

展谱信其用 扩频通及应

朱近康 编著

中国科学技术大学出版社

扩展频谱通信及其应用

朱近康 编著

中国科学技术大学出版社

1993·合肥

9310327

(皖) 新登字08号

扩展频谱通信及其应用

朱近康 编著

*

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路96号, 230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

*

开本: 850×1168/32 印张: 11.125 字数: 285千

1993年1月第1版

1993年1月第1次印刷

印数: 1—3000册

CFSB312-00391-5/TN·12 定价: 7.00元

前 言

编者根据在中国科学技术大学从事本科高年级学生“扩展频谱通信及应用”教学的教学大纲和教学内容，根据原教授该课程的自编教材，写成本书，系统地论述了扩频通信的原理、实现方法，全面介绍扩频通信在各个领域的应用。

本书把扩展频谱通信及其应用的内容，由浅入深、由点到面、由理论到实际的分成七章，它们是绪论，扩展频谱的性能分析，典型的扩展频谱通信系统，扩频序列，扩展频谱通信的捕捉与同步，扩展频谱通信成网技术，扩展频谱通信的应用。适合于电子学、通信、雷达及导航、计算机应用、自动控制等专业的大学高年级学生和研究生学习和阅读，也适合有实际工作经验的工程技术人员阅读。

北京大学无线电电子学系项海格教授主审了本书，提出了许多宝贵意见。国防科工委陈芳允教授、东南大学无线电工程系毕光国教授也参与了审阅工作，并提出了许多宝贵意见。在此表示衷心的感谢。本书在编写过程中还得到东南大学程时昕教授、北方交通大学李承恕教授、中国科学技术大学沈兰荪教授、沈凤麟教授、顾祝平副教授的支持和关照。本书的部分清稿工作和全部图表绘制得到中国科学技术大学冯明臣高级工程师的大量帮助。中国科学技术大学无线电电子学系信息通信与编码实验室的李世鹏老师，吴兴、贾顺等硕士生为本书也作了许多工作。这里一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免还有一些缺点和不妥之处，希望广大读者批评指正。

朱近康

1991年6月于合肥

目 次

前 言	(i)
第一章 绪论	(1)
第二章 扩展频谱通信的性能分析	(16)
第一节 扩频通信系统模型	(16)
第二节 扩频通信的抗干扰能力	(21)
第三节 扩频通信的抗多径干扰能力	(27)
第四节 扩频通信的信噪比和误码率	(31)
第五节 扩频通信的多址能力	(36)
第六节 扩频通信的数据传输能力	(48)
第七节 扩频通信的测距能力	(63)
第三章 典型的扩展频谱通信系统	(69)
第一节 直接序列扩频通信系统	(69)
第二节 跳频通信系统	(84)
第三节 直扩/跳频混合通信系统	(95)
第四节 直扩/跳时混合通信系统	(99)
第五节 线性调频/直扩混合通信系统	(102)
第四章 扩频序列	(105)
第一节 移位寄存器序列	(105)
第二节 序列的相关特性	(111)
第三节 m 序列	(118)
第四节 Gold 序列	(129)
第五节 非线性扩频序列	(137)
第六节 跳频序列	(170)
第五章 扩展频谱通信的捕捉与同步	(182)

第一节	扩频序列的捕捉	(182)
第二节	滑动相关捕捉法	(191)
第三节	SAW器件捕捉法	(205)
第四节	跳频序列的捕捉	(212)
第五节	扩频序列的同步	(214)
第六节	基带相关同步跟踪环	(219)
第七节	包络相关的同步跟踪环	(225)
第八节	单相关器的同步跟踪环	(235)
第九节	简易捕捉同步方法	(242)
第十节	跳频序列的同步	(247)
第六章	扩展频谱通信网	(257)
第一节	扩频通信网结构的评价	(257)
第二节	分布式分组扩频通信网	(263)
第三节	集中式分组扩频通信网	(272)
第四节	跳频通信网	(277)
第七章	扩展频谱通信的应用	(289)
第一节	卫星通信与定位	(289)
第二节	移动通信	(309)
第三节	电源线通信网	(316)
第四节	微弱通信	(321)
第五节	雷达测距	(326)
第六节	无损检测	(332)
第七节	电子医学测量	(337)
参考文献		(344)

第一章 绪 论

一、概 述

扩展频谱通信 (*Spread Spectrum Communication*) 是将待传送的信息数据被伪随机编码 (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。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, 宽带通信, 再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、抗噪音、抗多径衰落、低功率谱密度下工作、有保密性、可多址复用和任意选址、高精度测量等。扩展频谱通信作为新型通信方式, 特别引人注目, 得到了迅速发展和广泛应用。从扩展频谱通信的历史发展看, 这种通信方式在40年代就提出来了, 但没有得到应有的重视和发展。主要理由是这种方式与常规的使用带宽尽量窄的通信方式相比较, 要使用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, 是完全新的、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。

扩展频谱通信 (简称扩频通信) 的原理发表得很早, 但真正的研究是50年代中期在美国开始的。美国军事机关看到, 一般通信方式在强干扰的第三者存在的情况下, 很难准确检测出发送来的信号。另外, 对通信保密的要求也越来越强烈。50年代美国麻省理工学院研究成功NOMAC系统 (*Noise Modulation and Correlation System*), 成为扩频通信研

究发展的开端，从此，军事通信机关对军事通信、空间探测、卫星侦察等方面广泛应用扩频通信方式的研究十分活跃。六十年代以来，随着民用通信事业的发展，频带拥挤日益突出，随着信号处理技术、大规模集成电路和计算机技术的发展、编码和相关处理能方便进行，随着通信技术的迅速发展、军事产品向民用转化，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。1976年 R. C. Dixon 写了第一部扩频通信的概述性专著：Spread Spectrum Systems，1982年 J. K. Holmes 写的 Coherent Spread Spectrum Systems 一书是第一部扩频通信的理论性专著。1985年 M. K. Simon 等写的 Spread Spectrum Communications 一书，共三卷，是扩频通信技术的最全面、最新的专门著作。

近十年来，扩频通信理论方法、技术和应用经历了三个阶段，第一阶段是在1977年前后，在早期建立的扩频通信理论基础上，卓有成效地丰富和发展了扩频通信的理论、方法和实用技术，1977年8月 IEEE 通信汇刊的扩频通信专集和1978年在日本京都举行的国际无线通信咨询委员会（CCIR）全会对扩频通信的专门研究就集中反映了扩频通信的研究成果，开始了世界性的对扩频通信的全面研究。1982年美国第一次军事通信会议，公开展示了扩频通信在军事通信中的主导作用，报告了扩频通信在军事通信各领域的应用，并开始民用扩频通信的调查。IEEE 通信汇刊也在1982年5月再次发表扩频通信专集，系统报导了扩频通信的研究应用成果。这是扩频通信发展的第二阶段。1985年5月美国联邦通信委员会（FCC）制订了民用公共安全、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，明确规定公共安全用 37MHz—952MHz，最大输出功率为2W的电台；工业、科学与医疗用902MHz—928MHz、2.4GHz—2.5GHz、5.725GHz—5.85GHz 三个频段，最大输出功率为100W。世界各国相继行动，组织扩频通信专门研究机构和学术团体，开始了扩频通

信深入研究和广泛应用。1990年1月, CCIR 研究未来公众陆地移动通信系统 (FPLMTS: *Future Public Land Mobile Telecommunication Systems*) 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, 美国国家航空和航天管理局 (NASA: *National Aeronautics and Space Administration*) 采用扩频通信多址方式的频谱利用率高于采用频分多址方式的频谱利用率的技术报告, 对扩频通信的研究和应用产生了深远影响, 开始了扩频通信研究、应用和发展的新阶段。

二、扩频通信的原理

扩频通信, 从利用电磁波来看, 是与一般现有的常规通信方式完全不同的。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。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

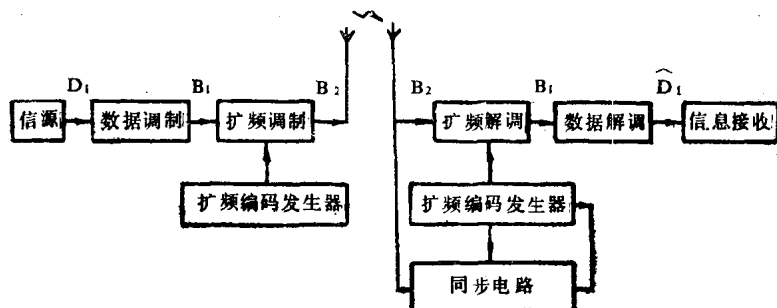


图 1.1 扩频通信基本原理图

据调制后变成带宽为 B_1 的信号 (B_1 为基带信号带宽), 用扩频序列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,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,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难办、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。

扩频通信的主要特征是使用比发送的信息数据速率高得多的伪随机编码,扩展作为基带信号的信息数据频谱,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;多重扩频信号能共用同一频带,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。

扩频通信系统是最有代表性的扩频通信技术应用,它的基本工作方式有

(1) 直接序列扩频 (*Direct Sequence Spread Spectrum*) 工作方式:直扩方式 (DS方式)

系统基本结构如图 1.2 所示。作为输入的数据信息 D , 经过信息调制变成了带宽为 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

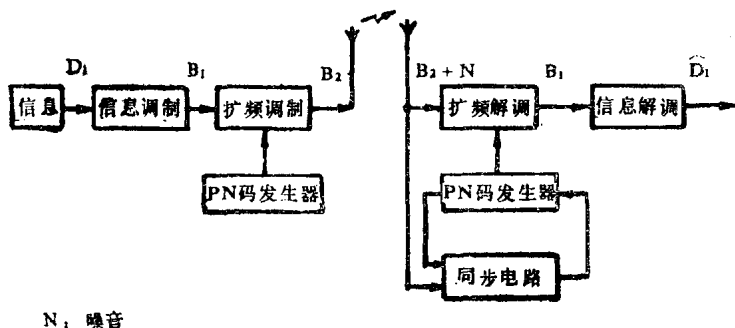


图 1.2 直扩系统基本结构

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。

这种工作方式同以下的其他方式比较, 实现频谱扩展方便, 无论对通信、测距应用, 还是对其他应用都很适合, 还是目用得最多、也是最典型的一种。

(2) 跳变频率 (*Frequency Hopping*) 工作方式: 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

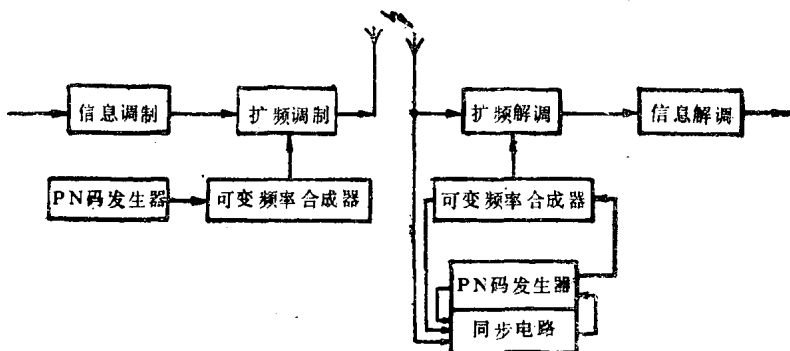


图 1.3 FH 方式的基本结构

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。

(3) 跳变时间 (Time Hopping) 工作方式: 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,单一使用这种方式的很少,多半与其他工作方式混合使用,构成需要的实际系统。

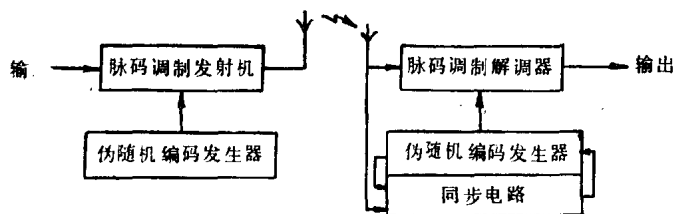


图 1.4 跳时系统的基本结构

(4) 宽带线性调频 (Chirp Modulation) 工作方式: 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 (图 a.), 被变换成频偏为 Δf 的宽带调频波 (通常是线性调频) 发射 (图 b.c.), 接收机解调用具有高频率范围、延迟时间小的脉冲压缩

滤波器（特性如图 *d.*），其输出为极窄的压缩脉冲（图 *e.*）。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，

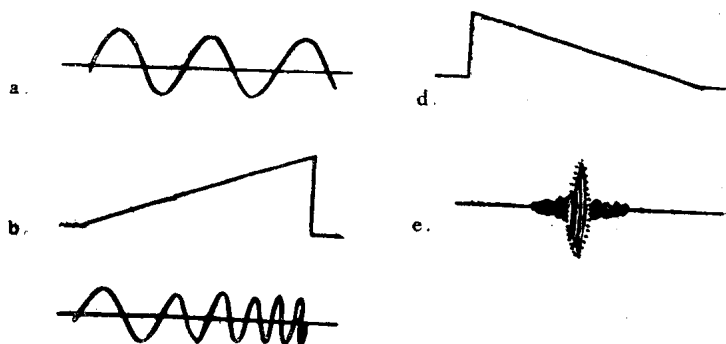


图 1.5 Chirp 方式的基本原理

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。

上述 4 种工作方式是基本的工作方式，最常用的是直扩方式、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工作方式的混合形式。

三、扩频通信的基本参数

反映扩展频谱通信特性的重要参数是扩频增益 G (*Spreading Gain*)。扩频增益 G 定义为频谱扩展前的信号带宽 B_1 与频谱扩展后的信号带宽 B_2 之比。

$$G = B_2 / B_1 \quad (1.1)$$

在扩频通信中，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 B_1 的信号成分，而排除掉扩展到宽频带 B_2 中的外部干扰、噪声和其他用户通信的影响。扩频增益 G 准确反映了扩频通信的这种能力。

扩频增益 G 的重要意义，这里简要举例说明。假定有 K 个通

信用户用各自不同的伪随机编码调制信息数据后发射，某接收机接收第一个通信用户发来的信号。为简便，假设接收信号、噪音和外部干扰在整个工作频带内是均匀分布的，那么

(1) 各通信用户信号等接收功率的情况

假设 P 为接收到的一个通信用户发来的信号平均功率，信号带宽为 B_2 ，则平均功率谱密度为 P/B_2 。其中，第一个通信用户发来的信号是需要的信号，另外 $(K-1)$ 个通信用户的信号是不需要的干扰。这些干扰信号的平均功率谱密度是 $(K-1)P/B_2$ 。设 N_0 是带宽 B_2 内的噪音和其他外部干扰功率谱密度。因此，接收某一个通信用户信号的输入信噪比是

$$(S/N)_{i.} = \frac{P/B_2}{N_0 + \frac{(K-1)P}{B_2}} = \frac{P}{N_0 B_2 + (K-1)P} \quad (1.2)$$

经接收机扩频解调后，能在基带带宽 B_1 内获得全部该通信用户发送来的信号功率，平均功率谱密度为 P/B_1 。而其他通信用户发送来的信号不被相关扩频解调，信号功率仍均匀分布在带宽 B_2 之内，信号功率谱密度不变。故接收机作相关扩频解调后，其输出信噪比是

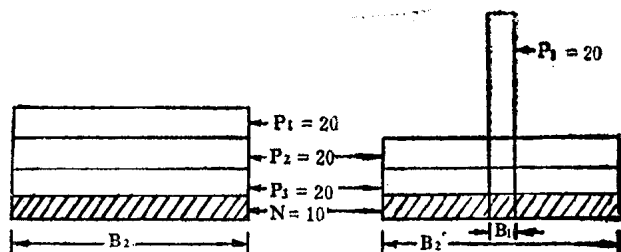
$$(S/N)_{o.} = \frac{P/B_1}{N_0 + \frac{(K-1)P}{B_2}} = \frac{P}{N_0 B_2 + (K-1)P} \cdot \frac{B_2}{B_1} \quad (1.3)$$

显然，扩频解调前后的信噪比之比，即输出信噪比与输入信噪比之比

$$\frac{(S/N)_{o.}}{(S/N)_{i.}} = \frac{B_2}{B_1} = G \quad (1.4)$$

扩频解调前后的信噪比之比等于扩频增益 G ，它给出了扩频通信中扩频解调处理对信噪比的改善。因此，扩频增益 G 又叫对信号的扩频处理增益 (Spread Process Gain)。图 1.6 是 $K=3$, N

$=10, B_2=10, P_1=P_2=P_3=20$ 的扩频解调前后信号平均功率谱密度情况示意图。



a. 扩频解调前

b. 扩频解调后

图 1.6 扩频解调前后信号功率谱密度示意图

(2) 各通信用户信号非等接收功率的情况

设 P_1 为希望接收的通信用户发送来的信号功率, $P_2, P_3, \dots, P_K$ 为不希望接收的通信用户发送来的、被看作干扰的信号功率, 根据式 (1.2)、(1.3) 的同样处理方法, 有

$$(S/N)_{in} = \frac{P_1}{N_0 B_2 + \sum_{i=2}^K P_i} \quad (1.5)$$

$$(S/N)_{out} = \frac{P_1}{N_0 B_2 + \sum_{i=2}^K P_i} \cdot \frac{B_2}{B_1} \quad (1.6)$$

扩频解调前后的信噪比改善为

$$\frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} = \frac{B_2}{B_1} = G \quad (1.7)$$

这个结果, 与式 (1.4) 完全一致, 扩频增益 G 是扩频通信对信噪比改善程度的度量。

四、扩频编码与同步

扩频通信的两个特点是伪随机编码调制和信号相关处理。

伪随机编码调制的核心是产生符合扩频通信需要的伪随机编码，该编码就是扩频编码 (*Spreading Code*) 或叫扩频序列 (*Spreading Sequence*)。为充分发挥扩频通信的突出优点和应用潜力，我们希望扩频编码能有

良好的 (伪) 随机性

长的周期

大的复杂度

多的编码序列

容易产生

等特性。

在直扩系统中，最常见的扩频编码是 m 序列 (最大长度的线性反馈移位寄存器序列)。这种序列有周期长、容易产生、随机性好等优异特性，由图 1.7 所示的线性反馈移位寄存器生成。

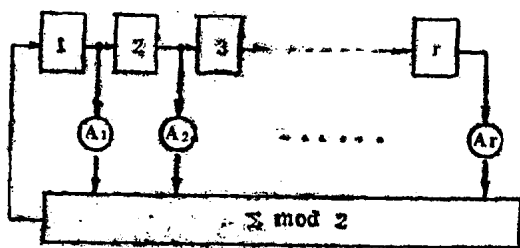


图 1.7 线性反馈移位寄存器电路

图中的小方格是移位寄存器， $A_1, A_2, \dots, A_r$ 是相乘系数，对二值序列，这些系数也是二值：0 或 1。这样，产生的二值序列的序列值

$$c_i = \sum_{j=1}^r A_j c_{i-j} \quad (1.8)$$

其序列周期由反馈系数 A_i ($j=1, 2, \dots, n$) 决定。某些反馈系数状态能产生最大长度 (周期) 的 m 序列。图 1.8 是一个 $n=4$ 的 m 序列发生器, 寄存器状态和 m 序列。该移位寄存器电路的寄存器初始状态不全为 0, 则能产生周期为

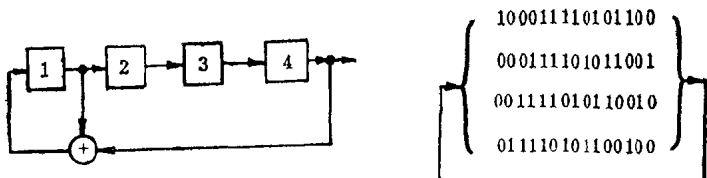


图 1.8 $r=4$ 的 m 序列发生器及寄存器状态图

$$N = 2^n - 1 \quad (1.9)$$

的 m 序列。 m 序列的伪随机特性是

序列值为 0, 1 的次数基本一样。

连续出现为 0 的次数和连续出现为 1 的次数相同, 连续出现同一值的长度 (游程) $u \leq n$

序列的自相关函数为

$$R_{p,n}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (-1)^{e_i} \cdot (-1)^{e_{i+j}} = \begin{cases} 1 & (j=0) \\ -1/N & (j \neq 0) \end{cases} \quad (1.10)$$

这里, $j=0$ 是以周期 N 为模的, 即 $j=0, N, 2N, \dots$ 。 m 序列的式 (1.10) 给出的自相关特性对扩频通信系统是十分重要的, 因为它决定扩频通信的扩频增益, 即扩展频谱能力。

如果作为扩频编码的是 m 序列, 序列信号波形是 N 个宽为 T_c 的矩形波, 周期为

$$T = (2^n - 1) T_c \quad (1.11)$$

的周期信号 $P_N(t)$ 。那么, 该序列信号的自相关函数是

$$R_{p,n}(\tau) = \begin{cases} 1 - \tau(1+N)/NT_c & 0 \leq |\tau| < T_c \\ -1/N & T_c \leq |\tau| < (N-1)T_c \end{cases} \quad (1.12)$$

功率谱密度是