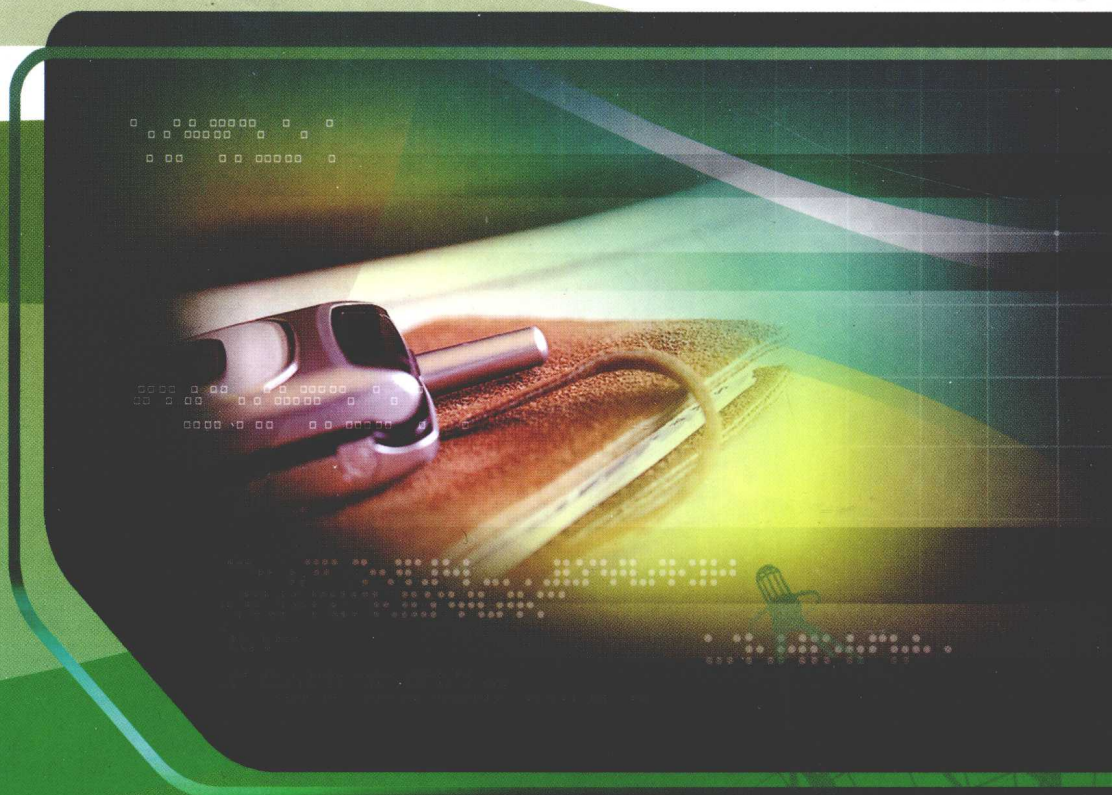




高等学校信息与通信工程“十一五”规划教材

CDMA移动通信技术

主编/张晓林 国 强 窦 峥



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

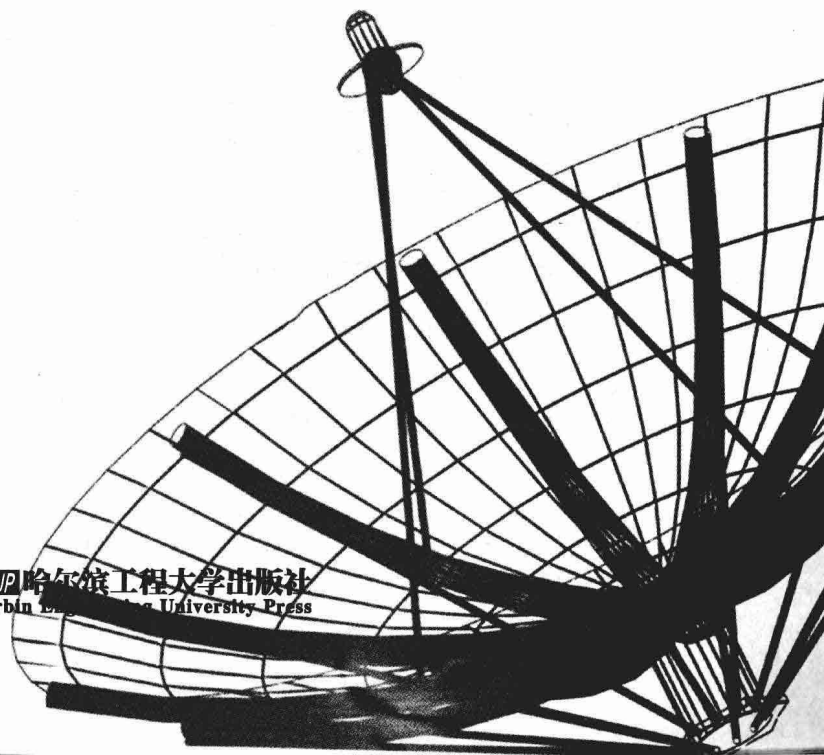


高等学校信息与通信工程“十一五”规划教材

CDMA移动通信技术

主 编/张晓林 国 强 奚 峥

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press



内 容 简 介

本书较系统地、全面地介绍了 CDMA 移动通信技术。全书共分 8 章,第 1 章~第 3 章主要介绍伪随机码和扩频通信的基本原理,这是理解 CDMA 移动通信系统物理层通信体制的基础。第 4 章介绍了第二代 CDMA 移动通信系统 IS-95 的标准、信道结构和关键技术。第 5 章~第 7 章主要介绍了第三代 CDMA 移动通信系统,包括 cdma2000、WCDMA 和 TD-SCDMA。

本书可作为信息与通信及相关专业高年级学生教材,也可作为从事 CDMA 移动通信领域的专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

CDMA 移动通信技术/张晓林主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010.7
ISBN 978-7-81133-839-3

I. ①C… II. ①张… III. ①码分多址-移动通信
IV. ①TN929.533

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 133523 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 13.5
字 数 323 千字
版 次 2010 年 8 月第 1 版
印 次 2010 年 8 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前言

近 20 年来,移动通信技术发展十分迅速,目前已经成为通信技术中发展最快的领域之一,同时也是 21 世纪对社会生活有深远影响的科技领域之一。尤其在我国,近年来移动通信技术得到了飞速发展,移动用户在迅猛增长。2010 年,3G 移动通信业务已经迅速展开,包括我国自主研发的 TD-SCDMA 标准在内的第三代移动通信系统将成为高校相关专业学生和相应领域科技人员熟悉并掌握的通信技术。

本书以 CDMA 为主线,从通信体制和应用系统两方面对 CDMA 移动通信系统作了系统地介绍。

第 2 章和第 3 章主要介绍 CDMA 系统的通信体制基础——扩频通信的基本原理。第 2 章全面介绍了 CDMA 系统中应用的伪随机码,包括 m 序列、M 序列、Gold 序列、Walsh 序列等。从伪随机码的产生原理到主要特性作了详细分析。第 3 章介绍了直扩通信和跳频通信的基本原理,包括系统组成和同步技术。

第 4 章介绍了第二代 CDMA 移动通信系统,即 IS-95。主要内容包括 IS-95 的主要参数和网络结构,IS-95 的逻辑信道结构及其关键技术。IS-95 的关键技术主要介绍了自动功率控制技术、分集技术和切换技术。

第 5 章~第 7 章主要介绍了第三代 CDMA 移动通信系统。第 5 章介绍了 cdma2000 的基本原理,包括网络结构、前向链路物理信道、反向链路物理信道、功率控制与系统切换等内容。第 6 章介绍了 WCDMA 系统的基本原理,包括系统结构、物理层基本原理,以及功率控制和切换。第 7 章介绍了 TD-SCDMA 系统,包括物理层技术,以及智能天线、联合检测、接力切换等关键技术。

第 8 章对下一代移动通信技术作了展望。

本书第 3 章和第 4 章由国强编写;第 2 章和第 5 章由窦峥编写;第 1 章,第 6 章~第 8 章由张晓林编写,并负责全书统稿。

本书在编写过程使用了公开发表的行业标准、出版著作和网上资料的有关内容和数据,在此对他们表示崇高的敬意和由衷的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些不妥和错误,恳请读者谅解和指正。

编 者

2010 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 移动通信发展概述	1
1.2 CDMA 技术	3
1.3 移动通信的发展趋势	6
第 2 章 伪随机码	7
2.1 伪随机码的概念	7
2.2 m 序列	8
2.3 M 序列	19
2.4 Gold 序列	22
2.5 Walsh 函数	23
第 3 章 扩频通信	28
3.1 扩频通信概论	28
3.2 直接序列扩频系统	33
3.3 跳频通信系统	46
第 4 章 IS-95 CDMA 移动通信系统及其关键技术	60
4.1 IS-95 标准简介	60
4.2 IS-95 CDMA 系统的逻辑信道	67
4.3 自动功率控制技术	86
4.4 分集技术	94
4.5 切换技术	97
第 5 章 cdma2000 系统	101
5.1 概述	101
5.2 前向链路物理信道	107
5.3 反向链路物理信道	128
5.4 功率控制与系统切换	136
第 6 章 WCDMA 系统	140
6.1 概述	140
6.2 WCDMA 系统结构及其协议分层	142
6.3 物理层	151
6.4 功率控制	171
第 7 章 TD-SCDMA 系统	175
7.1 概述	175

7.2	TD - SCDMA 系统的物理层	177
7.3	智能天线技术	185
7.4	联合检测	189
7.5	接力切换	193
第 8 章	第四代移动通信技术	200
8.1	第四代移动通信及其特点	200
8.2	第四代移动通信系统的网络结构	201
8.3	第四代移动通信系统的特征	202
8.4	第四代移动通信发展状况	205
参考文献		207



第1章 绪论

移动通信(Mobile Communication)是移动体之间的通信,或是移动体与固定体之间的通信。移动体可以是人,也可以是汽车、火车、轮船等在移动状态中的物体。

1.1 移动通信发展概述

移动通信出现于20世纪初,但真正发展却开始于20世纪40年代中期。从那时起,移动通信的发展大体可分成三代,即模拟移动通信系统、数字移动通信系统和未来移动通信系统。下面将分别加以介绍。

1.1.1 模拟移动通信系统(1G)

从1946年美国使用150 MHz单工汽车无线电话开始到20世纪90年代初,主要发展了第一代移动通信系统。这种移动通信系统发送的信号都是模拟的,所以被称为模拟移动通信系统。它的发展可分为以下三个主要阶段。

1. 初级阶段

1946年至20世纪60年代中期,开始出现公用移动通信业务。1946年在美国圣路易斯城建立了世界上第一个公用汽车电话系统。随后,原联邦德国(1950年)、法国(1956年)、英国(1959年)等国家相继研制了类似的公用汽车电话系统,这个阶段的移动通信系统大多工作在150 MHz和450 MHz频段上,一些东欧国家的移动通信系统工作在330 MHz频段上,信道间隔为50~1 000 kHz。

这一阶段移动通信系统的主要技术特点:采用大区制;用人工方式进行电话接续;用户少,系统容量小,频谱利用率低;设备中采用的是电子管,体积大、耗电多。

2. 中级阶段

20世纪60年代中期至20世纪70年代中期。在1964年,美国研制出改进型移动电话系统(IMTS),该通信系统工作于150 MHz频段上,属于中等容量的通信系统。在1969年又将IMTS的工作频段扩展到450 MHz。同期,还有原联邦德国推出的MATS-B2系统,法国推出的PARIS-1系统等。由于频率合成器的出现,移动通信系统的信道频率间隔由50~1 000 kHz缩小至25~30 kHz,信道数量大大增加,众多用户可以共用无线信道,频谱利用率得到较大提高。

这一阶段移动通信系统的主要技术特点:仍采用大区制;能自动选取频道并接续到公用电话网,实现了用户的全自动拨号;由于晶体管代替了原来的电子管,使移动台小型化;工作频段向高频段发展,涌现出了大量专用移动通信系统,如公安、消防、出租汽车、新闻、调度等移动通信系统,用户容量增加到中等容量。



3. 大规模发展阶段

20 世纪 70 年代中期至 20 世纪 80 年代末期。在这个阶段,移动通信开始蓬勃发展。蜂窝移动通信系统成为实用系统。蜂窝移动通信系统的实现依赖于多方面的技术进步:首先,微电子技术的进步使移动通信设备小型化成为可能;其次,提出小区制建网模式,实现了频率复用,大大提高了频谱利用率和系统容量。此外,微处理器技术和计算机技术的迅速发展,为大型通信系统的管理和控制提供了可靠的技术手段。

在 1978 年底,美国贝尔实验室研制成功了先进移动电话系统(AMPS),建成了蜂窝移动通信网,1983 年 AMPS 被投入使用。其他发达国家也相继开发出各自的蜂窝移动通信系统,如日本于 1979 年推出 800 MHz 大容量汽车电话系统,北欧四国于 1980 年开发出 450 MHz 频段移动电话系统(NMT-450),原联邦德国于 1984 年完成 450 MHz 频段移动电话系统(C 系统),英国于 1985 年开发出 900 MHz 频段全向接入通信系统(TACS)等。

这一阶段移动通信系统的主要技术特点:出现了蜂窝状(正六边形)小区,解决了频率复用问题,提高了频谱利用率,使陆地公用移动通信系统得到飞速发展;用户容量得到了很大提高,一个系统的用户数可达几十万;频段从 450 MHz 发展到 900 MHz,并向更高频段发展,频道间隔越来越小,使信道数量进一步增加;采取集中控制交换,按需分配,提高了信道利用率;语音质量接近市话标准;大规模集成电路的应用,使移动台的体积和质量大大减少,功率也降低许多。

总之,移动通信发展到这个阶段,技术上已很成熟。由于大规模集成电路及微处理器的大量应用,模拟移动通信系统呈现出应用范围形式丰富的多样化局面。以 AMPS 和 TACS 为代表的移动通信系统是模拟移动通信系统。模拟移动通信系统虽然获得了很大成功,但也暴露出许多不足,如系统容量不能满足日益增长的用户需求、频谱利用率低、业务种类受限制、安全保密性能差及设备价格高等,解决这些问题的根本办法是采用新一代数字蜂窝移动通信系统。

1.1.2 数字移动通信系统(2G)

早在 20 世纪 70 年代末,一些发达国家就已开始研制数字移动通信系统。从 20 世纪 80 年代中期开始,数字移动通信得到了发展和应用。数字移动通信系统由于采用了多种数字技术,使得系统具有频谱利用率高、系统容量大、可提供多种形式的服务、与 ISDN 兼容性强等优点。

1982 年欧洲成立了移动通信特别小组 GSM(Group Special Mobile)研制第二代蜂窝系统;1989 年对其研制的 GSM 系统进行认证实验;1990 年 GSM 更名为全球移动通信系统(Global System for Mobile Communication)并开始试运行;1991 年正式使用。美国于 1987 年着手研究数字系统方案,1992 年北美先进的数字移动通信系统 D-AMPS 被投入使用。在 1993 年,日本的个人数字蜂窝通信系统 PDC 被投入使用。上述三种系统都采用时分多址(TDMA)技术。同期,一些国家也开始研制码分多址(CDMA)的数字移动通信系统。采用码分多址(CDMA)的数字移动通信系统具有更大的容量。在 20 世纪 90 年代中期,窄带和宽带 CDMA 数字蜂窝系统都已开发成功。此外,在 20 世纪 90 年代末期,卫星移动通信系统也被投入使用。

由于数字移动通信系统具有容量大、保密性强、移动台体积小、能提供国际漫游等特点,世界各国都给予了足够的重视和资金投入。



1.1.3 未来移动通信系统(3G)

1986年国际无线电咨询委员会(CCIR)成立了一个预测未来公用陆地移动电话系统的专门组织(FPLMTS),提出了对未来移动通信发展的具体设想。从1995年到2000年之间开始,伴随着对第三代移动通信的大量谈论,以及2.5G产品GPRS系统的过渡,3G走上了通信舞台的前沿。3G系统与现有的2G系统有根本的不同,3G系统采用CDMA技术和分组交换技术,而2G系统通常采用的是TDMA技术和电路交换技术。与前两代系统相比,3G系统的主要特征是可提供丰富多彩的移动多媒体业务,其设计目标是提供比第二代系统更大的系统容量、更好的通信质量,而且要能在全球范围内更好地实现无缝漫游及为用户提供包括语音、数据及多媒体等在内的多种业务。为了提供这种服务,无线网络必须能够支持不同的数据传输速度,也就是说,在室内、室外和行车的环境中能够分别支持至少2 Mb/s、384 kb/s以及144 kb/s的传输速度。同时,3G系统也要考虑与现有的2G、2.5G系统的良好兼容性。

目前,国际电联接受的3G无线接口标准主要有以下三种:WCDMA、cdma2000与TD-SCDMA。CDMA是Code-Division Multiple Access(码分多址)的缩写,是第三代移动通信系统的技术基础。CDMA系统以其频率规划简单、系统容量大、频率复用系数高、抗多径能力强、通信质量好、软容量、软切换等特点显示出巨大的发展潜力。

1.2 CDMA 技术

1.2.1 移动通信系统的多址方式

在无线通信环境的电波覆盖区内,如何建立用户之间的无线信道的连接,是多址接入方式的问题。因为无线通信具有大面积无线电波覆盖和广播信道的特点,网内一个用户发射的信号其他用户均可接收,所以网内用户如何能从播发的信号中识别出发送给本用户地址的信号就成为建立连接的首要问题。

多址接入方式的数学基础是信号的正交分割原理。无线电信号可以表达为时间、频率和码型的函数,即可写作

$$s(c, f, t) = c(t)s(f, t)$$

其中, $c(t)$ 是码型函数, $s(f, t)$ 为时间和频率的函数。

以传输信号的载波频率的不同划分来建立的多址接入方式,被称为频分多址方式(FDMA);以传输信号存在的时间不同划分来建立的多址接入方式,被称为时分多址方式(TDMA);以传输信号码型的不同划分来建立的多址接入方式,被称为码分多址方式(CDMA)。图1.1分别给出了FDMA,TDMA和CDMA的示意图。

1.2.2 CDMA 多址技术的优点

CDMA多址技术的原理是基于扩频技术,即将需要传送的具有一定带宽的信息数据,用一个带宽远大于信息带宽的高速伪随机码进行调制,再经载波调制发送出去。接收端使用完全相同的伪随机码与接收的宽带信号作相关处理,即解扩,以实现信息通信。

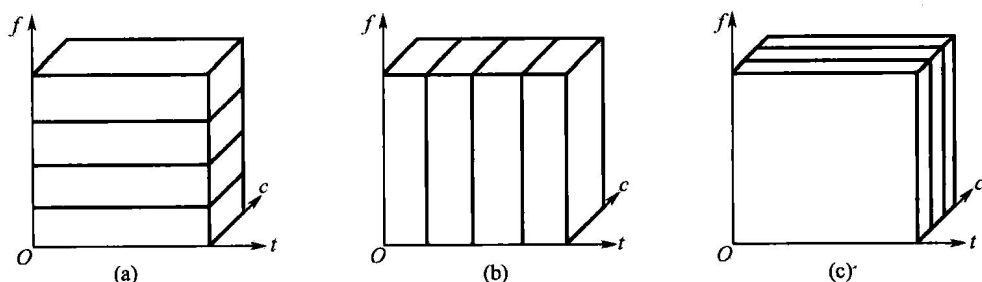


图 1.1 FDMA, TDMA, CDMA 的示意图

(a)FDMA; (b)TDMA; (c)CDMA

与 FDMA 和 TDMA 相比,CDMA 具有许多独特的优点,其中一部分是扩频通信系统所固有的,另一部分则是由软切换和功率控制等技术所带来的。CDMA 移动通信网是由扩频、多址接入、蜂窝组网和频率再用等几种技术结合而成,含有频域、时域和码域三维信号处理的一种协作,因此它具有抗干扰性好,抗多径衰落,保密安全性高,同频率可在多个小区内重复使用,所要求的载干比(C/I)较小,容量和质量之间可作权衡取舍等属性。这些属性使 CDMA 比其他系统具有以下几点非常重要的优势。

(1)系统容量大。理论上 CDMA 移动网比模拟网大 20 倍。

(2)系统容量的灵活配置。在 CDMA 系统中,用户数的增加相当于背景噪声的增加,造成话音质量的下降。但对用户数并无限制,操作者可在容量和话音质量之间折中考虑。另外,多小区之间可根据话务量和干扰情况自动均衡。

(3)系统性能质量更佳。这里指的是 CDMA 系统具有较高的话音质量,声码器可以动态地调整数据传输速率,并可根据适当的门限值选择不同的电平级发射。同时,门限值根据背景噪声的改变而改变,这样即使在背景噪声较大的情况下,也可以得到较好的通话质量。另外,CDMA 系统“掉话”的现象明显减少,CDMA 系统采用软切换技术,即“先连接再断开”,这样完全克服了硬切换容易掉话的缺点。

(4)频率规划简单。用户按不同的序列码区分,所以不相同的 CDMA 载波可在相邻的小区内使用,网络规划灵活,扩展简单。

(5)延长手机电池寿命。采用功率控制和可变速率声码器,手机电池使用寿命延长。

(6)建网成本下降。

1.2.3 CDMA 多址技术的发展过程

CDMA 技术的出现源于人类对更高质量无线通信的需求。第二次世界大战期间因战争的需要而研究开发出 CDMA 技术,其思想初衷是防止敌方对己方通信的干扰,在战争期间 CDMA 技术被广泛应用于军事抗干扰通信中,后来由美国高通公司更新成为商用蜂窝电信技术。1995 年,第一个 CDMA 商用系统(被称为 IS-95)运行之后,CDMA 技术理论上的诸多优势在实践中得到了检验,从而在北美、南美和亚洲等地得到了迅速推广和应用。

CDMA 技术的标准化经历了几个阶段。IS-95 是 CDMA ONE 系列标准中最先发布的标准,真正在全球得到广泛应用的第一个 CDMA 标准是 IS-95A,这一标准支持 8K 编码话音



服务。其后又分别出版了 13K 话音编码器的 TSB74 标准,支持 1.9 GHz 的 CDMA PCS 系统的 STD-008 标准,其中 13K 编码话音服务质量已非常接近有线电话的话音质量。随着移动通信对数据业务需求的增加,1998 年 2 月,美国高通公司宣布将 IS-95B 标准用于 CDMA 基础平台上。IS-95B 可提供 CDMA 系统性能,并增加用户移动通信设备的数据流量,提供对 64 kb/s 数据业务的支持。

CDMA 是移动通信技术的发展方向。在 2G 阶段,CDMA 增强型 IS-95A 与 GSM 在技术体制上属于同一时代产品,提供大致相同的业务。但 CDMA 技术有其独到之处,在通话质量好、掉话少、低辐射、健康环保等方面具有显著特色。在 2.5G 阶段,CDMA2000 1X RTT 与 GPRS 在技术上已有明显不同,在传输速率上 CDMA2000 1X RTT 高于 GPRS,在新业务承载上 CDMA2000 1X RTT 比 GPRS 成熟,可提供更多的中高速率的新业务。

而在第三代移动通信标准中,CDMA 技术更是因为其在性能上诸多优势而获得了重视。早在 1985 年国际电信联盟就提出了第三代移动通信(3G)的概念,同时建立了专门的组织机构 TG8/1 对 3G 进行研究,当时 3G 被称为未来陆地移动通信系统(FPLMTS)。这时第二代移动通信 GSM 的技术还没有成熟,CDMA 技术尚未出现。ITU 于 1997 年制定了 M.1225 建议,对 IMT-2000 无线传输技术提出了最低要求,并面向世界范围征求 RTT 建议。

ITU 要求 IMT-2000 RTT 必须满足以下三种环境的要求:

- (1)快速移动环境,最高速率达 144 kb/s;
- (2)室外到室内或步行环境,最高速率达 384 kb/s;
- (3)室内环境,最高速率达 2 Mb/s。

为了能够在未来的全球化标准的竞赛中处于领先地位,各个国家、地区、标准化组织及公司纷纷提出了自己的技术标准。在所有提案中以欧洲的 W-CDMA 技术和美国的 CDMA2000 技术最为看好,同时,中国的 TD-SCDMA 技术由于其本身的技术先进性得到了中国政府、运营商和产业界的支持,也很受瞩目。通过一年半时间的评估和融合,1999 年 11 月 5 日 ITU 在赫尔辛基举行的 TG 8/1 第 18 次会议上,通过了输出文件 ITU-R M.1457,确认了如下五种第三代移动通信 RTT 技术。

两种 TDMA 技术:

- (1)SC-TDMA(UMC-136);
- (2)MC-TDMA(EP-DECT)。

三种 CDMA 技术:

- (1)MC-CDMA(CDMA2000 MC);
- (2)DS-CDMA(包括 UTRA/WCDMA 和 CDMA2000/DS);
- (3)TDD CDMA(包括 TD-SCDMA 和 UTRA TDD)。

其中主流技术是上述三种 CDMA 技术。ITU-R M.1457 的通过标志着第三代移动通信标准的基本定型。我国提出的 TD-SCDMA(Time Division Duplex-Synchronous Code Division Multiple Access)建议标准与欧洲、日本提出的 W-CDMA 和美国提出的 cdma2000 标准一起被列入该建议,成为世界三大主流标准之一。



1.3 移动通信的发展趋势

目前,第三代移动通信(3G)的各种标准和规范已达成协议,并且正处于商用化的前夕,它将解决目前存在的频率短缺问题,能够提供语音、数据、视频等多媒体业务,能真正实现全球漫游。但 3G 系统还有很多需要改进的地方,如 3G 缺乏全球统一标准;3G 所采用的语音交换架构仍沿袭了第二代 2G 的电路交换,而不是纯 IP 方式,流媒体(视频)的应用不尽如人意;数据传输速率也只接近于普通拨号接入的水平,更赶不上 XDSL 等。

当第三代移动通信系统方兴未艾之时,对于第四代(4G)或者超三代(Beyond 3G)移动通信技术的讨论已如火如荼地展开,国际上通信技术发达的国家已着手研制 4G 的标准和产品。4G 的概念可称为广带接入(Broadband)和分布网络,并可在任何地方宽带接入互联网(包括卫星通信和平流层通信),提供信息通信以外的定位定时、数据采集和远程控制等综合功能,比第三代移动通信更接近于个人通信。4G 的主要特点包括以下几方面。

(1)更高的通信速率。对于大范围高速移动用户(250 km/h)数据速率为 2 Mb/s;对于中速移动用户(60 km/h)数据速率为 20 Mb/s;对于低速移动用户(室内或步行者)数据速率为 100 Mb/s。

(2)更宽的网络频谱。4G 网络在通信带宽上比 3G 网络的带宽高出许多。据研究,每个 4G 信道将占有约 100 MHz 的频谱,相当于 WCDMA 3G 网络的 20 倍。

(3)灵活性较强。4G 系统拟采用智能技术使其能自适应地进行资源分配,能够调整系统对通信过程中变化的业务流大小,并对其进行相应处理而满足通信要求。采用智能信号处理技术,对信道条件不同的各种复杂环境都能进行信号的正常发送与接收,有很强的智能性、适应性和灵活性。

(4)业务的多样性。在未来的全球通信中,个人通信、信息系统、广播和娱乐等各种业务将会被结合成一个整体。提供给用户比以往更广泛的服务与应用;系统的使用会更加安全、方便且更加照顾用户的个性化。

(5)高度自组织、自适应的网络。4G 系统的网络将是一个完全自治、自适应的网络。它可以自动管理、动态改变自己的结构,以满足系统变化和发展的要求。

在 4G 之后,个人通信系统将成为未来移动通信系统的大趋势。个人通信系统的概念在 20 世纪 80 年代后期就已出现。当时便引起了世界范围内的巨大兴趣。个人通信系统是一个要求任何人能在任何时间、任何地点与任何人进行各种通信的通信系统。这里指的个人通信是既能提供终端移动性,又能提供个人移动性的通信方式。终端移动性指用户携带终端连续移动时也能进行通信,个人移动性指用户能在网中任何地理位置上根据他的通信要求选择或配置任意一个移动的或固定的终端进行通信。可见个人通信的实现将使人类彻底摆脱现有通信网的束缚,达到无约束自由通信的最高境界。总之,当今世界电信的发展体现出四大趋势,即无线、多媒体、宽带和 IP(因特网电话)。最终,上述技术将会融合在一起,形成宽带多媒体移动电话系统,与固定通信网综合成全球一网,实现人类通信的最高境界——个人通信。



第2章 伪随机码

2.1 伪随机码的概念

2.1.1 序列的相关特性

在扩频系统中,对伪随机序列而言,最关心的问题就是其相关特性,包括自相关特性、互相关特性及部分相关特性。下面分别给出这些相关函数的定义。

1. 自相关函数和自相关系数

设有两条长为 N 的序列 $\{a\}$ 和 $\{b\}$, 序列中的元素分别为 a_i 和 b_i , $i = 0, 1, 2, 3, 4, \dots, N-1$, 则序列的自相关函数 $R_a(j)$ 被定义为

$$R_a(j) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i a_{i+j} \quad (2.1)$$

由于 $\{a\}$ 为周期性序列, N 为周期, 故有 $a_{N+i} = a_i$ 。

自相关系数 $\rho_a(j)$ 被定义为

$$\rho_a(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a_i a_{i+j} \quad (2.2)$$

2. 互相关函数和互相关系数

序列 $\{a\}$ 和序列 $\{b\}$ 的互相关函数 $R_{ab}(j)$ 被定义为

$$R_{ab}(j) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i b_{i+j} \quad (2.3)$$

序列 $\{a\}$ 和序列 $\{b\}$ 的互相关系数 $\rho_{ab}(j)$ 被定义为

$$\rho_{ab}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a_i b_{i+j} \quad (2.4)$$

对于二进制序列, $\rho_{ab}(j)$ 可以表示为

$$\rho_{ab}(j) = \frac{A - D}{N} \quad (2.5)$$

式中: A 为 $\{a\}$ 和 $\{b\}$ 对应码元相同时的数目; D 为 $\{a\}$ 和 $\{b\}$ 对应码元不相同时的数目。若 $\rho_{ab}(j) = 0$, 则定义序列 $\{a\}$ 和序列 $\{b\}$ 正交。

3. 部分相关函数和部分相关系数

定义 $\{a\}$ 的部分相关函数 $R_{aP}(j)$ 和部分相关系数 $\rho_{aP}(j)$ 分别为

$$R_{aP}(j) = \sum_{i=t}^{P+t-1} a_i a_{i+j}, \quad P \leq N \quad (2.6)$$

$$\rho_{aP}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=t}^{P+t-1} a_i a_{i+j}, \quad P \leq N \quad (2.7)$$

式中 t 为某一常数。

定义序列 $\{a\}$ 和序列 $\{b\}$ 的部分相关函数 $R_{abP}(j)$ 和部分相关系数 $\rho_{abP}(j)$ 分别为

$$R_{abP}(j) = \sum_{i=t}^{P+t-1} a_i b_{i+j}, \quad P \leq N \quad (2.8)$$

$$\rho_{abP}(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=t}^{P+t-1} a_i b_{i+j}, \quad P \leq N \quad (2.9)$$

2.1.2 伪随机码的定义

白噪声是一种随机过程,瞬时值服从正态分布,有极好的相关特性。伪随机序列是针对白噪声演化出来的,采用的编码结构,只有“0”和“1”两种电平。因此,伪噪声编码概率分布不具备正态分布形式。但当码足够长时,由中心极限定理可知,它趋近于正态分布。

1. 狭义伪随机码

凡自相关系数具有

$$\rho_a(j) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a_i^2 = 1, & j = 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a_i a_{i+j} = -\frac{1}{N}, & j \neq 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

形式的码,被称为狭义伪随机码。

2. 第一类广义伪随机码

凡自相关系数具有

$$\rho_a(j) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a_i^2 = 1, & j = 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a_i a_{i+j} = c < 1, & j \neq 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

形式的码,被称为第一类广义伪随机码。

3. 第二类广义伪随机码

凡互相关系数具有

$$\rho_{ab}(j) \approx 0 \quad (2.12)$$

形式的码,被称为第二类广义伪随机码。

4. 伪随机码

凡相关函数满足上述 1, 2, 3 三者之一的码被统称为伪随机码。

2.2 m 序列

二进制的 m 序列是一种重要的伪随机序列,有着优良的自相关特性,有时被称为伪噪声(PN)序列。“伪”的意思是说这种码是周期性的序列,易于产生和复制,但其随机性接近于噪声或随机序列。 m 序列在扩展频谱及码分多址技术中有着广泛的应用,并且在 m 序列



基础上还能构成其他的码序列,因此无论对 m 序列直接应用还是对掌握伪随机序列基本理论而言,必须熟悉 m 序列产生的原因及其主要特性。

2.2.1 反馈移位寄存器

m 序列是最长线性移位寄存器序列,是由移位寄存器加反馈后形成的。其结构如图 2.1 所示。图中 a_{n-i} ($i=1,2,3,\dots,r$) 为移位寄存器中每位寄存器的状态; c_i ($i=1,2,3,\dots,r$) 为第 i 位寄存器的反馈系数。当 $c_i=0$ 时,表示无反馈,将反馈线断开;当 $c_i=1$ 时,表示有反馈,将反馈线连接起来。

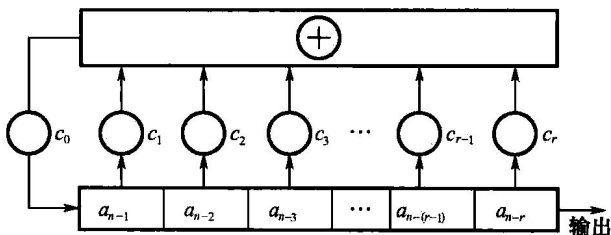


图 2.1 反馈移位寄存器结构

在此结构中 $c_0 = c_r = 1$, c_0 不能为 0, c_0 为 0 就不能构成周期性的序列,因为 $c_0=0$ 意味着无反馈,为静态移位寄存器。 c_r 也不能为 0,即第 r 位寄存器一定要参加反馈,否则 r 级的反馈移位寄存器将被简化为 $r-1$ 级的或更低的反馈移位寄存器。不同的反馈逻辑,即 c_i ($i=1,2,3,\dots,r-1$) 取不同的值,将产生不同的移位寄存序列。

2.2.2 循环序列发生器

最长线性移位寄存器序列可以由反馈逻辑的递推关系求得。

1. 序列多项式

一个以二元有限域的元素 a_n ($n=0,1,\dots$) 为系数的多项式 $G(x)$ 为

$$G(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \quad (2.13)$$

称之为序列的生成多项式,简称序列多项式。

由式(2.13)可以看出,序列 $\{a_n\}$ 与生成多项式 $G(x)$ 是一一对应的。对于一个反馈移位寄存器来说,反馈逻辑一确定,产生的序列就确定了。那么,序列与反馈逻辑之间满足什么关系呢? 由图 2.1 可以看出,移位寄存器第一位的下一时刻的状态是由此时的 r 个移位寄存器的状态反馈后共同确定的,即

$$a_n = c_1 a_{n-1} + c_2 a_{n-2} + c_3 a_{n-3} + \dots + c_r a_{n-r} = \sum_{i=1}^r c_i a_{n-i} \quad (2.14)$$

由此可见,序列 $\{a_n\}$ 满足线性递归关系。

把 a_n 移到等式的右边并考虑到 $c_0=1$, 式(2.14)可变为

$$c_0 a_n + \sum_{i=1}^r c_i a_{n-i} = \sum_{i=0}^r c_i a_{n-i} \quad (2.15)$$

2. 特征多项式

下面我们来推导与移位寄存器序列直接相关的特征多项式。

(1) A 矩阵

首先考虑一个矩阵 A 。对于反馈移位寄存器可用一个矩阵来描述它,即 A 矩阵,该矩阵被称为状态转移矩阵。 A 矩阵为 $r \times r$ 阶矩阵,其结构为

$$A = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & \cdots & c_{r-1} & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

由式(2.16)可以看出, A 矩阵的第一行元素正是移位寄存器的反馈逻辑。其中 $c_r = 1$,除了第一行和第 r 列以外的子矩阵为 $(r-1) \times (r-1)$ 的单位矩阵。由此可见, A 矩阵与移位寄存器的结构是一一对应的。 A 矩阵可以将移位寄存器的下一个状态与现状态联系起来。令 a_n 表示移位寄存器的现状态, a_{n+1} 表示移位寄存器的下一个状态,即

$$a_n = \begin{bmatrix} a_{n-1} \\ a_{n-2} \\ a_{n-3} \\ \vdots \\ a_{n-r} \end{bmatrix}, \quad a_{n+1} = \begin{bmatrix} a_{(n+1)-1} \\ a_{(n+1)-2} \\ a_{(n+1)-3} \\ \vdots \\ a_{(n+1)-r} \end{bmatrix}$$

则有

$$a_{n+1} = A \cdot a_n \quad (2.17)$$

对于图 2.2 所示的反馈移位寄存器,其 A 矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

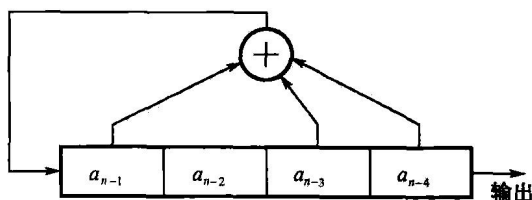


图 2.2 反馈移位寄存器例子

$$\begin{bmatrix} a_{(n+1)-1} \\ a_{(n+1)-2} \\ a_{(n+1)-3} \\ a_{(n+1)-4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{n-1} \\ a_{n-2} \\ a_{n-3} \\ a_{n-4} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

即

$$\begin{cases} a_{(n+1)-1} = a_{n-1} + a_{n-3} + a_{n-4} \\ a_{(n+1)-2} = a_{n-1} \\ a_{(n+1)-3} = a_{n-2} \\ a_{(n+1)-4} = a_{n-3} \end{cases} \quad (2.20)$$

由此可见,矩阵 A 将反馈移位寄存器的下一状态与现状态联系起来了。由寄存器的结构,就可以推出现状态,甚至后几个时刻的状态。

利用递推方法可得后 m 时刻的状态与现状态之间的关系为

$$a_{n+m} = [A]^m \cdot a_n \quad (2.21)$$



当 $[A]^m = I$ 时,必有

$$a_{n+m} = a_n \quad (2.22)$$

这表示反馈移位寄存器的状态与移位 m 次后的状态相同。由此可见,此反馈移位寄存器序列的周期为 m ,若 $m = 2^r - 1$,则产生的序列就是 m 序列。

A 矩阵与反馈移位寄存器的结构是一一对应的。那么, A 矩阵与序列 m 之间必有某种联系。下面求序列的特征多项式。

(2) 序列的特征多项式

由 A 矩阵可以得到 A 矩阵的特征方程,即

$$F(x) = |A - xI| = 0 \quad (2.23)$$

由此可得

$$F(x) = \begin{vmatrix} c_1 - x & c_2 & c_3 & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & -x & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -x & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -x \end{vmatrix} = 0 \quad (2.24)$$

或

$$F(x) = (c_1 - x)^r (-x)^{r-1} + c_2 (-x)^{r-2} + c_3 (-x)^{r-3} + \cdots + (-1)^r = 0 \quad (2.25)$$

整理后可得

$$F(x) = x^r + c_1 x^{r-1} + c_2 x^{r-2} + \cdots + 1 = \sum_{i=0}^r c_i x^{r-i} = 0 \quad (2.26)$$

式(2.26)已经假定 $c_0 = c_r = 1$,式(2.26)就是 A 矩阵的特征方程。

(3) 特征多项式

由 A 矩阵的特征方程可以定义特征多项式 $f(x)$ 为

$$f(x) = \sum_{i=0}^r c_i x^i, \quad c_0 = c_r = 1 \quad (2.27)$$

图 2.3 所示的序列的特征多项式为

$$f(x) = x^4 + x + 1$$

3. 特征多项式与序列多项式的关系

设线性移位寄存器序列为

$$\{a_n\} = a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n \quad (2.28)$$

相应的序列多项式为

$$G(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \quad (2.29)$$

$\{a_n\}$ 的线性递归反馈函数为

$$a_n = \sum_{i=0}^r c_i a_{n-i} \quad (2.30)$$

选择移位寄存器的初始状态为 $a_{-r} = 1, a_{-r+1} = \cdots = a_{-2} = a_{-1} = 0$,则由推导可得

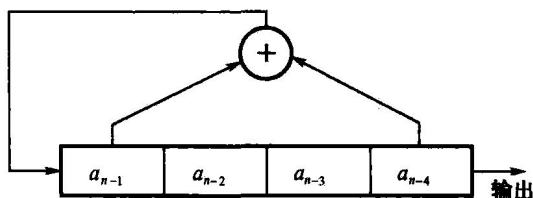


图 2.3 反馈移位寄存器