

相干扩展频谱系统

〔美〕 J.K. 霍姆斯 著
梁振兴 蔡开基 译

国防工业出版社

译者前言

霍姆斯 (J.K.Holmes) 是研究扩展频谱通信方法的著名学者。他曾在美国 TRW、JPL 等大公司工作过, 还曾在加利福尼亚洛杉矶大学研究生院任教。他是 IEEE Trans on Communications 杂志的评审员, 通信系统讨论会的主席。他总结自己从事教学和研究工作的经验与成果, 累计花费五年时间写成本书。可以说, 这是第一本系统地论述伪随机扩展频谱通信理论的书。书中有一些新的至今尚未报道过的结果, 书中还有许多有助于系统设计的公式及曲线。

扩展频谱通信技术有许多优点, 如抗干扰性强、防窃听、对在同一频带内工作的其它系统的干扰小, 等等。因此, 无论是军用通信系统还是民用通信系统都已广泛使用。随着集成电路、电荷耦合器件、表面声波器件的发展, 这一技术的应用范围将更为广泛。

在航天飞行测控系统和导航系统中, 伪随机码测距得到了广泛的应用, 实现了统一测控及信道的综合利用。美国新近研制的跟踪和数据中继卫星系统、全球导航定位系统都采用扩频伪随机码测距技术。

在我国, 扩展频谱通信技术也受到广泛重视, 并得到应用, 还翻译出版了一些文章, 许多学者也写过一些论文。但是, 至今还没有一本比较全面系统地介绍这一技术的参考书, 本书的出版将会部分地弥补这方面的不足, 以满足广大读者的要求。但由于这一技术新, 再加上译者水平有限, 难免有不当甚至错误之处, 恳请读者批评指正。

一九八五年四月于北京

前 言

现在国家航宇局的卫星通信系统或军用的卫星通信系统，几乎都采用一种甚至数种扩展频谱调制方法。虽然扩展频谱技术应用如此广泛，而且多次国际通信会议都安排二次以上的专门会议，讨论扩展频谱系统，但是，现在美国只有一本专门论述这一技术的教科书。基于以上原因，我累计用了五年时间，大胆地编写出此书。

本书主要集中研究采用相干载波解调的直接序列扩展频谱系统的同步问题。显然，这只是扩展频谱通信系统的一个方面，例如，跳频就是扩展频谱调制的另一种常用的方法。但书中没有讨论，而且对跳频和直接序列系统的最佳干扰方法也未论及。

书中所论述的直接序列扩展频谱系统的理论分成两部分：第一部分，主要研究直接序列的捕获、跟踪和锁定检测以及去扩频带来的损失；第二部分，主要研究伪噪声码和戈尔德码的产生及特性。

除研究扩展频谱技术外，本书还研究载波环、比特同步器、比特解调及载波调制的各种方法。

书中大约有二分之一的内容是加利福尼亚洛杉矶大学和 Northridge 加利福尼亚州立大学研究生用的通信系统教程。设想读者已掌握随机变量和随机过程的理论，并学过通信系统的初级课程，但是书中大部分章节还是相当完备，可自成系统的。

本书编写的最原始的材料和基础，是我与加利福尼亚 Redondo Beach 的 TRW 公司的 TRW 空间和防御分部及 Pasadena 通信系统分部的喷气推进实验室合作期间得到的，还有一部分是我在洛杉矶的 Axiomatix 有限公司作顾问时拟定的。

书中包括的习题难度不同，有简单的，也有复杂的，它们部

分地扩充了书中介绍的理论。读者即使不求解这些习题，但也应浏览一下。

虽然不可能一个不漏地提及每位学者，但对有贡献的应该提及的作者，本书尽可能都提到了。对于应提及而未提及的作者，在此特致以歉意。

我愿提及林赛 (W. C. Lindsey) 博士、西蒙 (M. K. Simon) 博士、吴 (K. T. Woo) 博士、休恩 (M. Huang) 先生和奥斯本 (H. Osborne) 博士，是他们鼓励我完成本书的编写工作。同时，我还要提及奥斯本 (H. Osborne) 博士，是他校阅了本书的大部分原稿。

本书原稿由简·诺思伦德 (Jan Northlund) 先生、卡罗尔·齐夫 (Carole Ziff) 先生、莱斯利·保罗 (Lesley Paul) 小姐和桑迪·帕克 (Sandy Parker) 先生等诸位打字员打印而成。

读者发现书中有错误的地方，欢迎您来函指正。我的通信地址是：1338 Comstock Ave., Los Angeles, California 90024。

J. K. 霍姆斯

Westwood (L. A.), California, 1981年9月。

目 录

第一章	同步伪随机码扩展频谱系统	1
1.1	一个典型的相干伪随机码扩展频谱系统	1
1.2	PN 码扩展频谱系统的优点	2
1.3	内容概述	3
1.4	扩展频谱系统的发展简史	6
第二章	PCM 码的格式和频谱	9
2.1	PCM 的数据格式	9
2.2	随机 PCM 序列的功率谱	13
2.3	各种数据格式的功率谱	25
2.4	PCM 相关序列的功率谱	27
2.5	载波调制信号	35
第三章	多信道相干系统的调制	38
3.1	单信道系统	38
3.2	双信道的调制	42
3.3	一般情况	53
3.4	解调系统	56
第四章	锁相环	60
4.1	锁相过程的随机微分方程	60
4.2	环路滤波器和相平面的描述	64
4.3	线性模型的结果	74
4.4	非线性模型的结果	106
4.5	有连续波干扰信号时的载波跟踪	126
附录	一阶锁相环相位误差的稳态解	129
第五章	抑制载波环的跟踪	137
5.1	平方环	138
5.2	科斯塔斯环或同相-正交环(简称为 I-Q 环)	147
5.3	积分和转移式的科斯塔斯环	160
5.4	改进的科斯塔斯环的性能	164

5.5	残留载波的科斯塔斯环	165
5.6	同相支路采用硬限幅的科斯塔斯环	172
5.7	平方环和科斯塔斯环的扫描捕获	175
5.8	科斯塔斯环和平方环的锁定检测器	177
5.9	科斯塔斯环和平方环的错锁	180
5.10	判决-直接反馈环	208
5.11	四相和多相跟踪环	214
5.12	多相环的平均跳周时间	232
附录	平方环和科斯塔斯环的自噪声的频谱	235
第六章	相干调制信号的相干检测	244
6.1	信息率或信源率	245
6.2	信号结构	246
6.3	相干接收的最佳接收机	247
6.4	以最大后验概率 $P[i y(t)]$ 为基础的接收机结构	248
6.5	组合码信号的错误概率	253
6.6	差分 MPSK 信号的相干检测性能	290
6.7	卷积码的最佳解码	294
6.8	非理想信道的的影响	313
第七章	线性伪随机序列简述	358
7.1	移位寄存器序列	359
7.2	移位寄存产生器序列的特性	363
7.3	移位寄存产生器序列的数学表征	369
7.4	生成函数和序列长度	377
7.5	简单移位寄存产生器序列的某些特性	386
7.6	伪随机序列 (PN 序列)	395
第八章	伪随机码扩展频谱系统	406
8.1	伪随机码扩展频谱系统	407
8.2	处理增益	410
8.3	射频滤波的伪随机信号的相关损失	413
8.4	伪随机参考信号应滤波	423
8.5	自动增益控制电路的影响	425
8.6	捕获用的自归一化参考电路	426

8.7	轮换的参考信道	428
8.8	相关引起的噪声扩展	431
8.9	硬限幅对四相伪随机信号频谱的影响	433
8.10	用信号合成改进信噪比	436
8.11	相关器前、后的寄生干扰	443
8.12	去扩展后的伪随机波形的频谱	447
8.13	表面声波器件	462
8.14	电荷耦合器件	465
第九章	PN 码的捕获和锁定检测性能	468
9.1	捕获问题	468
9.2	由生成函数确定的捕获时间	468
9.3	检测概率和虚警概率的近似式	499
9.4	锁定检测理论和吸收式马尔柯夫链	504
9.5	序贯检测	522
9.6	无源匹配滤波器	539
9.7	最佳捕获搜索法	543
9.8	部分相关引起的假锁	546
第十章	PN 码跟踪	550
10.1	超前-滞后码跟踪环的理论基础	551
10.2	全时间码环的跟踪性能	552
10.3	时分非相干码环的跟踪性能	574
10.4	τ -摆动码跟踪环	585
10.5	时间选通码跟踪环	589
10.6	自噪声的影响	595
10.7	单个侧音干扰对码跟踪的影响	598
10.8	多路径对码跟踪的影响	603
10.9	无噪声时码环的跟踪性能	606
10.10	无噪声码环的捕获	608
10.11	延迟锁定环的平均失锁时间	618
10.12	镜像噪声对码跟踪的影响	633
附录	延迟锁定环在 $f=0$ 处 $n_L^2(t)-n_E^2(t)$ 的谱密度	637
第十一章	戈尔德码	643

11.1	周期二进制序列的相关特性	643
11.2	部分互相关函数的均值和方差	646
11.3	最大长度码的优选对	651
11.4	戈尔德码	653
11.5	平衡戈尔德码的产生	656
11.6	最大长度码和戈尔德码的假锁	661
第十二章	PSK 的符号同步	667
12.1	最佳比特同步	668
12.2	数字式数据转换跟踪环	677
12.3	超前-滞后选通符号同步器	683
12.4	亚最佳比特同步器	690
12.5	不理想的符号时间同步对比特误差率的影响	715
12.6	比特同步锁定检波器	720
12.7	信噪比估值器	726
附录 I	稳态概率的唯一性	729
附录 II	第一次平均跳周时间的唯一性	730
附录 III	第一次平均跳周时间的解	730

第一章 同步伪随机码扩展频谱系统

如果一个通信系统需要近乎丝毫不差地复现淹没在噪声中的接收信号的频率和相位,才能正确地解调出调制在载波上的数据时,我们称此通信系统为同步通信系统。本章的目的是概述一种典型的扩展频谱的伪随机码系统,同时讨论设计这种系统时出现的一些问题。此外,还简略地叙述一下各章的主要内容,帮助读者查找他感兴趣的题目。最后,以扩展频谱通信系统的发展简史而结束。

1.1 一个典型的相干伪随机码扩展频谱系统

现在研究图 1-1, 图中示出基本的伪随机(以下简称为 PN)编码的发射机和接收机。数据源输出的数据用适当的编码方式编码,并将其调制到载波上,然后再用扩展频谱的 PN 码调制载波,这样已调信号的带宽就比数据带宽大了许多倍。已调制的信号被放大后从发射天线发送到接收天线。接收天线收到的信号用前置放大器放大,并送至 PN 码捕获电路。该电路的作用是依次试验 PN 码的每个可能的相位,直到收码与本地码同步。正常情况下,时间同步误差很小。当两码同步时,码跟踪环维持本地产生的 PN 码与接收的 PN 码同步,然后,用本地码去调制接收信号的 PN 码,从而将频谱还原成数据带宽。通常用锁定检测器指示本地码是否与接收的 PN 码同步。

去扩展的信号送到载波环,该环具有对抑制载波的信号实施捕获和跟踪的功能。还有,常用载波锁定检测器监视载波环的状态。

载波解调之后,基带信号被送至给符号解调器提供控制时钟的符号同步器。正常情况下,符号解调器的作法与匹配滤波器类似,

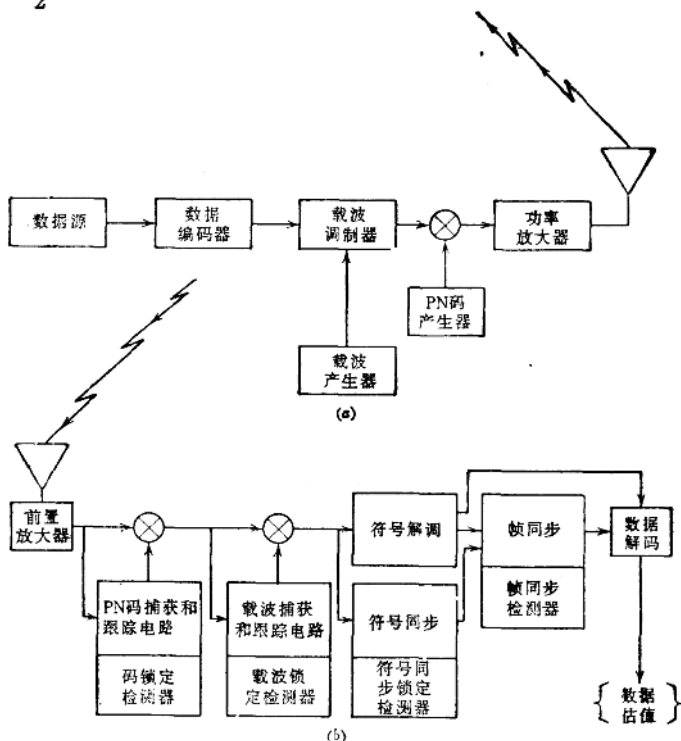


图1-1 PN码扩展频谱系统
(a) 发射机; (b) 相干接收机。

它提取符号的估值。帧同步器用这些估值实现帧同步。最后,由解码器得到数据比特。解码器把编码的符号流变换成解码的比特流。

除前置放大器和帧同步器以外,图1-1所示的每个方块在本书中都将详细地加以论述。

1.2 PN码扩展频谱系统的优点

人们自然会提出:为什么通信系统要用扩展频谱技术?答案是:原因很多。首先,采用扩展频谱系统的主要动机可能是,这种系

统能抑制人为的或无意的干扰。其次,采用扩展频谱系统的另一个重要的原因是,该系统具有较低的窃听概率(简称为LPI)。由于扩展频谱系统产生的信号的带宽非常宽,因此就很难从噪声中检测出这种信号,这样就可以达到低窃听概率。码分多路通信是这样一种通信方法:在这种通信方法中虽然一组用户工作在相同的标称中心频率上,但用低互相关的编码可以将它们彼此分开。因此,扩展频谱的码分多路传输方法提供了多址通信的信道。再者,对数据载波实施扩展频谱调制实现了信息保密,非专业收听人员不可能对数据解码。如果有一组用户,每个用户对应一个独特的编码,用这个特定的编码就可以识别出这个用户。扩展频谱编码的另一个重要用途是导航和测距。这两种系统利用扩频编码的宽带特性,可使测距误差小于一个码元的若干分之一,因此非常准确。最后,扩展频谱信号可用于抵消多路径影响。

1.3 内 容 概 述

现在简要地叙述一下各章的内容。第二章论述脉冲编码调制(以下简称为PCM)的格式,改进了计算基带数字数据信号和已调信号功率谱密度的一些有用的公式。

第三章研究多信道相干调制的几种方案。讨论的题目有:求已调信号的频谱特性以及计算数据分量和残留载波分量的功率电平;本章将比较双信道交错调制方案与一般双信道副载波调制方案。

第四章研究的题目是一阶、二阶和三阶锁相环的性能。首先考虑无噪声性能,然后再推导有噪声时的性能。稳定性、噪声带宽和对各种输入的瞬时响应也要研究。此外,还要论述跳周和捕获时间。本章改进了锁相环前面的带通限幅器、载波锁定检测器以及相位噪声对环路跟踪性能的影响的计算公式。

第五章阐述抑制载波跟踪环。研究的环路包括科斯塔斯环(Costas)、平方环(Squaring)、有无延迟的判决直接反馈环(decision directed feed back)和改进的四相科斯塔斯环

(modified four-phase costas) 的跟踪性能。但是, 只详细地论述科斯塔斯环和平方环。本章研究的专题还有最佳滤波器的带宽、锁频电平及自噪声条件下的跟踪性能。

在第五章中改进了科斯塔斯环情况下残留载波分量的影响。给出捕获扫描速率估值和相移键控 (以下简称为 PSK) 信号的锁定检测器的性能。最后, 用多相环的平均跳周时间的公式结束本章。

第六章讨论信号的相干检测, 介绍组合码信号的结构及其相关性。根据信号的相关特性计算一般组合码信号的比特错误率。本章改进了正交和双正交信号的字错误率及比特错误率的公式。在本章内专有一节介绍相干频移键控、相干相移键控和差分多相移键控。阐述了带有维特比 (viterbi) 解码的卷积码。

本章研究残留载波跟踪环和抑制载波跟踪环中不完善的相位基准对比特错误率的影响, 同时还研究非编码系统和维特比解码系统中相位基准不完善对比特错误率的影响。第六章论述的另一个题目是不完善的载波基准对未编码的非平衡四相移键控系统的影响。最后, 简要地讨论一下码位间干扰的问题。

第七章介绍线性 PN 码序列, 讨论单返回及多返回的移位寄存器。本章发展了 PN 码序列的矩阵及生成函数的特性; 用矩阵法和生成函数法来推导 PN 码序列的多种特性; 研究随机特性, 并证明最大长度编码满足随机特性。在本章末尾给出最大长度 PN 码产生器的一览表。

第八章论述 PN 码扩展频谱系统。首先讨论基本的 PN 码扩展频谱调制器和解调器; 然后用非相干侧音干扰器和处理增益来阐述双相调制和四相调制。本章研究的另一些题目如下: 由于接收的 PN 码的带通滤波器而引起的相关去扩展损耗, PN 码带通滤波器传递函数的幅度和相位失真造成的 PN 码滤波器的相位失真; 接下来研究基准码滤波及自动增益控制 (AGC) 的影响; 改善了相关噪声引起的噪声扩展; 比较了经过带通滤波器之后的四相相移键控信号和偏置的四相相移键控信号。被改善的另一个重要

题目是四相信号的检波后及检波前的信号合成问题。

第八章还考虑寄生信号对 PN 码系统的影响；给出 PN 码波形乘其移位波形的频谱密度的计算公式；最后，简要地讨论一下表面声波（SAW）器件及电荷耦合器件（CCD）。

第九章论述的主题是 PN 码的捕获和锁定检测。首先介绍信号流程图理论，然后将其用于离散的时不变的马尔柯夫过程。由所研究的系统的流程图得出其生成函数；用此发展的理论来推导一次停顿捕获系统的捕获时间，所得结果扩大用于研究多普勒影响，同时把此理论推广用于二次停顿的系统。接下来对检波后再用积分-转移滤波器和 RC 低通滤波器滤波的输出统计特性的几个近似式作一些改进。

在采用吸收的马尔柯夫链的基础上，发展 PN 码扩展频谱系统的锁定检测理论。紧接此论题之后介绍适用于 PN 码捕获的序贯检测理论；尔后讨论无源匹配滤波器，接着论述有源相关捕获的最佳搜索策略。最后，发展了 PN 码捕获电路的错锁机理。

第十章阐述 PN 码跟踪环，包括全时环、时间复用环、 τ -摆动环和基带环的理论。作为性能标准，首先分析基带环；然后分析全时码跟踪环、四相跟踪环、分时码跟踪环、 τ -摆动环；最后研究时间选通码跟踪环。要考虑的另一个令人感兴趣的题目，是码跟踪环中的自噪声。继此题目之后分析侧音干扰对码跟踪的影响。

在第十章中较详细地讨论了无噪声的性能，包括在多种条件下的相平面的捕获性能。本章要研究的另一个题目是与噪声有关的失锁的平均时间问题。最后，发展了码跟踪的镜像噪声理论，并指明了镜像噪声是怎样降低跟踪性能的。

戈尔德码是第十一章研究的主题。首先介绍戈尔德码的周期相关特性和部分时间相关特性；尔后用每个码的周期自相关特性来发展周期互相关的边界；再后研究最佳码对，从而引出戈尔德码。文中给出了戈尔德码的几种有用的结果。利用特征函数发展了戈尔德码的一些特性；然后阐述平衡戈尔德码的特性；最后，推

导出最大长度码和戈尔德码的假锁问题。

最后一章，即第十二章论述 PSK 调制的各种比特同步器。首先研究最佳同步器，然后分析接近最佳的 DTTL 同步器和超前-滞后选通同步器；接下来阐述基于谐波振荡的次最佳比特同步器，并详细分析另一种很有前途的滤波和平方可同步器。

在这一章内深入分析了另一种重要的环路，即所谓增量相位调制器 IPM 的跟踪性能和跳周的平均时间。尔后发展了 NRZ 数据及曼彻斯特数据的比特同步器的比特错误率公式。最后，分析比特同步器的锁定检测器和信噪比估值器。

由此上简要说明可以看出，本书的主要研究内容是 PN 码扩频系统的同步，而并不论及跳频调制或跳频——直接序列混合调制。另外，本书也未论述干扰跳频方案的干扰方式。可以想象，倘若研究这些问题，本书的篇幅将无法控制。

1.4 扩展频谱系统的发展简史

众所周知，兼有似噪声信号和相关检测的通信系统，最早由联邦电信实验室（国际电话电报公司的子公司）的德罗萨（deRossa）和罗戈夫（Rogoff）于 1949 年左右设想并生产出来，至少在美国是这样。该系统在新泽西至加利福尼亚的通信线上曾成功地运转，采用 10kHz 直接序列码扩频。

1950 年巴索尔（Basore）继续进行理论探讨和实验验证，他创造了一个缩写词 NOMACS。这个缩写词是 Noise Modulation And correlation detection System 几个字的缩写。

1951 年春，陆军通信协会要求麻省理工学院电子研究实验室为易受敌方干扰的远距离高频无线电传通信研制一个 NOMACS 系统。1951 年末这个任务转到了麻省理工学院的林肯实验室。第一个实验性的 NOMACS 系统是传输基准型的系统^[3,4]。1952 年生产并在现场测试了林肯 P9D 系统。实验表明，储存基准系统对干扰更不灵敏^[5]，因而放弃了传输基准系统，而采用储存基准系统。1953~1955 年生产并在现场测试了林肯 F9C 系统^[6]。尔

后, 夕尔瓦尼亚电子防御实验室为陆军通信兵生产了取名为 F9C-A 的样机。

其后不久, 海军和空军便开始研制他们自己的扩展频谱的系统。空军研制的系统取名为“幻影”(Phantom)和“匿影”(Hush-Up); 而海军研制的系统则取名为“短剑”(Blades)。

“幻影”采用跳频扩频方案。这些老式的扩频系统全都使用真空管, 它需要几间屋子才能放置这些设备。晶体管发明以前, 扩频系统的确不能实用。随着集成电路的发展, 扩频系统的包装尺寸逐步缩小, 易于控制, 同时电路设计也更加方便。

最初, 主要关心扩频系统的抗干扰性、抗窃听性和对在同一频带内工作的其它系统的低干扰性。后来, 测距成了直接序列系统的新的应用范围。现在, 测距变为一个极其重要的用途。

几个众所周知的新近研制的系统, 如全球定位系统, 都采用了直接序列扩展频谱技术。全球定位系统(简称为 GPS 或 NAVSTAR)是一个卫星导航系统。在此系统中用 24 颗卫星提供信号, 用户自己处理这些信号就能求出导航用的位置参数、准确时间和速度信息。

另一个新的扩展频谱系统是跟踪和数据中继卫星系统(简称为 TDRSS), 它是美国国家航宇局的一个计划。这个系统的基本想法是, 用一个空间中继站给许多个地球轨道的飞行器提供保障, 使它们能与美国大陆(简称为 CONUS)进行通信。扩展频谱调制实现了几个信道的码分多址(简称为 CDMA)传输。

参 考 文 献

- 1 deRosa, L. A., and Rogoff, M., "Application of Statistical Methods to Secrecy Communication Systems," Section I: Communications, Federal Telecommunication Labs., Inc., Nutley, N.J., Proposal 946, August 28, 1950.
- 2 Basore, B. L., "Noiselike Signals and Their Detection by Correlation," Sc.D. dissertation, MIT, Cambridge, Mass., May 26, 1952.
- 3 Quarterly Progress Reports, Division 3 Communications and Components, Lincoln Lab., MIT, Cambridge, Mass., DDC Docs. AD 4907, AD 12 270, AD 17 898, AD 22 246, January 15, 1953 to October 15, 1953.

- 4 Pankowski, B. J., "Multiplexing a Radio Teletype System Using a Random Carrier and Correlation Detection," Research Lab. of Electronics and Lincoln Lab., MIT, Cambridge, Mass., Tech. Report No. 5, DDC Doc. AD 168 857, May 16, 1952.
- 5 Green, P. E. Jr., "Correlation Detection Using Stored Signals," Lincoln Lab., MIT, Cambridge, Mass., Tech. Report No. 33, DDC Doc. AD 20 524, August 4, 1953.
- 6 Green, P. E. Jr. et al., "Performance of the Lincoln F9C Radioteletype System," Lincoln Lab., MIT, Lexington, Mass., Tech. Report No. 88, DDC Doc. AD 80 345, October 28, 1955.
- 7 Dixon, R. C., *Spread Spectrum Systems*, Wiley-Interscience, New York, 1976.
- 8 Alem, W. K., Huth, G. K., Holmes, J. K., and Udalov, S., "Spread Spectrum Acquisition and Tracking for Shuttle Communication Links," *IEEE Communications*, Part 1, November 1978.
- 9 Cahn, C. R., "Spread Spectrum Applications and State-of-the-Art Equipments," Paper No. 5, AGARD-NATO Lecture Series No. 58, May 28 to June 6, 1973.
- 10 Smith, M., private communication on the history of spread spectrum systems.
- 11 Dixon, R. C., "Spread Spectrum Techniques," *IEEE Press Book of Selected Reprints*, New York, 1976.

第二章 PCM码的格式和频谱

本章讨论各种脉冲编码调制(PCM)的编码格式和优点。此外,还研究PCM数据流的功率谱密度。假定PCM编码的数据流可以模拟为马尔柯夫过程,首先求基带(无载波)的谱密度,然后再演变成有载波时的谱密度。

2.1 PCM的数据格式

在讨论各种PCM编码格式前,我们先阐述一下系统设计人员选择PCM格式时应考虑的几条准则。

- (1) 频谱特性——是宽带还是窄带,有无直流分量?
- (2) 同步能力——是零交叉的高密度吗?
- (3) 抗干扰性能——这种信号最好^①,但从信号所占频域考虑却完全相反。
- (4) 复杂性和成本——取决于上述特性。

牢记这些准则我们来考虑通信系统通常采用的几种PCM格式。

靶场指挥委员会的场际仪器组(IRIG)^(1,2)认识到,有七种可以使用的PCM数字格式。在图2.1上画出了这七种数据格式,同时画出了另外四种重要的数据格式⁽²⁾。

最简单的格式可能是非归零电平格式(以下简称为NRZ-L)。在这种格式中,二进制的“1”代表信号的一种电平,而“0”代表第二种电平。当符号“1”代表信号电平,而符号“0”代表零电平时,这种波形称为单极性NRZ-L。另外,双极性NRZ-L格式则是相应于二进制符号“1”和“0”的正负信号幅度相等的格式。

对信号幅度翻转的信息进行编码,则得到基本NRZ-L的

① 详见第六章。