gain)

处理增益  $G_p$  定义为频谱扩展后的信号带宽  $B_2$  与频谱扩展前的信号带宽  $B_1$  之比。

$$G_p = B_2/B_1 = R_2/R_1 = T_1/T_2 \quad (1-6)$$

式中,  $T_1$  为信息数据脉宽;  $T_2$  为 PN 码的码元宽度;  $R_1$  为信息速率,  $R_1 = 1/T_1$ ;  $R_2$  为 PN 码的时钟速率,  $R_2 = 1/T_2$ 。

处理增益也可表示为

$$G_p = \frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} \quad (1-7)$$

式中,  $(S/N)_{out}$  为扩频解扩后的信噪比;  $(S/N)_{in}$  为扩频解扩前的信噪比。

用对数来表示  $G_p$  可以写成

$$G_p(\text{dB}) = 10\lg \frac{B_2}{B_1} = 10\lg \frac{R_2}{R_1} = 10\lg \frac{T_1}{T_2} \quad (1-8)$$

如果设扩频码 (或 PN 码序列) 的级数为  $N$ , 则上式可表示为

$$G_p(\text{dB}) = 10\lg(2^N - 1) \quad (1-9)$$

分析式(1-9)我们知道, 如果想要满足一定处理增益, 则可按下式求出 PN 码序列的级数  $N$

$$N = [\log_2(10^{\frac{G}{10}} + 1)] \quad (1-10)$$

式(1-7)、式(1-8)、式(1-10)是设计扩频通信系统的指标时非常重要的设计公式。例如,  $B_2 = 20\text{MHz}$ ,  $B_1 = 10\text{kHz}$ , 则  $G_p = 33\text{dB}$ , 这说明该接收机的射频输入端和基带滤波器的输出端之间有 33dB 信噪比的增益改善。

需要说明的是, 如果采用 BPSK 调制数据信息, 其传输的射频带宽为  $B_2 = 2R_2$ , 即为 2 倍 PN 码 (或伪码) 时钟时, 它正好是  $\left(\frac{\sin X}{X}\right)$  的主瓣宽度, 这时, 系统增益可用下式计算

$$G_p = \frac{2R_2}{R_1} \quad (1-11)$$

接收机相关处理后的信号带宽是由基带调制信号载波产生的双边带信息带宽, 从式(1-9)、式(1-10)还可以得出结论: 若已知信息速率为  $R_1$  和 PN 码周期为  $(2^N - 1)$ , 则  $R_2 = (2^N - 1) R_1$ 。

#### 1.3.2 频带效率 (Spectral Efficiency)

传输的码率 (单位: bit/s) 与数字信号所占的频带 (单位: Hz) 之比, 称为频带效率, 其单位为 bit/Hz。例如 GSM 标准规定, 200kHz 信道传输 270Kbit/s (279kbit/s), 其频带效率是 1.4bit/Hz。频带效率与信源编码无关, 只决定于信息调制的形式, 它表明信息调制的密度, 也称调制信息密度。

### 1.3.3 干扰容限 (Interference Margin)

干扰容限的定义为

$$M_j = G_p - \left[ L_{\text{sys}} + \left( \frac{S}{N} \right)_{\text{out}} \right] \quad (1-12)$$

式中,  $M_j$  为干扰容限;  $G_p$  为系统的处理增益;  $L_{\text{sys}}$  为系统的损耗;  $\left( \frac{S}{N} \right)_{\text{out}}$  为相关解扩后输出端要求的信噪比。

干扰容限是考虑一个可实现系统的输出信噪比的要求而定义的, 它也考虑到了系统的内部的信噪比的损耗 (即: 射频滤波器的损耗, 放大器的信噪比损耗, 下变频器中的混频器的变频损耗等)。比如, 当一个扩频系统的处理增益为 30dB 时, 我们要求基带解调的最小输出信噪比为 10dB。假如系统的损耗为 4dB, 则它的干扰容限为  $M_j = 30\text{dB} - (10 + 4)\text{dB} = 16\text{dB}$ 。这表明了, 一个具有处理增益为 30dB 的扩频系统, 在保证基带数字解调器要求有 10dB 信噪比和系统损耗为 4dB 的条件下, 系统要求正常工作的输入信噪比应为 16dB。

由于在实际工程应用中, 扩频接收机达不到理想的线性要求, 其非线性和码元跟踪误差导致了信噪比的损失, 并且在输入信噪比很低时还存在实际的门限效应。实际的扩频接收机容许输入的干扰与信号功率比, 较干扰容限还要低些。实际允许的输入干扰电平称为“干扰门限”。假设输入干扰功率为  $J$ , 我们用  $J/S$  来代换式(1-12)中的  $M_j$ , 则有

$$\left( \frac{J}{S} \right)_{\text{in}} = G_p - \left[ L_{\text{sys}} + \left( \frac{S}{N} \right)_{\text{out}} \right] \quad (1-13)$$

重新改写式(1-13)得

$$\left( \frac{J}{S} \right)_{\text{in}} = (G_p - L_{\text{sys}}) - \left( \frac{S}{N} \right)_{\text{out}} \quad (1-14)$$

式(1-14)即为已知系统处理增益和输入信噪比条件下, 求干扰门限的公式。

## 1.4 扩频通信的特点

扩频通信之所以得到广泛应用和发展, 成为现代通信发展的一个重要方向, 就是因为它具有独特的性能, 其主要特性如下;

### 1. 抗干扰能力强

由于扩频系统利用了扩展频谱技术, 在接收端对干扰频谱能量加以扩散, 对信号频谱能量压缩集中, 因此, 在输出端就得到了信噪比的增益, 这样的扩频通信机可以在很小的信噪比情况下进行通信, 甚至可在信号比干扰信号 (噪声、人为干扰、它台干扰) 低得多的条件下实现可靠地通信。这种“去除干扰”的性能, 是扩频通信的主要优点之一, 现分析如下:

1) 当接收机本地解扩码与收到的信号码完全一致时, 所需要的信号恢复到未扩频前的原始带宽, 而其他任何不匹配的干扰信号被接收机扩散到更宽的频带, 从而使落入到信息带宽范围的干扰强度被大大降低了, 当通过窄带滤波器 (带宽为信息带宽) 时, 就全部抑制了滤波器的带外干扰信号。

2) 扩频系统的抗干扰性能, 取决于系统对信号与噪声功率的压缩和扩展处理的比值, 该处理增益越大, 则系统抗干扰能力就越强。例如, 处理增益为 30dB, 则接收机可在 15 ~

20dB的信噪比下提取信号,除去内部损耗约2dB外,接收机还能在干扰信号比有用信号强18dB的条件下,仍有不小于10dB的工作信噪比,即有10dB的余量作信号解调,进行正常通信。

3) 系统对高斯白噪声干扰、正弦波干扰(瞄准式干扰)、邻码干扰以及脉冲干扰均有较强的抗干扰能力,对多径效应的影响不敏感。对瞄准式干扰有独特的抵抗效能,这对于电子对抗是很有利的。

## 2. 可随机接入、任意选址

扩频通信所以能够迅速地得到发展,其另一个主要特点就是可以进行选址通信,组网方便,适合机动灵活的战术通信。

1) 用扩展频谱技术与正交编码方法结合起来,可以构成码分多址通信。为了区别不同用户,使用不同的正交地址码,在同一载频、同一时间内,容许多部电台同时工作。或者用数码控制跳频器,随机的变换信号载频,不同的用户,可用不同的载频跳变规律(称为跳频图)相互区分,故在同一频带内,可容许很多不同地址号码的电台。各电台号码可以随机改变,还可以用微处理机软件程序进行控制,若想变更电台号码,只要给电台内微处理器送入相应的程序即可。程序也可事先录入存储介质上(磁盘、磁带等),随身携带,以便随时变更电台地址码,即变化电台的号码。所以,扩频通信是一个多地址通信系统,而且地址号码可以随机变动。

2) 具有共用信道自动选呼能力。每个用户有自己的号码,每个用户可以自由选呼其他任一用户,呼叫中自动接续,不需人工交换,如同自动电话一样,使用方便。在同一信道内,若几十对电台同时通话,可以做到互不影响。目前国际上已能达到60~70个用户同时通话。

3) 由于组成多址通信时,网内并不需要各电台严格同步,因此,网内可随机接入电台,增加用户数,随时随地可增减电台号码。整个通信系统也便于用微处理机进行信息处理与自动交换控制。

4) 如果单纯地从窄带信息被扩展为宽带信号来看,扩频通信似乎是频带利用率很低,但实际上,由于扩频码实现了码分多址,地址数可以由几百增加到几千个,虽然每个用户占用的时间是有限的,但是用户对可以同时占用同一频带,这就有效地利用了频带,大大提高了频带的利用率。

## 3. 保密通信

扩频通信是一个比较安全、可靠的通信系统,其原因如下:

(1) 信号功率密度低 扩频发送端对要传送的信息进行了频谱扩展,其频谱分量的能量被扩散,使信号功率密度降低,近似于噪声性能。这个系统可在信噪比低于 $-15 \sim -20\text{dB}$ 下进行通信,从而使信号具有低幅度、隐蔽性好的优点。

(2) 数字信息易加密 由于扩频通信可以传送数字信号,当把模拟信号变换成数字信号时,数字信号不但加密很方便,而且数字加密的密级也较高,保密性能强。

(3) 通信信息不易被窃取 扩频通信电台地址采用伪随机序列编码,可以进行数字加密,在收端如不掌握发端信号随机序列码的规律,是接收不到信号的,而收到的只是一片噪声,即便是知道了地址码,解出了加密的发射信息信号,如果不了解密钥,不采取相应的解密措施,也还是听不懂对方的讲话,解不出正确的数字、文字符号,所以扩频系统通信安全



性好。

(4) 通信不易被破坏 扩频通信体制具有很高的抗干扰能力,尤其对瞄准式干扰具有特别有效的抵制功能,在电子战对抗中有很强的抗干扰能力,要企图封锁和压制这个系统的通信是比较困难的,所以扩频通信的可靠性好。

#### 4. 信息传输可数模兼容

扩频通信系统所传输的信息,可以是模拟信号,也可以是数字信号,这就使系统应用方便,且具有多功能。

(1) 模拟信息 当所传送的信息是模拟信息时,对扩频的跳频电台,可以直接调制传输,也可以将模拟信号经 A/D 变换(一次调制)成数字信号,然后送到扩频跳频系统或码分直扩系统传送。利用这样的系统就能够完成通信、自动控制和遥测。

(2) 数字信息 扩频通信系统基本上是一个数字通信系统,电路大部分采用数字电路,可以实现集成化。集成电路体积小、功耗低、电气性能稳定可靠,用集成电路模块组成的电台,适宜于移动通信的要求。由于电台传送的是数字信号,系统的终端便于与微处理机相连接,可以直接进行人机对话,实现现代通信,因此,也就增加了电台使用的功能。

(3) 具有编码通信的特点 扩频通信采用不同的正交编码来区分收发信号,实现双工,在数字间空隙可接收信号。若在通信系统中有转接中心时,可采用收发不同频率的异频双工,一般电台要实现同频双工都是很困难的,而对异频双工组网多址通信那就更难了。

(4) 具有移动通信的特点 扩频系统不但具有数字通信的特性,而且还具有抗衰落能力。这是因为,扩频通信系统所传送的信号频谱已扩展很宽,频谱密度很小,如在传输中小部分频谱衰落,不会使信号造成严重畸变。这一点,对移动通信的短波通信是非常重要的。扩频信号的功率、谱密度远比普通信号小,这样在任一窄的频率范围内,发送的功率都很低,如果信号在传播中局部频谱损耗,也不会严重影响整个信号的传输。

以上是扩频通信的特点。但是,并不是在同一系统内必须同时利用上述的所有特点,而是可以只利用其中的某一个特点。例如,同一系统中在低功率传输时就能隐蔽信号,而在高功率传输时就能达到较高的抗干扰能力。