

现代  通信技术丛书

CDMA

通 信 技 术

朱近康 编著

人民邮电出版社
www.pptph.com.cn

现代移动通信技术丛书

CDMA 通信技术

朱近康 编著

人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

CDMA 通信技术/朱近康编著. —北京: 人民邮电出版社, 2001. 9

(现代移动通信技术丛书)

ISBN 7-115-09428-4

I. C... II. 朱... III. 码分多址—数字通信: 移动通信—通信技术 IV. TN929. 533

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 038065 号

内 容 提 要

本书系统的论述 CDMA 通信原理、CDMA 通信性能、典型 CDMA 通信系统、CDMA 通信编码、CDMA 通信的编码捕捉与编码同步、CDMA 通信网、CDMA 通信的最新技术进展, 以及 CDMA 通信技术的典型应用。

本书内容新颖、结构安排合理, 适合通信工程、电子工程、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, 对参加相关工作的工程技术人员也有极强的参考价值。

现代移动通信技术丛书

CDMA 通信技术

◆ 编 著 朱近康

责任编辑 陈万寿

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ pptph.com.cn

网址 <http://www.pptph.com.cn>

北京汉魂图文设计有限公司制作

北京顺义向阳胶印厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787 × 1092 1/16

印张: 16.75

字数: 404 千字

2001 年 9 月第 1 版

印数: 1—5 000 册

2001 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-09428-4/TN·1736

定价: 29.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010)67129223

2002/01

前 言

20 世纪 80 年代后期,国内外对 CDMA 多址通信技术,特别是实现技术,进行了广泛而深入的研究,并取得了重大的进展。CDMA 通信技术,作为新一代移动通信和无线通信的关键技术,在近十年中得到了非常迅速的发展,几乎被应用到个人通信的各个方面。

本书是在笔者编写的《扩展频谱通信及其应用》一书的基础上,根据在中国科学技术大学从事本科高年级学生“扩展频谱通信及其应用”课程的教学实践,参考国内外的相关研究成果及最近 CDMA 通信技术的发展,特别是 CDMA 增强技术的发展,重新编写而成的。本书尽量按照由浅入深、由点到面、由理论到实际的顺序安排,系统地论述了 CDMA 通信的原理、CDMA 通信的性能分析、典型 CDMA 通信系统、CDMA 通信编码、CDMA 通信的编码捕捉与编码同步、CDMA 通信网、CDMA 通信的增强技术,以及 CDMA 通信技术的应用。

本书内容不仅适合于个人通信、移动通信、无线通信、卫星通信等专业,也适合于所有通信专业领域、电子学、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。另外,本书对参加相关工作的工程技术人员也有参考价值。

本书的编写,得到过原国防科工委陈芳允院士的支持,原编写的《扩展频谱通信及其应用》一书还得到过他的审阅和修改,在此特别表示感谢。同时,感谢所有为本书的编写给予审阅和修改、给予支持和帮助的同行人和朋友。

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
2001 年 4 月于合肥

目 录

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 扩频通信原理	2
1.3 扩频 CDMA 通信的基本参数	4
1.4 扩频 CDMA 通信的基本技术	6
第二章 CDMA 通信技术的性能分析	11
2.1 CDMA 通信系统模型	11
2.2 抗干扰能力	15
2.2.1 抗平稳随机过程的干扰	15
2.2.2 抗单频干扰	17
2.2.3 抗有意人为干扰	19
2.3 抗多径干扰能力	20
2.4 信噪比和误码率	23
2.5 多址能力	26
2.5.1 随机多址的 CDMA 通信方式	27
2.5.2 同步多址的 CDMA 通信方式	32
2.6 数据传输能力	34
第三章 CDMA 通信系统	44
3.1 直接序列扩频的 CDMA 通信系统	44
3.2 跳频的 CDMA 通信系统	54
3.3 混合方式的 CDMA 通信系统	61
3.3.1 跳频/直扩的混合系统	61
3.3.2 跳时/直扩的混合系统	63
第四章 CDMA 通信的编码序列	67
4.1 移位寄存器序列	67
4.2 序列的相关特性	71
4.2.1 序列周期相关特性	72
4.2.2 序列部分相关特性	74
4.3 m 序列	75
4.3.1 m 序列的特性和生成	76
4.3.2 m 序列的相关特性	78

4.3.3 其它伪随机序列	81
4.4 Gold 序列	82
4.5 非线性扩频序列	87
4.5.1 代数型非线性扩频序列	88
4.5.2 结构型非线性扩频序列	99
4.5.3 功能型非线性扩频序列	104
4.6 跳频序列	108
4.6.1 Reed-Solomon 编码	109
4.6.2 频率分集的跳频序列	112
4.6.3 单一符合跳频码	115
第五章 CDMA 通信的编码捕捉	118
5.1 编码序列的捕捉	118
5.2 滑动相关捕捉法	123
5.2.1 单积分滑动相关捕捉系统	123
5.2.2 双积分滑动相关捕捉系统	130
5.2.3 k 次积分滑动相关捕捉系统	132
5.2.4 序贯检测捕捉系统	133
5.3 SAW 器件捕捉法	135
5.3.1 抽头延迟线捕捉法	136
5.3.2 卷积器捕捉法	138
5.4 跳频序列的捕捉法	140
第六章 CDMA 通信的编码同步	142
6.1 编码序列的同步	142
6.2 基带相关同步跟踪环	144
6.3 包络相关同步跟踪环	148
6.4 单相关器的同步跟踪环	154
6.5 简易捕捉同步方法	159
6.6 跳频序列的同步	162
第七章 CDMA 通信网	169
7.1 CDMA 通信网结构和评价	169
7.2 分布式分组 CDMA 通信网	173
7.3 集中式分组 CDMA 通信网	178
7.4 跳频通信网	181
第八章 CDMA 通信的增强技术	192
8.1 CDMA 通信系统容量	192

8.2	智能天线	201
8.3	多用户检测与多址干扰对消	209
8.4	发射分集与分集接收	216
8.5	信号功率控制	230
8.6	信包扩展	236
第九章	CDMA 通信技术的应用	245
9.1	通信系统的应用	245
9.2	雷达测距的应用	249
9.3	卫星定位的应用	252
9.4	电子医学测量的应用	254

第一章 绪 论

1.1 概 述

CDMA (Code Division Multiple Access)通信是利用相互正交(或尽可能正交)的不同编码分配给不同用户调制信号,实现多用户同时使用同一频率接入系统和网络的通信,即码分多址通信。由于利用相互正交(或尽可能正交)的编码去调制信号,会将原信号的信号频谱带宽扩展,因此,对这种调制方式的通信,又称为扩展频谱通信。

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、能在低功率谱密度下工作、有保密性、可多址复用和任意选址、可高精度测量等。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。主要原因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 NO-MAC 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。60 年代以来,随着民用通信事业的发展,频带拥挤问题日益突出,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,是扩频通信技术当时最全面的专门著作。

扩频通信理论方法、技术和应用的发展,经历了几个阶段,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,系统报道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100mW。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,开始了扩频通信的深入研究和广泛应用。这是扩频通信发展的第三阶段。在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)也提出了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,开始了将扩频通信技术应用到移动通信系统中的研究。1991年5月,William C.Y.Lee在IEEE Trans. on Vehicular Technology上发表“Overview of Cellular CDMA”一文,论证了在蜂窝移动通信中具有功率控制的CDMA系统容量是FM方式的20倍、TDMA方式的4倍的结论,引起了全世界移动通信、无线通信学界的激烈讨论,对扩频CDMA通信技术的研究和应用产生了深远影响。以美国Qualcomm公司为首推出的IS-95 CDMA移动通信系统、以W-CDMA、CDMA2000和TD-SCDMA为主流的第三代移动通信系统标准化建议,确立了CDMA通信技术在移动通信中的稳固地位,把扩频CDMA通信的研究、应用和发展推向了新阶段。

1.2 扩频通信原理

从利用电磁波来看,扩频通信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 经通常的数据调制后变成带宽为 B_1 的

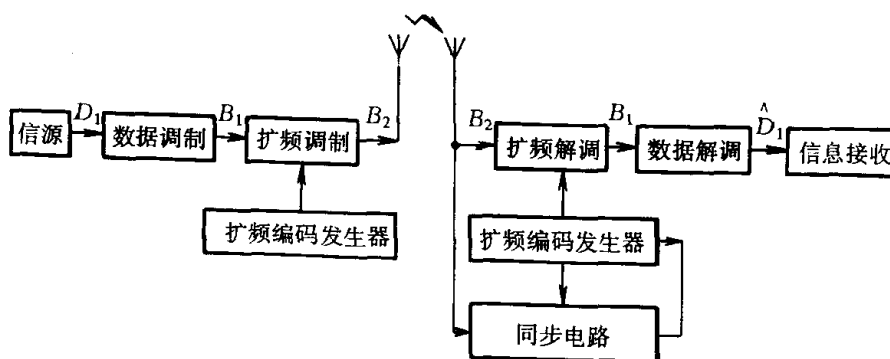


图 1.1 扩频通信基本原理图

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。

CDMA 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如下 3 种。

(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。

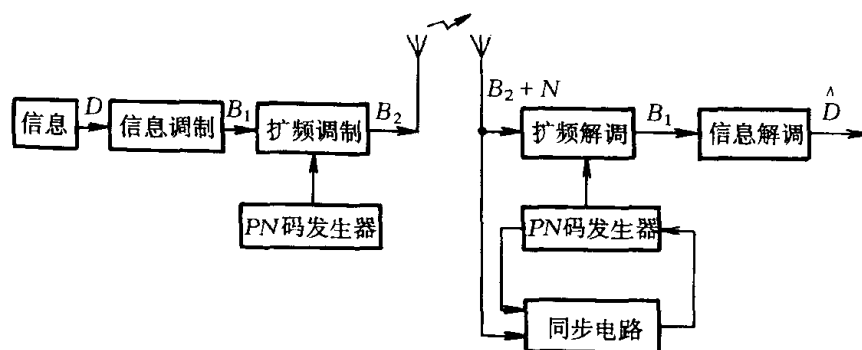


图 1.2 直扩系统基本结构

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, 是目前用得最多、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

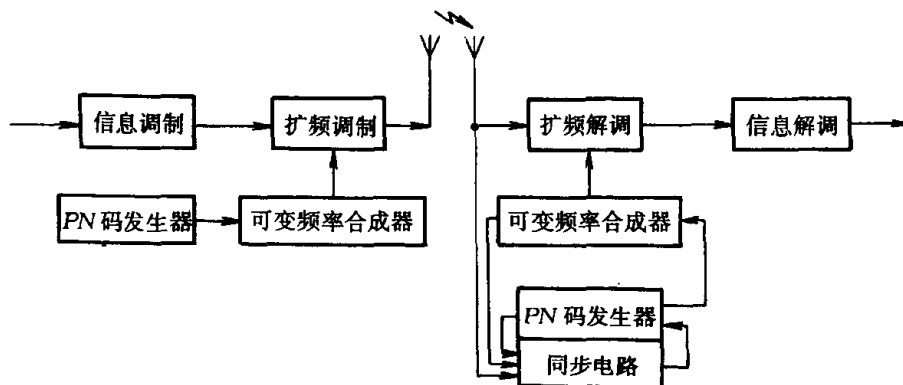


图 1.3 FH 方式的基本结构

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应用，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。

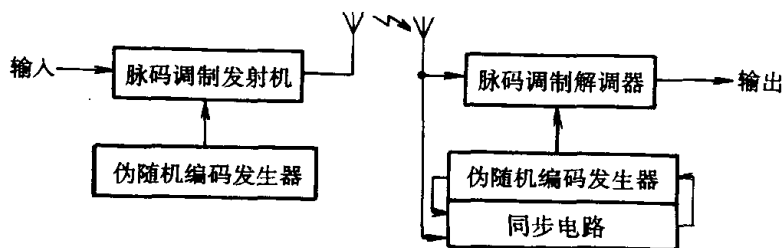


图 1.4 跳时系统的基本结构

上述 3 种工作方式是基本的 CDMA 通信工作方式，其中最常见的是直扩方式和跳频方式两种。应该指出，在实际应用系统中，要达到所希望的系统性能，往往不是某种基本工作方式的简单应用，但它们是应用工作方式的基础。

1.3 扩频 CDMA 通信的基本参数

反映扩展频谱通信特性和 CDMA 多用户能力的重要参数是扩频增益 G (Spreading Gain)。扩频增益 G 定义为频谱扩展后的信号带宽 B_2 与频谱扩展前的信号带宽 B_1 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

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

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

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

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是

$$\frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} = \frac{B_2}{B_1} = G \quad (1.4)$$

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 1.5 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。

(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

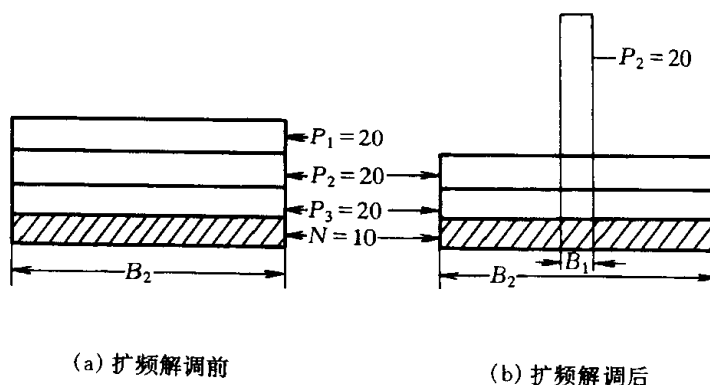


图 1.5 扩频解调前后信号功率谱密度示意图

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

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。

1.4 扩频 CDMA 通信的基本技术

采用扩展频谱方式的 CDMA 通信，最突出的两个特点是在常规通信技术的基础上增加了发送方的伪随机编码调制和接收方的伪随机编码相关处理，扩频通信基本原理图如图 1.1 所示。

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下列特性：

- (1) 良好的(伪)随机性
- (2) 长的周期
- (3) 大的复杂度
- (4) 多的编码序列
- (5) 容易产生

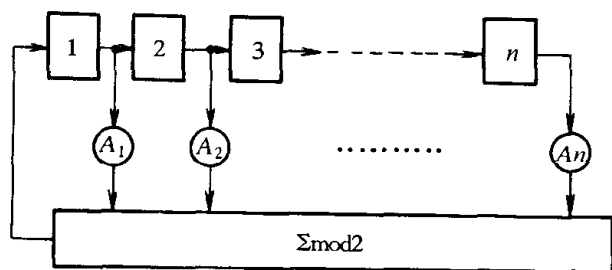


图 1.6 线性反馈移位寄存器电路

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，它由图 1.6 所示的线性反馈移位寄存器生成。图中的小方格是移位寄存器， $A_1, A_2, \dots, A_n$ 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

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

其序列周期由反馈系数 A_j ($j=1, 2, \dots, n$) 决定。某些反馈系数状态能产生最大长度(周期)的 m 序列。图 1.7 所示是一个 $n=4$ 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

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

的 m 序列。 m 序列的伪随机特性是：

(1) 序列值为 0, 1 的次数基本一样。

(2) 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) $u \leq n$ 。

(3) 序列的自相关函数为

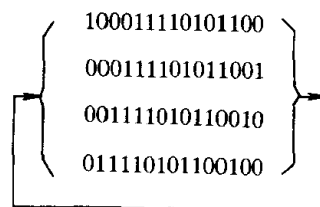
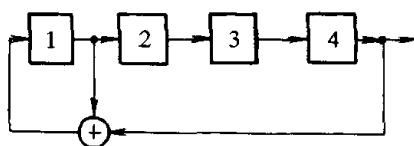


图 1.7 $n=4$ 的 m 序列发生器及寄存器状态图

$$R_{\text{pn}}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (-1)^{c_i} \cdot (-1)^{c_{i+j}} = \begin{cases} 1 & (j=0) \\ -1/N & (j \neq 0) \end{cases} \quad (1.10)$$

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

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

功率谱密度是

$$S_{\text{pn}}(f) = \frac{1}{N^2} \delta(f) + \frac{N+1}{N^2} \left(\frac{\sin(\pi f/f_c)}{\pi f/f_c} \right)^2 \sum_{\substack{j=-\infty \\ j \neq 0}}^{\infty} \delta(f - jf_d) \quad (1.13)$$

式中, $f_c = 1/T_c$ 、 $f_d = f_c/N$ 。图 1.8 给出了式(1.12)、(1.13)所示的 m 序列自相关特性和功率谱密度。显然, N 越大, 自相关旁瓣 $-1/N$ 越小, 功率谱密度的频谱线间隔 f_d 越小, 谱线幅度越低。

在跳频系统中, 使用有极宽频谱的 m 序列作调制是不行的, 它希望狭窄的工作频带按某种顺序跳变、均匀地使用全部极宽频带的各个窄带。因此, 跳频系统必须使用不同于直扩系统的扩频编码。跳频系统最常用的是 RS 编码(Reed-Solomon Code)。RS 编码是多元 BCH 循环编码的一种, 有最大 Hamming 距离, 可选用的编码数目多。设 p 为质数, RS 编码是 $q = p^n$ 元编码, 可在有 q 个窄带的宽频带上作均匀跳频选取。其编码数目为 p^n , 码长 $N = q - 1$ 。如果 $p = 2$, RS 编码可由产生 m 序列的 n 级线性移位寄存器状态并行输出与编码选取寄存器状态作模 2 相加来产生。图 1.9 给出了 $p = 2$, $n = 3$, $N = 7$ 的 RS 编码发生器和相应的 RS 编码。

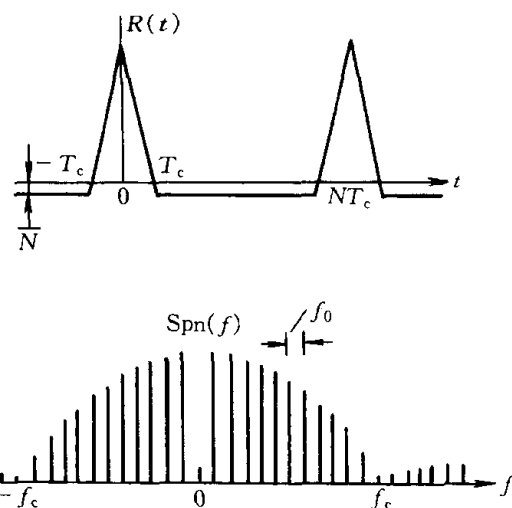


图 1.8 m 序列的自相关特性与功率谱密度

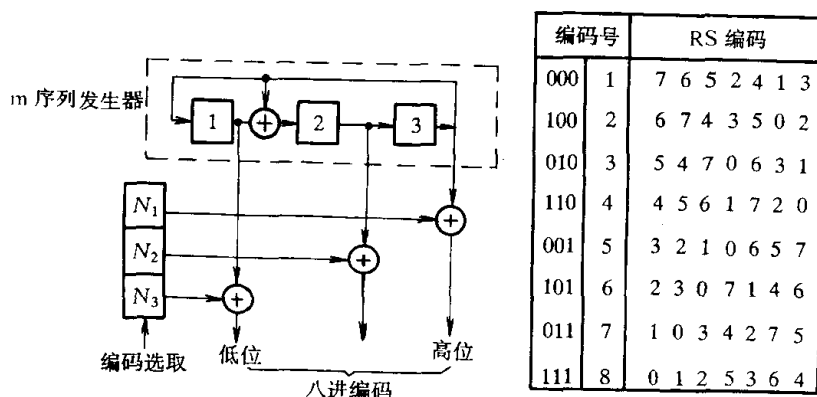


图 1.9 RS 编码发生器及相应编码

实际扩频系统使用的扩频编码是各种各样的，我们将在扩频序列一章中仔细讨论。

扩频通信要通过扩频解调处理(解扩)来恢复窄带信号，也就是对扩频编码作相关处理来实现解扩，这就要求接收机的本地伪随机编码与发射来的扩频编码相位完全同步，否则就不能实现同通信对方的连接，而是一片噪声。若实现了同步而不能保持同步，也不能准确可靠获取发送来的信息数据。因此，同步问题是扩频通信的又一重要根本问题。扩频通信获取扩频同步的过程叫初始同步，通常称为捕获(acquisition)，保持已获得的同步叫同步保持，通常称为跟踪(tracking)。

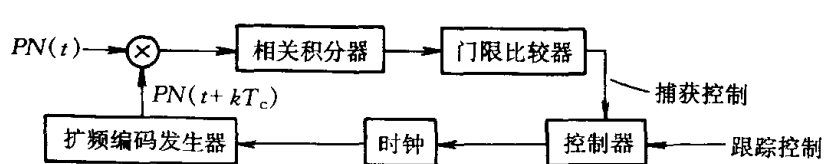


图 1.10 扩频编码滑动相关捕获原理

代表性的扩频序列捕捉方法有两种。一种叫做扩频编码的滑动相关捕捉法(slipping correlation)，工作原理如图 1.10 所示。

当本地扩频编码与输入信号的扩频编码有相位差时，它们之间作

相关，其相关积分值是扩频编码自相关旁瓣，低于比较门限，门限比较器没输出，控制器将跟踪控制断开，让产生扩频编码的时钟速度偏移，使本地扩频编码相位相对接收到的扩频编码相位在滑动。当与接收到的扩频编码相位一致时，相关值为最大尖峰，门限比较器有输出，控制器将转向跟踪控制，时钟速度稳定，产生与接收到的扩频编码相位一致的本地扩频编码，完成了扩频编码的捕获。另一种方法是使用匹配滤波器，常用的是声表面波器件(SAW 器件)。用 SAW 抽头延迟线、SAW 卷积器、SAW 相关器等来实现扩频编码的同步捕获。也有用 CCD 器件或大规模数字电路器件来完成的。

扩频编码的跟踪，是在扩频编码相位同步捕获成功的基础上工作的，要求能使本地扩频编码与发送来的扩频编码的相位差保持尽可能小，一般应小于扩频码元宽 T_c 的 $1/10$ 。最常使用的、最有代表性的是图 1.11 所示的延迟锁相环(DLL)电路。该电路使用两个扩频编码相关器，它们的本地扩频编码相位与接收到的输入扩频编码相位分别相差 $+T_c/2$ ， $-T_c/2$ ，彼此相减得到图 1.11 所示的跟踪鉴别信号。该信号经滤波器输出，去控制压控振荡器的时钟速率，从而调整本地扩频编码的输出相位，达到与接收到的扩频编码相位一致。即本地扩频编码相位超前时，跟踪鉴别输出信号为负，时钟速度降低，使本地扩频编码的码元生成速度降低，从而消除超前。反之亦然。这样，使用延迟锁相环能很好地保持本地扩频编码与接收到的扩频编码的良好同步。实际扩频系统对扩频编码的捕获与跟踪，将要在以后详细讨论。

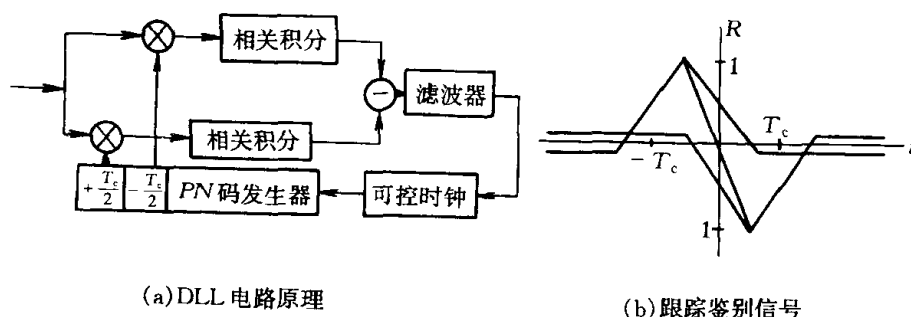


图 1.11 延迟锁相跟踪环

扩频编码和扩频编码的相关处理,是实现扩频 CDMA 通信的扩频调制和扩频解调的基础,是 CDMA 通信的两大基本技术。

CDMA 通信不是简单的点对点、点对多点、甚至多点对多点的通信,而是大量用户同时工作的大容量大范围的通信。移动通信的蜂窝结构是建立大容量大范围通信网络的基础,而采用 CDMA 通信技术实现和建构多用户大容量的通信网络,有其 CDMA 自身的采用码分多址优异特性的特点,是 CDMA 实现通信网的又一基本技术。

以常规的移动通信系统为例,其移动通信网络结构如图 1.12 所示的蜂窝结构,“x”表示为蜂窝各小区的基站,记为 I_i 。移动用户 MS_1 在某一位置正与 I_i 基站通信,但它也有可能收到 I_1 、 I_2 、 $\dots$ I_k 来的信号。移动用户 MS_2 在另一位置也正在与 I_i 基站通信,……。因此,移动用户收发过程中,要分辨是否为本移动用户的信号,是否是所在基站的信号,是所在基站的哪一个信道的信号。只有能准确、有效地分辨这些信号,无论是在移动用户终端还是小区基站,才能建立起蜂窝结构的移动通信网络。CDMA 通信系统利用码分多址的优势,仅仅分配不同的扩频编码来简便实现,是其它多址方式不可比拟的。

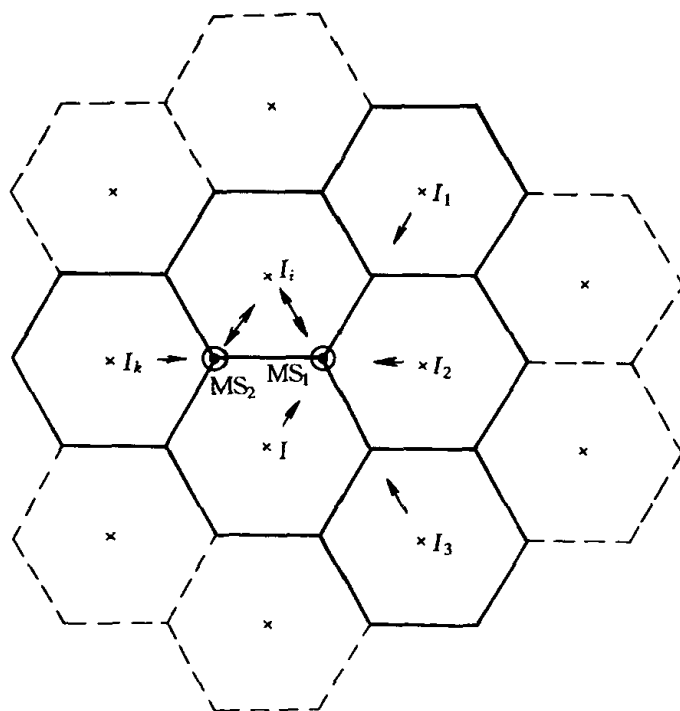


图 1.12 移动通信的蜂窝小区结构

CDMA 移动通信系统,通常具有如图 1.13 所示的三层扩频编码结构:分配给移动终端与基站通信的信道标识编码、表征基站的基站码、表征移动终端的用户码。信道码是基站能够同时用来收发的扩频编码,记为 PN_c 。扩频编码周期为 N_c ,则最多能构成 1、2、3、 $\dots$ N_c 个相互正交或准正交的伪随机编码,则信道码为

$$PN_c = (PN_{c1}, PN_{c2}, PN_{c3}, \dots, PN_{cN_c}) \quad (1.14)$$

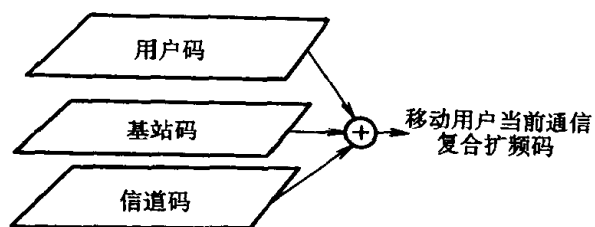


图 1.13 CDMA 移动通信三层扩频编码结构

基站码是表征基站的扩频编码,为了基站收发信号的信道码各个基站都能使用,信道码重复使用,表征基站的基站码一定不能相同。但对蜂窝结构大范围地区覆盖的蜂窝移动通信系统而言,基站数目远比一个基站能同时收发的信道数多,基站码的扩频编码周期 N_i 一定大于 N_c ,最大具有 N_i 个基站码,记为

$$PN_i = (PN_{i1}, PN_{i2}, PN_{i3}, \dots, PN_{iN_i}) \quad (1.15)$$

表征移动用户终端的用户码,既有信号区分的要求也有保密的需要,应该与移动用户一样,是完全唯一的。由于移动用户相当多,表征移动终端的用户扩频编码周期就会相当长,记为

$$PN_M = (PN_{M1}, PN_{M2}, PN_{M3}, \dots, PN_{MN_M}) \quad (1.16)$$

其中 N_m 为用户扩频编码周期, 有 $N_m \gg N_I > N_C$ 。

按照上述的扩频编码结构, 在图 1.12 所示的 CDMA 移动通信系统中, 移动用户 MS_1 通信中使用的扩频码 PN_1 , 为

$$PN_1 = PN_{M1} \oplus PN_{I_i} \oplus PN_{C_j} \quad (1.17)$$

其中 I_i 为第 i 个基站, C_j 为第 j 个信道。而移动用户 MS_2 同时通信时, 使用的扩频码 PN_2 , 为

$$PN_2 = PN_{M2} \oplus PN_{I_i} \oplus PN_{C_k} \quad (1.18)$$

其中 $k \neq j$, 在同一基站使用不同的信道码。对移动用户 MS_m , 不论使用哪个信道码, 处在与哪个基站的通信中, 使用的扩频码 PN_m 都为

$$PN_m = PN_{M_m} \oplus PN_{I_i} \oplus PN_{C_k} \quad (1.19)$$

其中, $k \leq N_C$, $i \leq N_I$, $m \leq N_m$ 。不同用户有不同的扩频码。

当然, 在实际系统中, 扩频编码可以不使用上述的三层编码结构, 但要构成大范围覆盖的、支持大用户量的 CDMA 移动通信系统, 三层扩频编码结构是实现全码分多址通信方式的 CDMA 通信网的典型成网技术。

扩频 CDMA 通信技术的突出特点和优势使它的应用十分广泛。IEEE 通信学会由权威人士组成的专门小组的分析报告认为, 扩频 CDMA 通信技术除了应用于各种通信系统以外, 还适合于各种低功率密度应用, 如生物医学、遥测、家用电器、遥控、跟踪及报警系统等; 也适合于多用户选址系统应用, 如传呼、控制、定位、测量等。这些应用都有相应的扩频 CDMA 通信的基本技术支持, 如同 CDMA 成网技术支持 CDMA 应用于各种通信系统一样。因此, 研究和发展 CDMA 通信技术, 促进它在各个有关领域的应用, 是十分有意义、有前途的。