

邬国扬 编著

CDMA

数字蜂窝网



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

CDMA
数字蜂窝网

邬国扬 编著

技大学

CDMA 数字蜂窝网

邬国扬 编著

西安电子科技大学出版社

2000

内 容 简 介

本书系统地阐述了 CDMA 数字蜂窝网移动通信系统的基本理论、基本概念和基本技术,力求做到基本理论紧密结合实际系统,深入浅出,图文并茂。

全书共分 5 章。内容包括码分多址(CDMA)移动通信的技术基础、CDMA 的码序列、CDMA 移动通信系统的关键技术、CDMA 典型系统(即“双模”式 Q-CDMA 系统)的组成、工作原理等。

本书可作为高等学校通信与电子系统、无线电技术等专业的高年级学生的教材,也可供通信工程技术人员作为继续教育或培训的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

CDMA 数字蜂窝网/邬国扬编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2000.6

ISBN 7-5606-0841-8

I. C… II. 邬… III. 码分多址—移动通信:数字通信—通信网
IV. TN929.533

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 20911 号

责任编辑 李惠萍 戚文艳

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)8227828 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 西安正华印刷厂

版 次 2000 年 6 月第 1 版 2000 年 6 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 13.125

字 数 306 千字

印 数 1~4 000 册

定 价 12.00 元

ISBN 7-5606-0841-8/TN·0144

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志,无标志者不得销售。

前 言

众所周知,自从 20 世纪 70 年代出现蜂窝网通信以来,世界各地移动通信行业得到了迅猛的发展,而蜂窝网的技术本身也得到了长足的进步。就多址接入方式而言,20 世纪 80 年代出现了时分多址(TDMA)数字蜂窝网,以 GSM 为代表的数字蜂窝移动通信系统在国内外已获得了广泛应用。20 世纪 90 年代又出现了码分多址(CDMA)蜂窝网移动通信系统。由于它通信容量大、质量好,因此立即引起了人们广泛的关注,其优势已被人们所公认,其发展前景十分良好。不少专家预言,21 世纪将是 CDMA 通信广泛应用的年代。

CDMA 蜂窝网移动通信是在频分多址(FDMA)模拟蜂窝网和时分多址(TDMA)数字蜂窝网基础上发展起来的,既有共同点,也有很多独特的地方。从技术角度来看,CDMA 蜂窝网技术是最先进的,同时又是最复杂的。可以说,在一定范围内,它反映了现代通信的技术水平。

多年来,作者一直从事移动通信教学和科研工作,为大学生、研究生开设“移动通信”、“扩频通信”课程,因而深知 CDMA 通信涉及的专业知识领域比较宽,除了数字通信基础之外,还必须熟悉诸如扩频技术、伪随机序列、纠错编码、移动信道中信号衰落与分集接收技术等。这些方面虽有各种专著可供阅读,但对于普通读者,希望有一本 CDMA 通信的书籍,同时兼顾理论基础和实际通信系统知识,本书就是基于这种考虑而写的。着重讲述与 CDMA 蜂窝网移动通信系统有关的基本理论、基本概念和基本技术,做到基本理论紧密结合实际系统,深入浅出、图文并茂。

由于码分多址是以扩频通信为基础的,而 CDMA 蜂窝系统的无线传输又处于移动信道之中,因此,本书在第 1 章码分多址的技术基础中,讨论了扩频通信的概念、原理、类型及特点;数字信号扩频与调制;数字信号的纠错编码等。第 2 章为 CDMA 码序列,着重讲述 CDMA 系统中用到的 m 序列和正交的沃尔什(Walsh)函数。读者不仅要熟悉码序列的产生方法,而且更重要的是对码序列的性质有很好的理解,尤其是码序列的相关性极为重要。为此,在本章中不仅给出了相关函数、相关系数定义、表达式,而且通过具体码序列波形,求得自相关和互相关例子,以便读者理解和掌握这些重要的概念。第 3 章为 CDMA 通信原理,着重讨论 CDMA 蜂窝系统中必须解决的一些关键技术,如自动功率控制、分集接收技术等。此外,还讨论了 CDMA 蜂窝网通信容量问题,从而回答了为什么 CDMA 引起人们广泛关注的原因。第 4 章讲述典型的 CDMA 蜂窝移动通信系统,即执行 IS-95 标准的“双模式”蜂窝移动通信系统,包括它的组成、工作原理及系统工作过程。本章只涉及“双模式”中的码分多址部分,有关模拟部分内容放到了第 5 章中。

本书可作为高等学校通信与电子系统、无线电技术等专业的高年级学生的教材,也可供通信工程技术人员作为继续教育或培训的参考书。

在完成此次书稿任务中，我要特别感谢我的老师——陈太一院士的不断鼓励，也要感谢我的研究生——广东省邮电科学院的覃和仁主任工程师，他提供了宝贵的资料。没有他们的支持和帮助，就很难在几个月内完成此书的编著任务。由于时间紧、资料少、水平有限，不当之处，敬请读者指正。

作 者
于浙江万里学院
1999 年 12 月

目 录

第 1 章 码分多址技术基础	1	1. 循环码的概念	35
1.1 什么是扩展频谱通信	1	2. 循环码的构成	37
1.1.1 扩展频谱通信的基本概念	1	3. BCH 码	39
1. 扩频通信的含义	1	1.3.4 卷积码和交织编码	40
2. 扩频通信的理论基础	2	1. 卷积码	40
3. 处理增益和抗干扰容限	3	2. 交织编码	43
1.1.2 扩频通信的主要特性	3	第 2 章 CDMA 码序列	45
1. 抗干扰能力强	3	2.1 伪随机码(PN)的概念	45
2. 隐蔽性好	4	2.1.1 码序列及其波形	45
3. 可以实现码分多址	4	2.1.2 移位寄存器	47
4. 抗衰落、抗多径干扰	5	2.1.3 码序列的相关性	48
1.2 数据信息的扩频和调制	5	1. 相关性概念	48
1.2.1 数字信号	6	2. 码序列的自相关	49
1. 数字信号表示	6	3. 码序列的互相关	52
2. 二进制编码	7	2.2 m 序列	52
3. 数字信号传输质量指标	8	2.2.1 m 序列的产生	52
1.2.2 数字信号调制	9	1. m 序列的含义	52
1. ASK 信号	9	2. m 序列产生原理	53
2. FSK 信号	10	2.2.2 m 序列的特性	56
3. PSK 和 DPSK	11	1. m 序列的随机性	56
4. QPSK 和 OQPSK	13	2. m 序列的自相关函数	57
1.2.3 数字信号扩频原理	17	3. m 序列的互相关函数	59
1. 数字信号的波形与频谱	17	2.3 其它码序列	61
2. 扩频通信系统类型	19	2.3.1 m 序列的优选对与 Gold 序列	61
3. 直接序列扩频(DS)原理	22	1. m 序列的优选对	61
1.3 数字信号的纠错编码	27	2. Gold 序列	63
1.3.1 纠错编码的基本原理	28	2.3.2 Walsh(沃尔什)函数	64
1.3.2 常用的简单编码	31	1. Walsh 函数含义	64
1. 奇偶监督码	31	2. 沃尔什函数产生	64
2. 二维奇偶监督码	31	3. 沃尔什函数性质	66
3. 重复码	32	第 3 章 CDMA 通信原理	69
4. 正反码	32	3.1 CDMA 基本原理	69
5. 汉明码	33	3.1.1 多址技术选择	69
1.3.3 循环码	35	1. 3 种多址方式	69

2. CDMA 通信基本原理	71	4.1.2 无线信道	124
3. 码分多址特点	72	1. CDMA 频道号码与相应频率值	125
3.1.2 CDMA 系统下行链路	73	2. CDMA 系统的逻辑信道	127
1. 下行链路组成	73	4.1.3 CDMA 网络结构与组成	130
2. 基站发射合路信号	74	1. 网络子系统	130
3. 移动台接收信号	75	2. 基站子系统	132
3.1.3 CDMA 上行链路	76	3. 移动台	133
3.2 CDMA 蜂窝网的关键技术	79	4. CDMA 系统的基本特征	134
3.2.1 自动功率控制	80	4.2 CDMA 正向信道	136
1. 远近效应	80	4.2.1 正向信道组成	136
2. 反向链路的功率控制	81	1. 信号组成	136
3. 正向链路的功率控制	82	2. 四相调制	136
3.2.2 信号衰落与分集接收	83	4.2.2 正向 CDMA 的控制信道	138
1. 移动信道的特征	83	1. 导频信道	139
2. 什么是分集接收	86	2. 同步信道	139
3. 分集方式	87	3. 寻呼信道	141
4. 合并方式	89	4.2.3 正向 CDMA 业务信道	144
5. 分集合并的性能	90	1. 信息的组成及其格式	144
3.2.3 CDMA 系统的分集技术	91	2. 卷积编码	147
1. 多种分集技术	91	3. 码元重复和交织	148
2. RAKE 接收机	93	4. 数据掩蔽	153
3.2.4 CDMA 系统的其它关键技术	97	5. 功率控制子信道	153
1. 正交调制与正交扩频	97	4.3 CDMA 反向信道	155
2. 编码技术	100	4.3.1 反向信道组成及特点	155
3. 过境切换技术	102	1. 组成及其原理	156
4. 电压、功率和电场强度关系	104	2. 可变数据速率传输	157
3.3 蜂窝网通信容量	109	3. 正交多进制调制	159
3.3.1 通信系统容量	109	4. 直接序列扩展	159
1. 通信容量概念	109	5. 四相扩展	160
2. FDMA 蜂窝网的通信容量	110	4.3.2 接入信道	160
3. TDMA 蜂窝网的通信容量	113	1. 反向信道的卷积编码器	160
4. 3 种 TDMA 蜂窝系统的 容量比较	113	2. 码元重复和分组交织	163
3.3.2 CDMA 蜂窝通信系统的容量	116	3. 多进制正交扩频调制	165
1. 扩频系统的容量	116	4. 利用长码进行直接序列扩频	165
2. CDMA 蜂窝网容量	117	4.3.3 反向业务信道	166
3. CDMA 软容量特性	120	1. 变速率传输	167
第 4 章 CDMA 通信系统	122	2. 帧质量标志	167
4.1 系统综述	122	4.4 系统控制功能	169
4.1.1 总体要求与标准	122	4.4.1 功率控制	169
1. 对系统的要求	122	1. 正向链路功率控制	169
2. CDMA 蜂窝网的崛起	123	2. 反向链路开环功率控制	170
3. IS-95 标准	124	3. 反向链路闭环功率控制	170
		4.4.2 CDMA 系统切换	171

1. 3 种切换方式	171	5.3 系统控制及其信令	190
2. 切换方法	171	5.3.1 系统的控制结构	191
4.4.3 登记注册	172	5.3.2 控制信号及其功能	192
1. 自主注册	173	1. 监测音	192
2. 其它注册	174	2. 信令音	192
4.4.4 呼叫处理	174	3. 定位与过境切换	193
1. 移动台初始化状态	174	4. 寻呼与接入	194
2. 移动台空闲状态	175	5. 冲突退避	194
3. 系统接入状态	175	6. 移动台的功率等级信号	194
4. 移动台在业务信道控制状态	176	7. 拨号数字信号	195
4.4.5 呼叫流程图	179	8. 移动用户识别号	195
1. 由移动台发起的呼叫	179	5.3.3 数字信令	195
2. 以移动台为终点的呼叫	179	1. 前向控制信道	195
3. 软切换期间的呼叫处理	179	2. 反向控制信道	196
4. 连续软切换期间的呼叫处理	179	3. 前向话音信道中的控制信令	197
第 5 章 频分多址(FDMA)模拟		4. 反向话音信道中的控制信令	197
蜂窝网	181	5. 有线数据信道的控制信令	197
5.1 概念	181	5.4 系统工作过程	198
5.1.1 发展简况	181	5.4.1 初始状态	198
5.1.2 系统结构	183	5.4.2 移动台被呼	198
5.1.3 主要功能	184	1. 寻呼	198
5.2 典型系统组成	184	2. 寻呼响应	198
5.2.1 移动电话交换局(MTSO)	184	3. 指配话音信道	198
5.2.2 基站(BS)	185	4. 振铃	198
1. 射频架	185	5.4.3 移动台主呼	199
2. 数据架	186	1. 呼前拨号	199
3. 线路监测架和维护测试架	187	2. 申请话音信道	199
5.2.3 移动台(MS)	187	3. 指配话音频道	199
1. 控制单元	187	4. 振铃	199
2. 逻辑单元	188	5.4.4 话终拆线	200
3. 收发信机	188	参考文献	201

第 1 章 码分多址技术基础

码分多址(CDMA; Code Division Multiple Access)是以扩频通信技术为基础的,要理解 CDMA 数字蜂窝移动通信,首先必须对扩频通信有一定的了解。此外,必须熟悉数字信号特征、调制方式,以及为了提高数字信号传输可靠性必须采用的纠错编码技术。

1.1 什么是扩展频谱通信

1.1.1 扩展频谱通信的基本概念

1. 扩频通信的含义

扩展频谱(SS: Spread Spectrum)通信简称扩频通信。扩频通信的定义简单表述如下:扩频通信技术是一种信息传输方式,在发端采用扩频码调制,使信号所占的频带宽度远大于所传信息必须的带宽,在收端采用相同的扩频码进行相关解调来解扩以恢复所传信息数据。这一定义其实包含了以下三方面意思:

首先,信号的频谱被展宽了。众所周知,传输任何信息都需要一定的频带,称为信息带宽或基带信号频带宽度。例如,人类语音的信息带宽为 $300\sim 3400\text{ Hz}$,电视图像信息带宽为 6.5 MHz 。在常规通信系统中,为了提高频率利用率,通常都是尽量采用大体相当的带宽的信号来传输信息,亦即在无线电通信中射频信号的带宽与所传信息的带宽是相比拟的,即一般属于同一个数量级。如用调幅(AM)信号来传送语言信息,其带宽为语言信息带宽的两倍,用单边带(SSB)信号来传输其信号带宽更小。即使是调频(FM)或脉冲编码调制(PCM)信号,其带宽也只是信息带宽的几倍。扩频通信的信号带宽与信息带宽之比则高达 $100\sim 1000$,属于宽带通信。为什么要用这么宽的频带的信号来传输信息呢?这样岂不太浪费宝贵的频率资源了吗?我们将在下面用信息论和抗干扰理论来回答这个问题。并且在后面分析 CDMA 蜂窝系统通信容量时将证明,CDMA 蜂窝系统的容量将是 GSM 系统的 4 倍,是模拟蜂窝系统的 20 倍。

其次,采用扩频码序列调制的方式来展宽信号频谱。由信号理论知道,在时间上是有限的信号,其频谱是无限的。脉冲信号宽度越窄,其频谱就越宽。作为工程估算,信号的频带宽度与其脉冲宽度近似成反比。例如, $1\text{ }\mu\text{s}$ 脉冲的带宽约为 1 MHz 。因此,如果很窄的脉冲序列被所传信息调制,则可产生很宽频带的信号。CDMA 蜂窝网移动通信系统就是采用这种方式获得扩频信号的,该方式称作直接序列扩频系统(简称直扩)。这种很窄的脉冲码序列(其码速率是很高的)称为扩频码序列。其它的扩频系统(如跳频系统),也都是采用

扩频码调制的方式来实现信号频谱扩展的。需要说明的是所采用的扩频码序列与所传的信息数据是无关的,也就是说它与一般的正弦载波信号是相类似的,丝毫不影响信息传输的透明性。扩频码序列仅仅起扩展信号频谱的作用。

第三,在接收端用相关解调(或相干解调)来解扩。正如在一般的窄带通信中,已调信号在接收端都要进行解调来恢复发端所传的信息。在扩频通信中接收端则用与发送端完全相同的扩频码序列与收到的扩频信号进行相关解扩,恢复所传信息。

这种在发端把窄带信息扩展成宽带信号,而在收端又将其解扩成窄带信息的处理过程,会带来一系列好处,我们将在后面做进一步说明。

2. 扩频通信的理论基础

长期以来,人们总是想方设法使信号所占频谱尽量窄,以充分提高十分宝贵的频率资源的利用率。为什么要用宽频带信号来传输窄带信息呢?简单的回答就是主要为了通信的安全可靠。这一点可以用信息论和抗干扰理论的基本观点加以说明。顺便指出,扩频通信技术可用来实现码分多址方式,并为数字化通信(包括数字化移动通信)增添一种新的多址方式。

山农(Shanon)在其信息论中得出带宽与信噪比互换的关系式,即人们称作的山农公式为

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

式中, C 为信道容量,单位为 b/s; B 为信号频带宽度,单位为 Hz; S 为信号平均功率,单位为 W; N 为噪声平均功率,单位为 W。

山农公式原意是说,在给定信号功率和白噪声功率 N 的情况下,只要采用某种编码系统,就能以任意小的差错概率,以接近于 C 的传输速率来传送信息。这个公式还暗示:在保持信息传输速率 C 不变的条件下,可以用不同频带宽度 B 和信噪功率比(简称信噪比)来传输信息。换言之,频带 B 和信噪比是可以互换的。也就是说,如果增加信号频带宽度,就可以在较低的信噪比的条件下以任意小的差错概率来传输信息。甚至在信号被噪声湮没的情况下,即 $S/N < 1$, 或 $10 \log_2 S/N < 0$ dB, 只要相应地增加信号带宽,也能进行可靠的通信。上述表明,采用扩频信号进行通信的优越性在于用扩展频谱的方法可以换取信噪比上的好处。

柯捷尔尼可夫(Котельников)在其潜在抗干扰性理论中得到如下关于信息传输差错概率的公式:

$$P_e \approx f\left(\frac{E}{n_0}\right) \quad (1-2)$$

上面公式指出,差错概率 P_e 是信号能量 E 与噪声功率谱密度 n_0 之比的函数。设信息持续时间为 T , 或数字信息的码元宽度为 T , 则信息带宽 B_m 为

$$B_m = \frac{1}{T} \quad (1-3)$$

信号功率 S 为

$$S = \frac{E}{T} \quad (1-4)$$

已调(或已扩频)信号的带宽为 B , 则噪声功率为

$$N = n_0 B \quad (1-5)$$

将式(1-3)~(1-5)代入式(1-2),可得

$$P_e \approx f\left(\frac{ST}{N} \cdot B\right) = f\left(\frac{S}{N} \cdot \frac{B}{B_m}\right) \quad (1-6)$$

上面公式指出,差错概率 P_e 是输入信号与噪声功率之比 S/N 和信号带宽与信息带宽之比 B/B_m 二者乘积的函数,信噪比与带宽是可以互换的。它同样指出了用增加带宽的方法可以换取信噪比上的好处这一客观规律。

综上所述,将信息带宽扩展 100 倍,甚至 1 000 倍以上的宽带信号来传输信息,就是为了提高通信的抗干扰能力,即在强干扰条件下保证可靠安全地通信。这就是扩频通信的基本思想和理论依据。

3. 处理增益和抗干扰容限

扩频通信系统由于在发端扩展了信号频谱,在收端解扩后恢复了所传信息,这一处理过程带来了信噪比上的好处,即接收机输出的信噪比相对于输入的信噪比大有改善,从而提高了系统的抗干扰能力。因此,可以用系统输出信噪比与输入信噪比二者之比来表征扩频系统的抗干扰能力。理论分析表明,各种扩频系统的抗干扰能力大体上都与扩频信号带宽 B 与信息带宽 B_m 之比成正比。工程上常以分贝(dB)表示,即

$$G_p = 10 \log \frac{B}{B_m} \quad (1-7)$$

G_p 称作扩频系统的处理增益。它表示了扩频系统信噪比改善的程度,因此 G_p 是扩频系统一个重要的性能指标。

仅仅知道了扩频系统的处理增益,还不能充分地说明系统在干扰环境下的工作性能。因为通信系统要正常工作,还需要保证输出端有一定的信噪比(如 CDMA 蜂窝移动通信系统为 7 dB),并需扣除系统内部信噪比的损耗,因此需引入抗干扰容限 M_j ,其定义如下:

$$M_j = G_p - [(S/N)_o + L_s] \quad (1-8)$$

式中, $(S/N)_o$ 为输出端的信噪比; L_s 为系统损耗。

例如,一个扩频系统的 G_p 为 30 dB, $(S/N)_o$ 为 10 dB, L_s 为 2 dB,则 M_j 为 18 dB。它表明干扰功率超过信号功率 18 dB 时,系统就不能正常工作;而在二者之差不大于 18 dB 时,系统仍能正常工作,即信号在一定的噪声(或干扰)湮没下也能正常通信。

1.1.2 扩频通信的主要特性

扩频通信在 20 世纪 80 年代已广泛应用于各种军事通信系统中,成为电子战中通信对抗的一种必不可少的十分重要的手段。除军事通信外,扩频通信技术也广泛应用于跟踪、导航、测距、雷达、遥控等各个领域。尤其是近十几年以来,移动通信、卫星通信等获得了飞速发展。利用扩频技术可以实现码分多址(CDMA),在数字蜂窝移动通信系统、卫星移动通信、室内无线通信和未来的个人通信中广泛采用扩频技术。扩频通信之所以得到应用和发展,成为现代通信发展的方向,就是因为它具有许多独特的性能。其主要特性如下:

1. 抗干扰能力强

扩频通信系统扩展的频谱越宽,处理增益越高,抗干扰能力就越强。在前述例子中,

处理增益为 30 dB, 其抗干扰容限为 18 dB。从理论上讲它可在信噪比为 -18 dB 时也能把信号从噪声湮没中提取出来。当然, 在接收端一般应采用相关器或匹配滤波器(如声表面波匹配滤波器)的方法来提取信号、抑制干扰。相关器的作用是: 当接收机本地解扩码与收到的信码相一致时, 即将扩频信号恢复为原来信息, 而其它任何不相关的干扰信号通过相关器其频谱被扩散, 从而落入到信息带宽的干扰强度被大大降低了, 当通过窄带滤波器(其频带宽度为信息带宽)时, 就抑制了滤波器的带外干扰。

对于单频及多频载波信号的干扰、其它伪随机调制信号的干扰, 以及脉冲正弦信号的干扰等, 扩频系统都有抑制干扰、提高输出信噪比的作用。特别是对抗敌方人为干扰方面, 效果很突出。简单举例来说, 如果信号频带展宽 1 000 倍(30 dB), 干扰方需要在更宽的频带上去进行干扰, 分散了干扰功率。在总功率不变的条件下, 其干扰强度只有原来的 $1/1\,000$ 。而要保持原有的干扰强度, 则必须使功率增加为原来的 1 000 倍, 这在实际情况下是难以实现的。

综上所述, 扩频通信系统抗干扰能力强是扩频通信系统的最突出的优点。

2. 隐蔽性好

由于扩频信号在很宽的频带上被扩展了, 单位频带内的功率就很小, 即信号的功率谱密度就很低。所以, 应用扩频码序列扩展频谱的直接序列扩频系统, 可在信道噪声和热噪声的背景下, 在很低的信号功率谱密度上进行通信。信号既然被湮没在噪声里, 敌方就很不容易发现有信号存在, 而想进一步检测出信号的参数就更困难了。因此, 扩频信号具有很低的被截获概率。这在军事通信上十分有用, 即可进行隐蔽通信。

此外, 值得指出的是, 由于扩频信号具有很低的功率谱密度, 它对目前广泛使用的各种窄带通信系统的干扰就很小。近年来, 在民用通信中, 各国都在研究和试验在原有窄带通信的频段内同时进行扩频通信, 这可大大提高频率的利用率。这是鉴于上述的扩频通信系统既有很强的抗干扰性能, 又以低功率谱密度发射信号, 对窄带通信系统的干扰很小之故。

3. 可以实现码分多址

扩频通信具有较强的抗干扰性能, 但付出了占用频带宽的代价。但是, 如果让许多用户共用这一宽频带, 则可大大提高频带的利用率。由于在扩频通信中存在扩频码序列的扩频调制, 充分利用正交或准正交的扩频码序列之间的相关特性(有关正交码、相关特性概念将在第 2 章做详细讨论), 在接收端利用相关检测技术进行解扩, 则在分配给不同用户以不同码型的情况下可以区分不同用户的信号, 提取出有用信号。这样一来, 在一宽频带上许多用户可以同时通信而互不造成严重干扰。它与利用频带分割的频分多址(FDMA)或时间分割的时分多址(TDMA)通信的概念类似, 即利用不同的码型进行分割, 所以称为码分多址(CDMA)。为了区别 FDMA、TDMA 和 CDMA 3 种多址方式, 图 1-1 示出了 3 种多址方式的示意图。这种码分多址方式, 虽然要占用较宽的频带, 但平均到每个用户占用的频带来计算, 其频带利用率是较高的。最近研究表明, 在 3 种蜂窝网移动通信系统, 即 FDMA 的 AMPS 系统、TDMA 的 GSM 系统和 CDMA 的蜂窝系统中, CDMA 系统的通信容量最大, 即为 FDMA 的 20 倍, 是 TDMA 的 4 倍。除此之外, 码分多址蜂窝网移动通信系统还具有软容量、软切换等一些独特的优点, 其详细情况将在后面介绍。

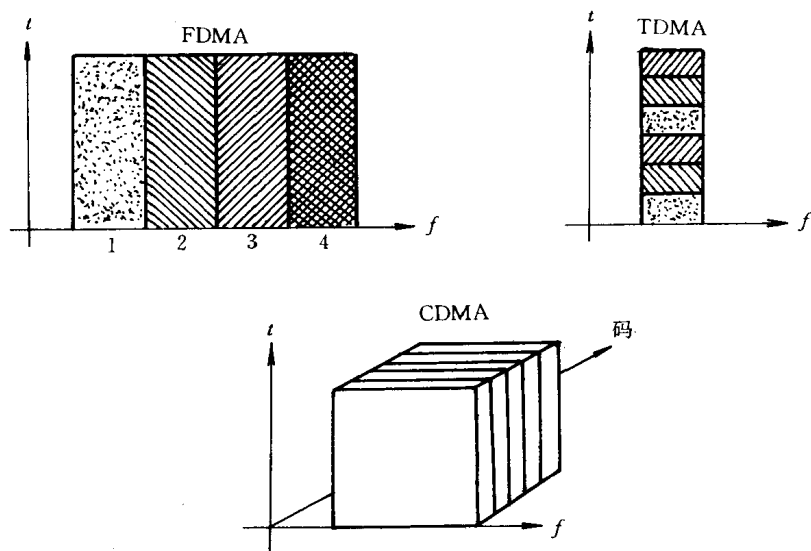


图 1-1 3 种多址方式示意图

4. 抗衰落、抗多径干扰

众所周知，移动信道属随参信道，信道条件最为恶劣。由于移动台不断移动，受地形地物的影响产生慢衰落现象。更为严重的是，由于多径效应产生快衰落现象，其衰落深度可达 30 dB。在频域上来看，多径效应会产生频率选择性衰落。扩频系统具有潜在的抗频率选择性衰落的能力。这是因为扩频通信系统所传送的信号频谱已扩展很宽，频谱密度很低，如在传输中小部分频谱衰落时，不会使信号造成严重的畸变。

在码分多址蜂窝系统中，还采取把多个路径来的同一码序的波形相加合成，从而能有效地克服多径效应，其原理也将在后面章节中介绍。

除此之外，扩频技术还能精确地定时和测距，例如，目前广泛应用的全球定位系统 (GPS) 就是利用扩频技术的特点来精确定位和定时的。限于篇幅，这里只讨论与 CDMA 蜂窝系统相关的问题。在下面讨论有关技术基础时，也本着这一指导思想，希望读者注意。

1.2 数据信息的扩频和调制

扩频通信广泛用于数字化通信，传送的数据信息都用二进制来表示，它可以代表离散取值的数字、文字及各种数据。扩频通信也可以代表连续的话音、图像等模拟信号，但发送端必须先经过模/数(A/D)变换，将模拟信号转换为数字信号，然后进行扩频和调制。接收端通过解扩、解调，最后经过数/模变换，恢复成模拟信号。

扩频通信系统的信道模型可用图 1-2 来表示。

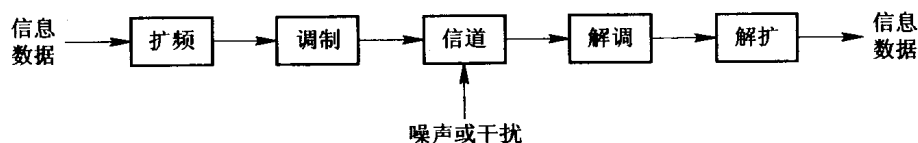


图 1-2 扩频通信系统的信道模型

在发送端，信息数据经过扩频、调制送入信道。在接收端通过解调、解扩恢复出数据信息。下面分别讨论数据信息(或数字信号)、扩频和调制等基本技术。

1.2.1 数字信号

1. 数字信号表示

数字信号采用二进制，其幅度取值分别用“1”或“0”(或“1”、“-1”)表示。例如，用“1”表示“有电流”，用“0”表示“无电流”。当然，也可以约定用“1”表示“无电流”，用“0”表示“有电流”。但如果大家各行其事，必将引起混乱。为此，国际电报电话咨询委员会(CCITT)做出了有关规定，如表 1-1 所示。

表 1-1 二进制表示法

场 合	主 动 状 态	被 动 状 态
二进制的值	1	0
名称	传号	空号
电流	有	无
电压	正	负
穿孔纸带	有孔	无孔
音频调幅	有音频	无音频
移频键控	较低频率	较高频率
移相键控	和基准相位相同	和基准相位相反
差分移相键控	不反相	反相

采用二进制表示数字信号的突出好处，是在电路实现时非常容易。这是因为表示两种状态的元件、器件很多，例如，继电器的吸合与释放，二极管导通与截止，三极管的饱和与截止，以及触发器、磁心等两种对立状态，它们都可以用来表示二进制的“0”和“1”。

在数字通信系统中，5 种常用的数字信号的码型如图 1-3 所示。

(1) 单极性码波形。单极性码波形的数字基带信号(或简称基带信号)，如图 1-3(a)所示。基带信号的 0 电平和正电平分别与二进制符号 0 和 1 相对应，图中 7 个二进制码元为 1010011。每个码元宽度为 T_b 。不难看出，单极性码波形在一个码元宽度时间内，不是有电压脉冲，就是无电压脉冲，亦即极性是单一的，只有正电压或“0”电压。各个相邻脉冲之间无间隔，电压的变化只发生在从 0 到 1 或从 1 到 0 的交变时刻。可以想到，如果是连续出现 1 或 0，电压就近似为直流，这会给信道传输带来一些困难，因此，在某些场合，可采用双极性码。

(2) 双极性码波形。双极性码波形就是二进制的 0、1 分别与正、负电平相对应的波形，如图 1-3(b)所示。由图可知，它的相邻脉冲之间也无间隔，但由于是双极性，即有正电平和负电平，且绝对值相等。当 0、1 码元等概率出现时，它将无直流成分。

(3) 单极性归零码波形。这种基带数字信号的特征，不像上述两种信号那样两相邻脉冲之间无间隔。它的脉冲宽度(τ_b)比码元宽度(T_b)窄，而前两种波形，脉冲宽度与码元宽

度是相等的,即均为 T_b 。由图 1-3(c)可见,每个有电脉冲(即信息数据为“1”)总是先要回到零电平,又因为它只有正电平,无负电平,所以称作单极性归零码波形。

(4) 双极性归零码波形。如图 1-3(d)所示,与单极性归零码波形所不同的是,它有正、负电平,数据信息“1”为正脉冲;数据信息“0”为负脉冲。不管是正脉冲或是负脉冲,均要回到零电平,因此,正、负脉冲之间必定留有零电平的间隔。显然,信息数据中 0、1 等概率出现时,它也无直流成分。

(5) 差分码波形。这是一种把数据信息符号 0 和 1 反映在相邻信号码元的相对极性变化上的波形。比如,相邻码元的极性改变表示符号 1,而以极性不改变表示符号 0,如图 1-3(e)所示。可见,这种波形在形式上与双极性(或单极性,图中为双极性)码波形相似,但它代表的数据信息符号与码元本身极性无直接关系,仅与相邻码元的极性变化有关。差分码波形也称相对码波形,而前面几种单极性或双极性波形称为绝对码波形。

2. 二进制编码

数字信号的符号 1 或 0 是电码的基本单元,故简称码元,由若干个码元组成一个码组,代表一个字符、数字、指令或英文字母,这种表示方法称为二进制编码。例如电传打字机,采用五单位电传码,即用 5 个二进制符号表示字母、数字或指令。因为 5 位二进制符号为 $2^5=32$ 种,如表 1-2 所示。

那么,各种消息是怎样转化成数字呢?我们以文字为例来说明。大家知道,常用汉字不超过 1 万个字,如果用阿拉伯数字对这些汉字进行编码,1 万个汉字可以用 0000 至 9999 这些数字来替代。而十进制数与二进制数存在着对应关系,最终可用二进制数来表示。例如汉字电报中“北京”两字,其十进制数码为“0554 0079”,转换成二进制码为

0000 0101 0101 0100 0000 0000 0111 1001

又如,“北京”的拼音字“BEIJING”,其五单位电传码是:

10011(B) 10000(E) 01100(I) 11010(J) 01100(I) 00110(N) 01011(G)

像上述的利用一定长度的二进制数字的不同组合,来表示数字、拼音字母、各种符号或指令,以及用一定长度的十进制数字的组合表示汉字的编码方法,在通信系统中,均属于信源编码。若需要代表更多字母、符号、指令或为了提高抗干扰能力进行纠错编码,可根据需要增加二进制数码的码位,例如采用六单位、七单位、八单位电码等。

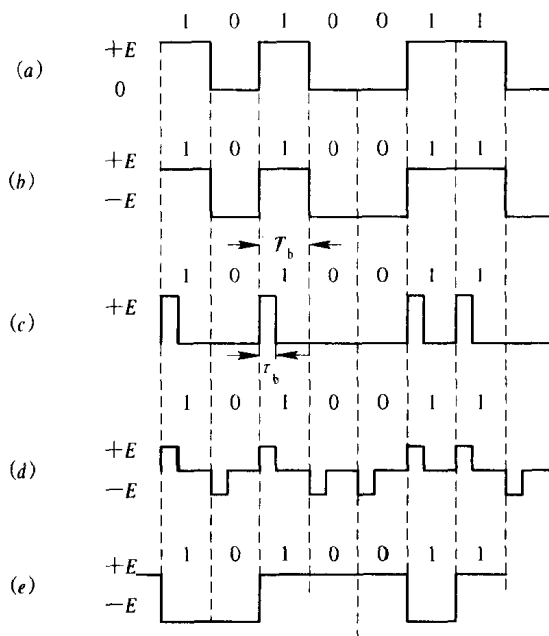


图 1-3 常用数字基带信号的码型

- (a) 单极性码波形; (b) 双极性码波形;
- (c) 单极性归零码波形; (d) 双极性归零码波形
- (e) 差分码波形

表 1-2 五单位电传码

指令、数字	字母	五单位码	指令、数字	字母	五单位码
—	A	11000	0	P	01101
?	B	10011	1	Q	11101
:	C	01110	4	R	01010
你是谁	D	10010	▼	S	10100
3	E	10000	5	T	00001
%	F	10110	7	U	11100
&	G	01011	=	V	01111
”	H	00101	2	W	11001
8	I	01100	/	X	10111
⌈	J	11010	6	Y	10101
(	K	11110	+	Z	10001
)	L	01001	回行		00010
.	M	00111	字母键		11111
,	N	00110	数字键		11011
9	O	00011	间隔		00100

3. 数字信号传输质量指标

数字通信系统(包括扩频系统或码分多址系统), 衡量数字信号传输质量的主要性能指标是传输速率和差错率, 下面分别予以说明。

(1) 传输速率。传输速率是用来衡量数字通信系统有效性的一项重要指标, 通常有两种表示方法。

第一种表示方法为码元速率 R_B , 指单位时间(即 1 s)内传输数字信号波形的数目(即码元的个数), 单位是波特(Baud)。如果每秒传输一个码元就称为 1 波特, 其码元宽度为 1 s。实际通信系统中, 码元宽度都比 1 s 小得多, 如码元宽度为 20 ms, 则每秒钟可传送 50 个码元(注意: 码元不仅包括 1, 也包括 0), 此时码元速率为 50 波特。

第二种表示方法为信息速率 R_b , 即每秒钟传送的信息量, 其单位是比特/秒(b/s)。

比特是信息量的单位。在二进制里, 规定数字序列中的每一码元(1 或 0)含有 1 比特的信息量。在四进制里每个四进制码元需要用两个二进制码元来表达, 如表 1-3 所示。

表 1-3 四进制与二进制码元对应关系

四进制码元	二进制码元
0	00
1	01
2	10
3	11

由表 1-3 可知, 四进制中, 每个码元(0, 1, 2, 3)含有 2 比特的信息量。推广而言, 在 N 进制中, 每个码元含有的信息量为

$$R_b = R_B \log_2 N \quad (1-9)$$

上式为比特/秒与波特在数量上的关系式。在二进制情况下, $N=2$, $\log_2 2=1$, 因此有 $R_b = R_B$, 即码元速率与信息速率是相等的(指数值上)。在 N 进制情况下, 每个码元所含有的信息量是 $\log_2 N$ 比特, 如四进制中, 每个码元含有 2 比特信息量, 八进制中, 每个码元含有 3 比特信息量。

(2) 差错率。差错率是衡量数字信号传输可靠程度的一项重要指标, 它有多种表示方法。

① 误码率 P_e : 指错误接收消息的码元数在传输消息总码元数中所占的比例, 即

$$P_e = \frac{\text{消息中错误的码元数}}{\text{传输消息的总码元数}} \quad (1-10)$$

② 误比特率 P_b : 指错误接收消息的比特数在传输消息的总比特数中所占的比例, 即

$$P_b = \frac{\text{消息中错误比特数}}{\text{传输消息的总比特数}} \quad (1-11)$$

在二进制情况下, $P_e = P_b$, 因此常用 P_e 来表示。如 $P_e = 10^{-3}$, 即指平均每传 1 000 比特的信息时, 错误为 1 比特。

③ 误汉字率: 指发生错误的汉字在所传输的总汉字数中所占的比例。在电报通信中通常是用 4 个数字代表一个汉字, 这 4 个数字称为一组, 所以错汉字率也称错组率。

除了上述 3 种之外, 还有误句率、误帧率等, 其含义与上述 3 种类似。

数字信号传输质量指标是有效性和可靠性。这里所说的数字信号是基带数据符号, 后面要讨论的是经过调制的数字信号, 即已调数字信号, 但也简称数字信号, 其含义是不一样的。

数字信号传输的基本要求是希望传输速率高而误码率低, 但两者往往是矛盾的, 如提高速率, 会使误码率升高; 利用纠错码降低误码率, 又会使信息传输速率下降。

1.2.2 数字信号调制

数字信号对载频调制即为数字调制。为了在高频率信道中传输, 基带数字信号必须进行调制, 它和模拟调制相似, 可以对射频的幅度、频率和相位 3 个参数进行调制。由于基带信号是数字信号, 所以相应的有 3 种基本调制方式, 即振幅键控(ASK)、移频键控(FSK)和移相键控(PSK), 其它各种数字信号调制方式, 如相对移相(DPSK)、正交移相(QPSK)和交叉正交移相(OQPSK)等都是 PSK 的改型。而高斯型最小频移键控(GMSK)是 FSK 改型。下面先讨论 3 种基本调制方式, 进而研究 CDMA 蜂窝移动通信系统中使用的 QPSK 和 OQPSK 调制方式。

1. ASK 信号

通常, 一个正弦波可用下式表示:

$$S(t) = A(t) \sin[\omega(t) + \varphi(t)] \quad (1-12)$$

式中, 变量 t 代表时间, A 是正弦波的振幅, ω 是角频率, φ 是相位。所谓调制, 就是用基带数据, 改变正弦波 3 个参量(A 、 ω 、 φ)之一, 变成已调数字信号。