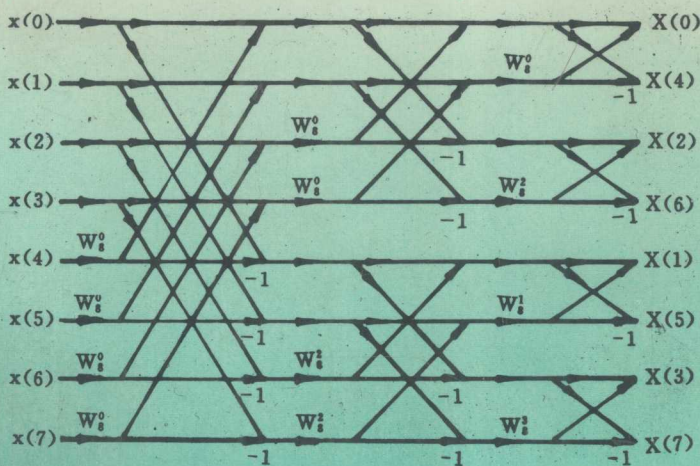


数字信号处理基础

刘景堂 编
蒲颀德 审



警官教育出版社

0342345

号 101 字 登 录 (京)

教 33
2005

数字信号处理基础 8

数字信号处理基础

主 编 : 刘景堂

刘景堂 编
蒲祯德 审

参 审 : 薛金五

行 数 : 1000

行 数 : 1000

第 5 卷
第 3 卷

(038)

字 数 : 324

册 数 : 1000

ISBN 7-81027-577-1/G · 170

定 价 : 15.00 元

警官教育出版社

0315212

(京)新登字 167 号

书 名: 数字信号处理基础

著 者: 刘景堂

责任编辑: 童正蓉

封面设计: 广 路

技术设计:

出版发行: 警官教育出版社

(北京西城木樨地北里 2 号 100038)

印 刷: 警官大学印刷厂印刷

经 销: 新华书店总店北京发行所

版 次: 1994 年 8 月第 1 版

印 次: 1994 年 8 月第 1 次印刷

印 张: 8.75

开 本: 32

字 数: 227 千字

印 数: 1000 册

ISBN 7-81027-577-1/G · 170

定 价: 15.00 元

0342345

前 言

随着计算机技术和大规模集成电路的发展,数字信号处理作为一门新兴学科,在理论上和实际应用上都取得了长足发展。并且,对其它学科领域已产生深远影响。特别是在数字通信领域,已占有重要地位。

本书作者,长期在高校从事数字通信和数字信号处理方面的教学工作和科研工作,具有较为丰富的教学经验和专业知识。本书正是作者根据自己多年的教学实践,参考国内外有关资料,结合通信专业和信息处理专业本科教学的实际需要编写而成的。

全书共分为六章,内容紧凑,结构合理,紧紧抓住了数字信号处理的两大基础理论,即数字频谱分析和数字滤波技术,深入浅出地阐明其基本原理和基本应用。书内概念简明,语言流畅,并在理论分析和概念论述方面有许多独到之处,想必能给读者带来一定收益,为读者进一步学习和深造打下良好基础。

本书可作为通信专业、信息处理专业、自动控制专业等相关专业的本科教材,也可供有关技术人员自学参考使用。

本书出版,承蒙深圳市东辉实业股份有限公司陈显旋总裁的大力资助,并得到北方交大吴湘淇教授的大力支持,同时采纳了警官大学韩加同志和李锦涛同志提出的宝贵意见,在此一并表示感谢。书中若有不妥之处,欢迎读者指正。

编者

1994.2

目 录

绪论	(1)
习题	(12)
第一章 离散信号与离散系统	(13)
1.1 时域离散信号的数学表示	(13)
1.2 线性时不变离散系统及其稳定性和因果性	(17)
1.3 常系数线性差分方程	(21)
1.4 时域离散信号与系统的频域表示	(24)
1.5 付里叶变换的对称性	(27)
1.6 离散信号的形成与取样定理	(30)
1.7 A/D 变换与 D/A 变换	(34)
1.8 二维序列与系统	(42)
习题	(46)
第二章 序列的 Z 变换及其特性	(48)
2.1 Z 变换及其定义域	(48)
2.2 Z 反变换	(53)
2.3 Z 变换的基本定理与性质	(59)
2.4 系统函数	(66)
2.5 二维 Z 变换	(69)
习题	(73)
第三章 离散付里叶变换(DFT)	(75)
3.1 周期序列的离散付里叶级数	(76)
3.2 离散付里叶级数的基本性质	(79)
3.3 Z 变换在单位圆上的均匀取样——频域取样定理	(86)
3.4 有限序列的离散付里叶变换	(90)
3.5 离散付里叶变换的性质	(92)
3.6 利用离散付里叶变换进行线性折积	(107)

习题	(113)
第四章 离散付里叶变换的计算	(115)
4.1 离散付里叶变换的计算量及减少计算量的途径	(115)
4.2 时间抽选 FFT 算法	(117)
4.3 时间抽选 FFT 算法的同址计算问题	(122)
4.4 时间抽选 FFT 算法流图的其他形式	(125)
4.5 频率抽选 FFT 算法	(128)
4.6 频率抽选 FFT 算法的同址计算与其他结构形式	(131)
4.7 N 为任意合数的 FFT 算法	(132)
4.8 FFT 算法编程的一般考虑	(140)
4.9 二维 FFT	(144)
4.10 线性调频 Z 变换算法	(144)
习题	(149)
第五章 数字滤波器的常规设计	(151)
5.1 数字滤波器的构成原理	(153)
5.2 模拟滤波器设计简介	(155)
5.2.1 模拟滤波器设计的基本知识	(156)
5.2.2 巴特沃兹滤波器	(159)
5.2.3 切比雪夫滤波器	(165)
5.2.4 椭圆滤波器	(172)
5.2.5 频率变换与其他类型的滤波器设计	(176)
5.2.6 三种类型模拟滤波器设计的综合比较	(179)
5.3 IIR 数字滤波器设计	(181)
5.3.1 IIR 数字滤波器的一般表达式	(182)
5.3.2 IIR 数字滤波器设计的基本要求	(183)
5.3.3 脉冲响应不变法	(186)
5.3.4 双线性变换法	(191)
5.3.5 频率变换与其他类型的数字滤波器设计	(202)
5.4 FIR 数字滤波器设计	(203)

5.4.1	FIR 数字滤波器的基本特性	(204)
5.4.2	均方逼近准则	(209)
5.4.3	线性相位 FIR 数字滤波器的窗口法设计	(212)
5.5	IIR 数字滤波器与 FIR 数字滤波器的综合比较	(219)
	习题	(221)
第六章	数字滤波器的优化设计与实现技术	(222)
6.1	IIR 数字滤波器的优化设计	(223)
6.1.1	频域均方误差最小化逼近法	(223)
6.1.2	时域均方误差最小化逼近法	(225)
6.2	FIR 数字滤波器的优化设计	(227)
6.2.1	优化时窗函数设计法	(228)
6.2.2	频域最大绝对误差最小化逼近法	(237)
6.3	数字滤波器的实现技术	(250)
6.3.1	数字滤波器的构成形式	(251)
6.3.2	数字滤波器的硬件实现	(255)
6.3.3	数字滤波器的其他实现方法	(265)
6.4	有限字长对数字滤波器实现的影响	(266)
	习题	(270)
	参考书与参考文献	(271)

绪 论

近几十年以来,随着计算机和大规模集成电路的飞速发展,数字信号处理,作为一门具有强大生命力的新兴学科,也得到了充分发展。目前,数字信号处理,在理论上日趋成熟,应用范围日益广泛。它对其他许多学科已经产生深远影响,对社会生产和社会生活的许多方面,已经起到举足轻重的推动作用。而且,对警察侦缉工作的现代化,也产生了深远影响。因此,数字信号处理,越来越受到人们的普遍重视。也越来越受到公安系统的普遍重视。

为了帮助读者能够更好地了解数字信号处理,尽快地掌握和应用数字信号处理技术,为实现我国公安战线的现代化做出积极贡献,笔者将在绪论部分,就数字信号处理的发展概况、基本概念和有关警察工作中的基本应用,作以简明介绍。

一、数字信号处理的发展概况

追溯数字信号处理的发展史,人们发现,早在 1948 年,美国 Bell 实验室的科学家就曾经提出过采用数字器件来实现滤波器的问题。到 50 年代,美国麻省理工学院,就有人具体研究过数字滤波问题。但是,当时的研究工作,只是作为一种设想和开拓精神而提出来的。它的理论根据只不过是模拟处理的近似而已。由于复杂的理论问题和众多的实际问题当时还无法解决,致使研究工作进展缓慢,没有取得显著成果。因此,也就没有引起人们的重视。一直到 1965 年,美国 Bell 实验室的科学家 Kaiser,他在数字滤波器的理论研究方面取得了重大突破,成功地提出用双线性变换法,来设计数字滤波器,从而为数字滤波器的设计找到了理论根据。同一年,美国的两位数学家 Cooley 和 Tukey,分别发现了 FFT 算法,使得 DFT 的计算时间大大减少。从而,为数字滤波器的技术实现,找到了出路。同时,也使得实时进行数字频谱分析成为可能。从此以后,在短短的十几年时间内,数字信号处理作为一门新兴学科,随着电子计算机技术和大规模集成电路技术的飞速发展,它在理

论上和技术实现上获得了突飞猛进的全面发展,取得了举世公认的辉煌成就。

如今,数字信号处理已经发展成为一门独立的新学科,一门理论性和技术性都比较强的新学科。而且,它对其他许多学科领域,都产生了深远影响。特别是对警察工作的现代化产生了深远影响,使得案件侦破更为迅速和准确。

数字信号处理所涉及到的范围也越来越广泛。从确定信号到随机信号,从平稳信号到非平稳信号,从一维信号到多维信号,从时不变信号到时变信号,从线性信号到非线性信号等等,都可以进行数字信号处理,以提取所需要的信息。

目前,国际上对于数字信号处理技术及其应用的更深入研究,已经成为人们争相研究的热门。欧美各国都设有专门的研究机构、专门的学术委员会和专门的期刊杂志。关于数字信号处理的学术会议十分频繁,关于数字信号处理的论文有增无减。

我国对于数字信号处理的研究,虽然起步较晚,但是发展速度很快。特别是党的十一届三中全会以来,国家实行开放政策,加强了与国外的学术交流,从而获得许多宝贵资料和大量科技情报。这对我国数字信号处理的迅速发展,起到了重要的推动作用。

1979年,国产 HA-1 型 FFT 信号分析系统研制成功。

1980年,中国仪器仪表学会在北京召开了首届关于数字信号处理的学术会议。会上发表几十篇学术论文。

1981年,中国电子学会和中国仪器仪表学会,在北京联合召开了全国第一届信号与信息处理学术会议。会上发表百余篇学术论文。同时,组建了全国数字信号处理筹备委员会。并于1982年正式成立了中国电子学会、中国仪器仪表学会、信号处理学会。简称为 CCSP。

从此以后,数字信号处理技术在我国得到了充分发展,科技成果层出不穷,技术水平越来越高。特别是关于快速专用设备的研究、关于汉语语音识别的研究、关于图象处理与模式识别的研究等等,都取得了十分可观的成果。有些成果已经达到世界先进水平。

在理论研究方面,我国学者首次发现最大熵法与倒频分析的关系。在快速卷积的理论研究与技术实现方面,我国也取得显著成就,受到国际上的重视。

总之,数字信号处理,作为一门新兴学科,已经迅速在我国发展起来。现在国内许多大学,都陆续增设了数字信号处理这门课,以便培养出雄厚的后继力量,使我国对于数字信号处理这门学科的研究,能够长期发展下去。我们深信,经过不断地努力,数字信号处理的先进技术,将会对我国的四化建设发挥出重要作用,将会对我国公安系统的现代化发挥出重要作用。我国数字信号处理的学术水平,将会迅速进入世界先进行列。

二、数字信号处理的一般概念及其特点

人们知道,通信系统的主要任务,就是可靠而迅速地传送与交换信息。所谓信息,是指消息的不确定性,信息要进行传送与交换,必须依附于信号才能实现。比如,电话中的语音信号,电视中的图像信号,计算机中的数据信号等等,都包含一定的信息量。所以,可以认为,信息是信号的具体内容,信号是信息的物理表现。

人类社会所接触到的信号有各种各样,这些信号有一维的,有二维的,有多维的;有模拟的,有数字的;有确定性的,有随机性的;有周期性的,有非周期性的等等。

所谓信号处理,就是对以上这些信号,进行人为地加工处理,以便提取有用信息,达到可靠传输与利用的目的。



图 0-1 模拟通信系统

例如,图 0-1 所示模拟通信系统。为了将信息可靠而有效地从一端传送到另一端,就需要在发送端对信号进行放大、调制、滤波,在接收端再对信号进行滤波、放大、均衡、解调等一系列的加工

处理。

如上所述,如果信号处理设备都是模拟器件,被处理的信号都是模拟信号,那么,这种处理方式,就属于模拟信号处理。

如果我们将图 0-1 中的语音信号进行 A/D 变换,把它变成数字信号,并将系统中的模拟器件相应地置换成数字滤波器、数字均衡器、数字调制与解调器等等,那么,就组成了数字通信系统。这时,系统的组成部件都是数字器件,被处理的信号都是数字信号,所以,这种处理方式,就属于数字信号处理了。

比较一下数字通信系统与模拟通信系统,不难发现,数字信号处理与模拟信号处理,在相应的处理功能上,具有一定的相似性。但是在具体处理方法上,具有很大差别。因此,切不可认为,数字信号处理仅仅是模拟信号处理的近似。实际上,数字信号处理比模拟信号处理,功能要大得多,而且处理方法也灵活得多。

为阐明数字信号处理的一般概念,不妨分析一下数字滤波器的工作情况。

例如,一个简单的数字滤波器,它的差分方程为:

$$y(n) = x(n) + by(n-1)$$

对应的 Z 变换为:

$$Y(Z) = X(Z) + bY(Z) \cdot Z^{-1}$$

由此,可求得它的系统函数为:

$$H(Z) = \frac{Y(Z)}{X(Z)} = \frac{1}{1 - bZ^{-1}}$$

根据系统函数,便可求得与之对应的系统结构。如图 0-2 所示。

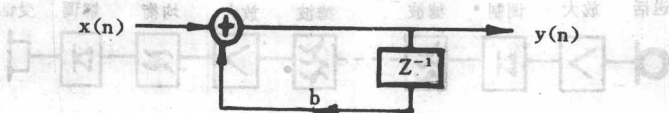


图 0-2 系统结构

该系统的频谱,也可由系统函数求得:

$$H(Z)|_{Z=e^{j\omega}} = \frac{1}{1 - be^{-j\omega}}$$

其幅频特性如图 0-3 所示。

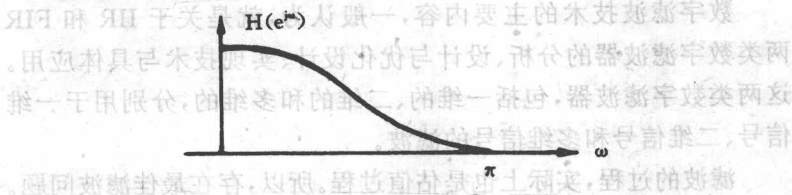


图 0-3 幅频特性

由此例可以看出,构成数字滤波器的基本器件只是加法器、乘法器和延迟单元,通常把它们统称为运算单元(ALU)。具体实现时,还需要有一个控制单元(CU),用来控制整个系统,进行协调工作。由此也可看出,整个数字滤波器的工作原理,相当于一个专用的计算机系统。

通过上述分析,不难归纳出数字信号处理的一般概念如下:所谓数字信号处理,就是采用数字的方法,即利用计算机或专用处理机,通过数值计算的方法,对信号进行分析运算等加工处理,以便提取有用信息,达到可靠传输和利用信息的目的。

数字信号处理的基本内容,主要包括以下几个方面:

1. 数字频谱分析:即对信号的数字频谱进行分析运算,以便提取信号的主要频率成分。例如,通过对机械振动信号的数字频谱分析,确定它的主要频率成分,从而为该机械设备的故障诊断提供可靠的参考数据。

数字频谱分析的基本方法,主要是快速付里叶变换分析法。正是由于这个原因,所以,数字频谱分析的主要内容,一般认为,就是讨论 FFT 算法的构成原理、实现方法及其应用情况。

当然,还需要指出,FFT 的主要用途之一,就是用来解卷积。而近几年来,随着数字信号处理技术的发展,国际上又出现了许多新的算法,其中迭代法解卷积效率很高,大有取代 FFT 之势。但是,尽管如此,FFT 算法仍然是进行数字频谱分析的基本方法。

2. 数字滤波技术:就是在背景噪声中,提取信号的一种技术。

例如,在充满噪声干扰的雷达信号中,通过数字滤波,可以消

除干扰,提取雷达的回波信号,以便确定动目标的方位。

数字滤波技术的主要内容,一般认为,就是关于 IIR 和 FIR 两类数字滤波器的分析、设计与优化设计、实现技术与具体应用。这两类数字滤波器,包括一维的、二维的和多维的,分别用于一维信号、二维信号和多维信号的滤波。

滤波的过程,实际上也是估值过程。所以,存在最佳滤波问题。例如,最小平方滤波、维纳滤波、卡尔曼滤波等等,都是基于某种最佳准则下的最佳滤波技术。

3. 非线性处理技术:自然界的信号多种多样,信号与背景噪声的关系错综复杂。如果信号与背景噪声的关系是线性关系,通常称之为加性信号,或加性噪声。对于这种信号,则可采用线性滤波技术,将其区分开来,拟制背景噪声,提取信号成分。如果信号与背景噪声的关系是非线性关系,例如乘性关系、卷积性关系等等,具有较复杂的数学关系。对于这种信号,要想在背景噪声中把它提取出来,就需要采用非线性处理技术。比如,雷达跟踪系统,由于信号传输的信道特性是随机变化的,所以,对目标信号的频率与相位要实行随机调制。这样以来,对这种信号的滤波,只能采用非线性滤波技术,才可能从背景噪声中有效地提取信号成分。

4. 数据压缩:这也是数字信号处理的重要内容之一。原始信号通过数据压缩,排除冗余信息,可以大大减少数据量,从而使数据传输与数据处理的有效性大为提高。比如,一帧图像中,通常有 512×512 个像素,每个像素灰度若用 8bit 计算,则共有 30 万个 8bit 的图象数据。而这些数据当中,含有大量的冗余信息。因此,必须首先进行数据压缩,消除冗余信息,使得总数据成倍的减少。从而,才有可能进行有效地传输和处理。

实现数据压缩的方法,通常有沃尔什变换、哈达玛变换等数学变换方法。

另外,参数信号模型,也是数字信号处理的一个重要内容。就是用有限个特征参数构成的模型,来表示某种信号。目前,这种处理技术已经得到重要应用。

从。关于数字信号处理的特点,总的来说,就是速度快、精度高、稳定性好;功能大、应用广、灵活性强。

如果采用专用处理机来进行某种给定信号的数字信号处理,则处理速度是相当快的。而且精度很高,稳定性也很好。比如,美国 TMS 320 系列专用处理机,每进行一次 $16 \times 16\text{bit}$ 的乘法运算,只需要 200ns。

数字信号处理的功能比模拟信号处理的功能要大得多。模拟信号处理,通常只能处理加性关系的信号。例如,带有加性噪声的信号,可以通过线性滤波器,排除掉噪声成分。而对于其他数学模型信号,却往往无能为力。数字信号处理,则对于加性信号、乘性信号、卷积性信号等等复杂的数学模型信号,均可处理自如,取得满意结果。

另外,数字信号处理的功能比较灵活。只要改变运算常数,便可改变处理的性质。例如,数字滤波器,只须改变它的乘法运算的系数(系数数据,通常保存在处理机的内存单元中,可以通过写入指令更改系数数据。),便可得到不同的滤波特性。这对于多功能应用很是方便。

数字信号处理的实现方法也比较灵活。可用硬件实现,也可用软件实现。实现时,既没有介入衰耗问题,也没有阻抗匹配问题。而且,最易实现模拟滤波器所难以实现的甚低频信号的滤波问题。

总之,数字信号处理的优点很多。它不仅能够取代模拟信号处理,而且具有许多模拟信号处理所不具备的优点。因此,在各学科和工程技术领域,得到了极其广泛的应用。

三、数字信号处理的实际应用与发展情况

数字信号处理的应用非常广泛,发展非常迅速,尤其表现在以下几个方面:

1. 语音处理方面:语音处理是数字信号处理应用最早的领域之一,它在语音加强和频带压缩方面已经取得明显效果。

语音数字信号处理技术,通常可划分为两类:一类是对语音信号的波形进行编码,如采用 PCM、 ΔM 或 DPCM 等方式,对语音

信号波形进行编码。然后,就可以通过数学变换来压缩数据量。从而提高信息传输的有效性。这些技术,目前已经十分成熟。另一类,就是利用语音信号的生成模型,对语音信号进行分析与合成。例如,数字声码器,就是建立在语音分析与合成的基础上实现的。它先将语音信号进行付里叶变换,从而获取瞬时声谱,再对声谱的包络和结构进行分析,提取特征参数。然后根据这些表征语音信号的特征参数,进行编码发送。接收端则根据所接收到的特征参数码,进行语音合成,恢复原来的语音信号。

对于数字声码器的研究,意义是很大的。它在语音识别、保密通信等许多方面都起着主要作用。目前,随着数字信号处理技术的发展,特别是实现技术的发展,使得数字声码器的研究,取得了可喜的成绩。

我们知道,语音特征,因人而异。因此,可把语音特征用来作为刑事判决的科学依据。所以,对于语音处理的研究,在公安系统将有着特别重要的意义。实际上,关于这一课题的研究,一直受到世界各国警察机构的密切注视。

2. 图像处理方面:图像处理是数字信号处理应用的重要领域。目前,国内外对于图像数字信号处理的研究工作进展很快。并且,已经取得了许多令人振奋的成果。现在,图像数字信号处理技术,已经广泛地应用在遥感遥测、生物医学、视听电话、测量仪表等许多技术领域。

图像处理,通常划分为三类:

第一类是图像的变换处理。它主要包括图像增强、图像恢复与图像校正等。这类图像处理,输入的是模糊图像。通过图像数字信号处理,可得到清晰的图像输出。

第二类是图像的分析处理,也称为图像识别。比如指纹自动鉴别,就是从摄取的指纹图像中,进行分析处理,提取特征信息,作为鉴别的依据。这类图像处理,输入的是给定的图像。通过图像数字信号处理,可得到定量分析结果的输出。

第三类是图像记录与显示。这类图像处理,输入的是通过传感

器获取的目标信息,通过图像数字信号处理,对这些原始的目标信息进行识别、分类,最后用图像成形,把它们显示出来。通过图像记录与显示,可以大大开扩人类的视觉范围,使得人类对于红外光谱和紫外光谱,也有可能得到形象的认识。这无疑将对人类社会的发展起着重要作用。

图像数字信号处理,除了对国民经济生产和人类社会生活具有重要意义之外,对于公安系统,也具有特别重要的意义。例如,指纹鉴别,这是公安人员侦破刑事犯罪的重要依据。但是,在犯罪现场所获取的指纹图像,往往是模糊不清的指纹图像。这就可以通过图像的变换处理,使得指纹图像得到恢复。并且,还可以通过图像的分析处理,进行自动鉴别。这样可以大大减少人工鉴别的困难,大大减少人工鉴别发生差错的概率。

3. 噪声分析:噪声分析是近几年提出的数字信号处理的研究课题。现在已经在工业自动化控制方面获得重要应用。例如,一个工业自动生产车间,它在正常工作时,会产生具有一定规律的噪声。这种噪声的规律,可以通过噪声的数字频谱分析而求得。一旦发现噪声谱有异常变化,就可以预测到自动生产线的故障。

利用背景噪声的数字频谱分析来进行破案,则是数字信号处理技术应用于警察工作的近期成果。例如,事先在各种可能的发案现场,对环境噪声进行大量采样,然后进行背景噪声的数字频谱分析,找出它的频谱的统计特性,存放在计算机里。假设,录到一个匿名电话,那么,就可以对电话中的背景噪声,进行数字频谱分析,从而迅速断定匿名电话的来处。如果匿名电话是从马路边的电话亭里打来的,则其背景噪声中,一定会有汽车奔跑、鸣笛等特殊噪声。表现在噪声谱上,会出现相应的冲击峰。如果匿名电话是从大厅里打来的,则其背景噪声中就会有空旷的回声反响,这在其背景噪声的数字频谱上,也会有所表现。如果匿名电话是从家里打来的,则其背景噪声的功率可能很小,等等。所以只要我们提前在各种可能的发案场所,对背景噪声进行采样,再进行数字频谱分析,并作为对比的依据,就完全可能迅速侦破匿名电话的发案地点。

4. 通信领域:数字信号处理,在通信领域中的应用,尤其是在保密通信中的应用,更是占有重要地位。

当前,数字通信发展很快,大有取代模拟通信之势。特别是光纤技术的突破,为数字通信的发展,开辟了广阔的前景。世界各国都在大力发展数字通信事业。这样,也就为数字信号处理在通信领域中的应用,找到了广阔的天地。例如,取样率变换、数字滤波、数字调制与解调,以及 FFT 等,这些都是数字通信系统所必不可少的部件。特别是当前许多国家正处于模拟通信向数字通信过渡的时期,这就必须解决时分制(TDM)与频分制(FDM)的兼容问题。这就需要依靠数字信号处理技术来实现 TDM—FDM 的双向转换器。

TDM—FDM 转换器,大多是在 FDM 超群上进行的。例如图 0—4 所示,二个 30 路 PCM 群,转换成 60 路 FDM 超群信号。

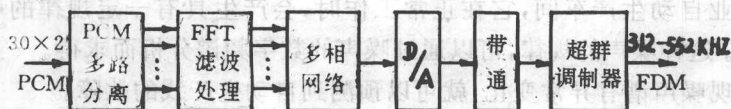


图 0—4 TDM—FDM 转换器示意图

除了通信传输系统以外,通信交换系统目前也正在向数字化发展。例如,程控交换机,现在已经在国内外大量采用。这种交换系统不仅体积小、容量大,而且性能稳定、可靠性高、工作速度快。这本身就是数字信号处理技术的重要应用。

另外,利用数字信号处理技术实现的回波抵消器,在消除通信系统的回波干扰,提高通信质量方面,已经取得明显效果。

在公安通信方面,保密和安全问题非常重要。要实现保密通信和数据安全,也必须采用数字信号处理技术来进行加密处理。

5. 其他方面:数字信号处理技术的应用十分广泛,特别是在许多边缘学科,表现出了突飞猛进之势。比如,在生物医学方面,利用 X 射线断层技术,对生物电信号进行数字信号处理,对于诊断