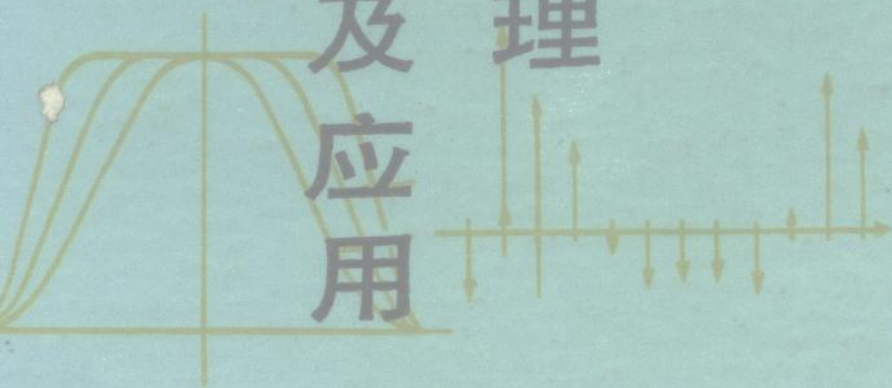


数字信号处理 技术及应用



吴湘淇 主编 中国铁道出版社

72.612
272

数字信号处理技术及应用

吴湘淇 聂涛 编著



中国铁道出版社

1986年·北京

8610540

内 容 简 介

本书对数字信号处理技术的原理、方法及应用作了比较全面的介绍。

本书共八章由五个单元组成：第一单元是基础理论；第二单元讨论数字滤波器的设计与实现；第三单元介绍数字信号处理中各种快速算法、数字谱估计（经典和近代）与技术实现；第四单元系统讨论沃尔什变换与应用；第五单元主要介绍专门处理技术在通信、医学、交通、工业等新领域中的应用。

本书适用于从事通信、控制、医学生物及信息处理等实际工作的广大工程技术人员作自学读物，也可供大专院校有关专业师生学习参考。

1040/5/03

数字信号处理技术及应用

吴湘淇 聂 涛 编著

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：850×1168毫米 1/32 印张：22.375 字数：593千

1986年1月 第1版 第1次印刷

印数：平装 0001—3,000册 定价：平装 5.00元
精装 0001—3,000册 定价：精装 5.95元

前 言

数字信号处理是利用计算机或专用处理设备,以数值计算的方法对信号进行分析、变换、综合、估计与识别等等的加工处理,借以达到提取信息和便于利用的目的。由于数字信号处理技术具有灵活、精确、抗干扰性强,以及在设备上尺寸小、造价低;在功能上有许多是模拟处理所不具备等优点,所以近十多年来在语音、雷达、声纳、地震、图象、通信系统、控制系统、医学生物、交通运输、地质勘探、机械震动、宇宙航行、遥感遥测、水利工程、产品检验、故障检测,以及自动测量仪器等各个领域获得极其广泛的应用。它有效地推动各工程技术领域的技术改造和学科发展,引起人们的重视。随着器件的更新,微计算机技术的进步以及实际中对信息处理愈来愈高的要求,近年来新算法不断出现,理论上逐步成熟,已经形成了具有强大生命力的技术科学。

众所周知,随着科学技术的发展,知识积累越来越多,知识老化与更新的速度也越来越快。因此,编写本书的目的其一,是为了帮助从事信息处理实际工作多年,而又具有一定理论基础的广大工程技术人员,在较短时间内对数字信号处理技术有个基本了解,以改变知识老化的状态,达到知识更新的目的;其二,考虑到数字信号处理技术的应用愈益广泛、日益深入,几乎在每一工程技术领域都要用到它,所以为了有利促进生产发展,达到开拓新的应用领域的目的。

数字信号处理技术是一类理论性与技术性都比较强的学科,内容丰富、发展迅速,所牵涉的知识面很广。它包括对离散系统的分析、综合与技术实现,既讨论理论问题又讨论实际问题。对处理对象既有确定性信号又有随机信号;对处理方法不仅涉及时

域、频域还有空域；对技术实现既需要数字硬件知识又需要软件知识，而以上这些知识往往分散在许多先修课程之中。为了让缺乏这些先修知识而又能在有限的篇幅内达到上述的编写目的，本书尽量作到：①内容衔接的梯度小，便于自学、易于理解；②内容的取舍可浅、可深，灵活性大，适应面广，但重在基础；③重视实际中的应用，尽可能反映近年来国内外在这一学科领域的成果与动向，以利开阔思路，为进一步开拓新的应用领域打下基础。

本书共八章由五个单元组成。第一单元是基础理论部分，简要介绍离散信号与系统的分析；第二单元系统介绍数字滤波技术，除常见的设计方法与计算机辅助优化设计外，还介绍有关的硬件实现；第三单元介绍数字信号处理中的各种快速算法及确定性信号谱分析和随机数字信号谱估计（包括经典与近代的方法），同时还扼要介绍提高运算速度的硬件实现方法；第四单元比较系统地讨论沃尔什函数，介绍沃尔什变换的某些应用；第五单元主要介绍某些专门处理技术在通信、医学、交通、工业等新领域中的应用。

本书第七章与第八章的一部分由聂涛同志编写，其余各章节均由吴湘淇编写。在编写过程中得到王瑞英同志和研究生的热忱帮助，在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，个别章节完稿比较仓促可能存在不妥之处，诚恳欢迎读者批评指正。

作 者

一九八四年五月于北方交通大学

目 录

绪 论	1
一、数字信号处理的概念及特点	1
二、数字信号处理技术在实际中的应用	5
三、数字信号处理技术科学的进展	10
四、本书特点简介	12
第一章 离散信号与变换	15
引 言	15
第一节 取样信号及其频谱	16
一、取样信号在数字处理过程中的作用	16
二、有限宽度脉冲取样	19
三、理想脉冲取样	22
第二节 取样定理及其推广	26
一、时域取样定理	26
二、时域取样定理的推广	32
三、频域取样定理	39
第三节 数模转换与模数转换的实现	41
一、数模转换的实现	41
二、模数转换的实现	45
第四节 序列及其运算	48
一、序列的表示及常用序列	48
二、序列的运算	53
第五节 序列的 z 变换及其性质	59
一、序列的 z 变换和它的定义域	59
二、 z 反变换	66
三、 z 变换的基本性质	72
第六节 序列付里叶变换与离散付里叶变换	82
一、序列的付里叶变换	82
二、序列离散付里叶变换	88
第七节 序列 z 变换与其他变换之间的关系	96
一、序列 z 变换与拉氏变换之间的关系	96
二、序列 z 变换与付氏变换之间的关系	99

三、序列 z 变换与离散付里叶变换之间的关系	102
第二章 离散系统的描述与分析	107
引言	107
第一节 离散系统的数学模型	107
一、差分方程的描述	110
二、离散卷积描述	114
三、离散状态方程描述	117
第二节 离散系统的分析	120
一、时域分析	120
二、变换域分析	129
第三节 离散系统的传输函数	133
一、离散传输函数的基本特性	133
二、从零极点求离散系统频率响应	138
三、复杂系统及逆系统的传输函数	141
第四节 物理可实现系统	143
一、因果系统	143
二、稳定系统	145
三、可实现系统	148
第三章 数字滤波器的设计原理和一般设计方法	151
引言	151
第一节 数字滤波器工作原理	153
第二节 典型模拟滤波器设计简介	158
一、有关基本概念	159
二、巴特沃思 (Butterworth) 低通滤波器 (简称BW型滤波器)	164
三、切比雪夫 (Chebyshev) 低通滤波器 (简称CB型滤波器)	172
四、椭圆低通滤波器 (简称C型滤波器)	182
五、频率变换与其它类型滤波器的设计	186
第三节 无限脉冲响应 (IIR) 数字滤波器的设计	197
一、何谓无限脉冲响应 (IIR) 数字滤波器	197
二、设计 IIR 滤波器的基本条件	199
三、脉冲响应不变法	202
四、双线性变换法	206
五、利用频率变换设计非归一化数字滤波器	216
第四节 有限长脉冲响应 (FIR) 数字滤波器的设计	227
一、线性相位 FIR 滤波器的基本性质	228

二、付里叶级数法(矩形窗口法)	240
三、窗口加权法	246
四、频率取样法	258
第五节 IIR 滤波器与 FIR 滤波器的比较	265
第四章 数字滤波器优化设计与实现	267
引 言	267
第一节 IIR 滤波器的优化设计	268
一、频域均方误差最小化逼近法	268
二、时域均方误差最小化逼近法	273
第二节 FIR 滤波器的优化设计	281
一、频域最大误差最小化逼近法(加权切比雪夫逼近法)	281
二、关于最优时窗函数设计法的讨论	290
第三节 数字滤波器的技术实现	296
一、利用通用计算机实现数字滤波	296
二、数字滤波器的构成形式	297
三、数字滤波器硬件实现的基本形式	307
四、提高数字滤波器处理速度的方法	311
五、有限字长对数字滤波器实现的影响	323
第五章 数字信号处理中的快速算法及技术实现	332
引 言	332
第一节 离散付里叶变换的基本性质	333
一、线性性质	333
二、对称性质	333
三、位移性质	339
四、卷积性质	342
第二节 快速付里叶变换(FFT)	356
一、 FFT 算法的依据	356
二、 FFT 算法的基本形式	360
第三节 混合基与基4 FFT 算法	371
第四节 数论变换(NTT)	377
一、有关数论变换的几个基本概念与结论	380
二、费玛(Fermat)数快速变换(FNT)	389
第五节 维诺格勒(Winograd)付里叶变换算法 ($WFTA$)	395
一、 $WFTA$ 算法的基本原理	395
二、利用微型机实现 $WFTA$ 算法	399
第六节 DFT 快速算法的软件实现	401

一、FFT信号流图的分析	401
二、FFT程序框图与程序	404
三、WFTA程序框图与程序说明	411
第七节 DFT快速算法的硬件实现	411
一、顺序处理机	412
二、级联处理机(流水线工作方式)	412
三、并行处理与阵列式处理	414
四、位片式高速FFT处理机	415
第六章 数字谱分析及线性预测、参数估计	423
引 言	423
第一节 离散付里叶变换作为确定性连续信号的近似谱分析	424
一、DFT作为连续信号的近似频谱分析	424
二、DFT近似CFT作频谱分析	428
三、DFT近似CFS作谐波分析	432
第二节 DFT参数的选择与频率分辨率的提高	438
一、DFT参数的选择	438
二、提高频率分辨率的方法	440
第三节 确定性数字信号(序列)的谱分析	446
一、FFT与Chirp z 变换法(CZT)	446
二、滤波法	450
第四节 随机过程的一般概念及其统计特性	456
一、随机变量、随机过程与概率函数	456
二、随机过程的特征	461
三、平稳随机过程与各态遍历随机过程	465
四、功率谱密度及其与相关函数的关系	472
第五节 随机数字信号(序列)的谱估计	479
一、快速相关法(自相关函数法或间接方法)	482
二、周期图法(直接付里叶变换法)	485
第六节 高分辨率最大熵谱分析法	490
一、信号模型与自回归分析	492
二、莱文森(Levinson)递推算法	496
三、伯格(Burg)递推算法	498
四、近代谱分析方法的实例	502
五、随机取样的信号谱分析	503
第七节 线性预测与参量估计	508
一、随机过程模型与预测器的理想特性	509
二、用传输函数法描述的预测器	510

三、用状态空间法描述的预测器	515
四、参数估计	516
第七章 沃尔什函数及其应用	518
引 言	518
第一节 列率与序率	519
第二节 沃尔什函数的定义与性质	520
一、按沃尔什序定义沃尔什函数	520
二、按拉德梅克函数定义沃尔什函数	520
三、按哈达玛矩阵定义沃尔什函数	523
四、沃尔什函数的基本性质	525
第三节 沃尔什级数	527
第四节 离散沃尔什函数与离散沃尔什变换	531
第五节 快速离散沃尔什变换	538
第六节 二维沃尔什变换	545
第七节 沃尔什函数滤波器	550
一、时间信号的沃尔什函数滤波器	550
二、空间信号的沃尔什函数滤波器	555
第八节 沃尔什函数用于信号分析	557
第九节 沃尔什函数用于多路信息传输	559
一、电传信号的并行传输	560
二、沃尔什函数电力电缆监测系统	563
三、择多复用多路数字通信	564
第十节 沃尔什函数用于话音加密	567
第十一节 沃尔什函数用于图像数据压缩	569
第十二节 沃尔什函数迭代法的微分积分方程求解	572
一、培莱序沃尔什函数	573
二、 t^n 的沃尔什级数表示	574
三、微分方程的沃尔什函数迭代求解	579
第十三节 沃尔什函数算子法的微分积分方程求解	585
一、积分与微分算子	585
二、微分方程求解	591
第十四节 离散沃尔什变换与离散付里叶变换的关系	593
第八章 数字信号处理技术在各领域中的应用	595
引 言	595
第一节 数字信号处理在通信中的应用	595
一、话路调制解调技术的发展概况	596
二、数字化话路调解器的实现特点	598

三、几种典型的调制解调器.....	602
第二节 医学生物信号的数字处理.....	610
一、图象处理的基本概念.....	612
二、血细胞与X线图象处理与识别.....	631
三、多普勒(Doppler)血流信号的数字处理	634
第三节 声纳信号处理.....	637
第四节 数字信号处理在交通运输中的应用.....	641
一、铁道数据的互谱分析.....	641
二、动态电子轨道衡信号数据处理.....	643
第五节 故障检测、工业自动检验及其他.....	646
一、倒频谱及其在机器故障检测中的应用.....	646
二、同态滤波系统及其在去混响和心电检测中的应用.....	648
三、工业自动检验及其他.....	654
第六节 数字信号处理在数据预处理中的应用.....	655
一、预处理的基本方法.....	656
二、提高信噪比的方法.....	659
附录1 设计归一化椭圆模拟低通滤波器FORTRAN程序	662
附录2 模拟滤波器衰减特性 FORTRAN程序.....	666
附录3 基2 FFT FORTRAN 程序.....	668
附录4 基4 FFT FORTRAN 程序.....	670
附录5 1008点 WFTA FORTRAN程序.....	672
附录6 复序列($N \leq 500$)DFT与IDFT FORTRAN 程序.....	684
附录7 用补零法提高频谱分辨率的 FORTRAN 程序	686
附录8 设计椭圆数字滤波器FORTRAN程序	690
主要参考书目	704

绪 论

近十多年来数字信号处理技术同数字计算机、大规模集成电路等先进技术一样，日新月异有了突飞猛进的发展，已经形成了一门具有强大生命力的技术科学。由于它本身具有一系列的优点，所以能有效地推动各工程技术领域的技术改造和学科发展，应用领域也愈益广泛、日益深入，越来越受到人们的重视。本绪论就数字信号处理研究的内容、实际中的应用、发展情况及本书的特点和内容安排作一简单介绍。希望在系统阐述每一章节内容以前给读者一个比较完整的有关数字信号处理的基本概念。

一、数字信号处理的概念及特点

在通信和控制系统中一个重要的任务就是传送信息和交换信息。什么是信息？如电话中的话音、电视中的图象、控制系统中的数据和指令等等都是信息。为了便于传送，往往通过传感器和特定的转换设备将信息变成电的信号。例如发话器就是一种声电转换设备，它能把声音变成电信号。可见，信息是信号的具体内容，信号是信息的物理表现形式，它反映了物理系统的状态与特性（如声音的大小、高低、快慢、反映出音量、音域、音质的状态），是信息的函数。所以广义地说，一切运动或状态的变化都是一种信号。

在人类活动的各领域中遇见的信号有多种多样，除上述语音信号、控制信号外还有如地震信号（天然地震或地下核试验），振动信号（汽车、机床、机车车辆振动），心电信号（心肌或心脏跳动）等等，其变化的规律有周期性和非周期性；确定性和随机性；一维和多维信号，即可以用单变量和多变量来描述的如语音信号、心电信号和图象信号等。

8610540

所谓信号处理，就是对信号进行分析、变换、综合、识别等的加工处理以达到提取信息和便于利用的目的。如长途电话，为了将信号最有效地和可靠地从一个地方传送到较远的另一地方，就需要分别在两个终端加上放大、调制、解调、滤波、均衡等设备如图 0—1 所示。图中这些设备都对信号起着变换和加工的作用。所以信号处理的目的是从观测到的（包含有噪声与干扰的）信号中提取信息，根据需要并以适当形式表示出来。如果这些处理设备系采用连续的模拟部件则称为模拟处理；如果将图 0—1 中的语音信号通过模数转换器（A/D）变成数字信号，并将系统中的模拟部件用数字电路置换，如用数字滤波器，数字调解器，数字均衡器等等，那么，这样的信号处理方法就称为数字处理。

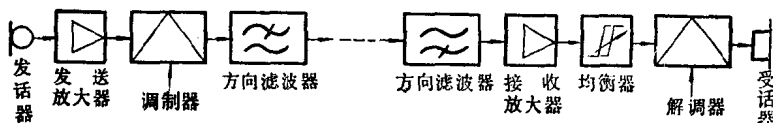


图 0—1 一个模拟处理的示意图

数字处理与模拟处理虽然在功能上有许多相似的地方，但在处理技术上和方法上却有很大区别。例如一个最简单的数字低通滤波器，其数学模型为

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

式中 $x(n)$ 与 $y(n)$ 分别代表滤波器在 n 时刻的输入与输出， $y(n-1)$ 代表比 n 早一个单位时刻的输出。该式表明：数字滤波器即时输出的数据，可以从即时输入与过去输出的数据通过乘、加运算来求得。因此，如果将系数 b 事先存贮在只读存贮单元内，把经延时后的输出作为过去的输出，再配置合适的乘法器和加法器，则数字滤波器的结构将如图 0—2 所示。为了使每一单元工作协调，图中还设有控制单元来控制数据的存取和交换。由此可见，一个数字滤波器主要是由存贮单元、运算单元（见图中实线方框内所表示）和控制单元三部分组成。它实质上类似一个

数字计算机，滤波器的数学模型只是提供运算规则而已。所谓数字信号处理，就是利用计算机或专用处理设备，以数值计算的方法对信号进行加工、变换，即用数字的方法对信号进行处理。因此当输入为模拟信号时，就必须通过 A/D 转换器转换成数字信号，对输入本来就是数据而且经量化编码后，码制符合计算机或专用处理设备的要求，就可以直接处理。信号的数字处理其优点除了精度高、性能稳定外，而且非常灵活，是模拟处理所不能实现的。如上述滤波器只要增加少量的延时单元和存贮单元（见图实线方框以外的延时单元），就能实现 2 阶以上的数字滤波。如果更改存贮单元的系数值，就能简便地改变滤波特性；如果硬件设备的运算速度足够高，还能实现多通道复用或多节复用。例如一个 2 阶节滤波器在 $T/3$ 时间内运算一次，连续运算三次（图中开关 SW 分别在 1, 2, 3 位置），完成三个 2 阶节运算功能，等效一个 6 阶节滤波器。此外，数字滤波器与模拟滤波器相比还具有没有介入衰耗，不需阻抗匹配，在甚低频易于实现等优点。总之，数字信号处理可以用硬件实现也可以用软件实现，实现的手段多、精度高、效果好，不仅可以取代模拟处理，而且许多功能是模拟系统所不具备的，所以在各学科技术工程领域获得极其广泛的应用。

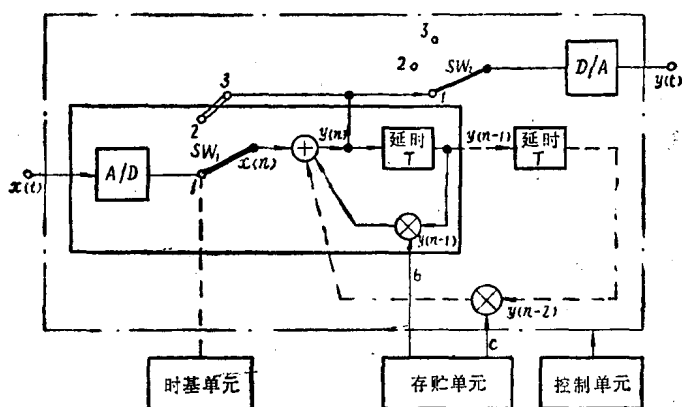


图 0-2 一个数字处理的示意图

数字信号处理研究的内容主要有以下三方面：

1. 谱估计，即对各种信号进行频谱分析，特别对随机信号所进行的谱估计。例如通过对振动信号的谱分析，确定主要频率成分，了解振动物体如机车、车辆、机床、桥梁、船舰等的特性，为设计及故障诊断提供必要的资料和依据。

谱估计的方法可划分为经典的与近代的两类。目前常用的有付里叶分析法，相关分析法和最大熵法等。

2. 数字滤波即在形形色色的信号中提取所需要的信号，抑制不需要的干扰。例如如何从被干扰淹没的雷达信号中滤除噪声干扰，提取回波信号，进而确定目标及其方位。

由于信息都带有随机的性质，而滤波过程又是尽可能地恢复被噪声干扰的消息源，所以滤波实质也是一类估计问题。所谓最佳滤波，如最小平方滤波、维纳滤波、卡尔曼滤波等，都是基于某个最优准则下（如最小均方误差）的估计问题。

数字滤波可分为频域滤波、时域滤波和空域滤波。它们大部分采用线性系统来实现。所谓非线性滤波是对具有非线性数学模型的信号所进行的滤波，如在空间通信和雷达跟踪系统中，由于信号是在随机时变信道中传输，因而对目标信号的相位和频率进行了随机调制。对这样信号的滤波只能采用非线性滤波的系统来实现。

3. 数据压缩即在一定条件下把原始信号所含有的信息数据进行压缩。例如通常一幅图象一般有30万个象素，每个象素灰度等级若以8比特计算，则一幅图象就会有240万比特数据信息。显然，这么大的数据量势必要求处理的设备具有很高的运算速度和庞大的存贮单元，所以为了解决这个问题，在处理技术上要求采取在保证正确接收的前提下，对原数据进行压缩。

实现一维和多维数据压缩可利用各种数学变换，如沃尔什变换、哈达玛变换、哈尔变换、斯兰特变换、卡库林—洛也夫变换等。

值得提出，信号除了用波形表示外还可以用参数信号模型来

描述，后者是目前数字信号处理研究的一个重要内容。所谓参数信号模型即用有限个参数构成的一个模型来表示一个信号。典型的有极—零模型，当输入为脉冲或白噪声，其输出则逼近一个信号。参数信号模型在数据压缩、解卷积、谱分析、模式识别与信号检测中都得到应用。

二、数字信号处理技术在实际中的应用

1. 语音处理 语音处理是数字信号处理技术最早得到应用的领域，它比较有效地用在语音加强与频带压缩等方面。所谓语音加强是通过提高信噪比达到保证可听度、减少疲劳度的目的。因此必须对语音与噪声的特性进行深入的了解，科学地提出语音的生成模型与感觉模型，如图 0—3 所示的数字声码器就是建立在语音的分析合成基础上，将波形复杂的语音信号通过付里叶变换，获得瞬时频率谱包络和谱的精细结构，进而用语音谱的某些参数来表征语音波形，然后编码传送。到接收端再根据参数进行综合，恢复成原来的语音信号。

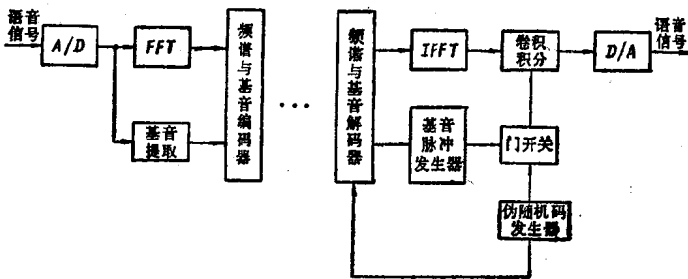


图 0—3 数字声码器示意图

目前随着数字信号处理技术的进步，语音处理用在保密通信，把语音波形变换成等价的书写消息，用语音操作打字机和利用计算机进行语音通信不断取得进展。

2. 通信系统 随着数据传输与数字通信的蓬勃发展，数字信号处理技术在通信领域已获得广泛应用，如为了得到可靠性

高、造价低的调制解调器，实现工作模式变化灵活并具有一定逻辑功能，目前采用数字信号处理技术已成为新一代话路调制解调和通信机的技术特征。

自从六十年代中期脉冲编码调制 (PCM) 投入使用以来，虽然数字通信发展很快，势将逐步地取代模拟通信，但目前通信方式尚处在从模拟到数字的过渡阶段。为了解决这两种通信体制的兼容问题，在通信系统中实现全数字化时分制与频分制 (TDM/FDM) 的复用转换也引进了数字信号处理技术。TDM—FDM 转换大多是在 FDM 超群上进行如图 0—4 所示，即将二个 30 路 PCM 群转换成 60 路 FDM 超群信号。因此数字信号处理技术被应用到包括调制解调器、数字滤波器、取样率变换以及快速付里叶变换等广阔的范围。

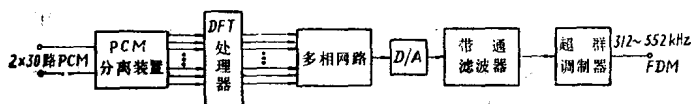


图 0—4 2×30路 TDM-60路 FDM 转换示意图

此外，获得比较成功应用的例子还有用来消除回音，提高通话质量的回声抵消器，如图 0—5 所示。图中混合线圈的作用是把发话人送来的语音信号，沿着从 $A \rightarrow B$ 方向的发送线路（因放大器是单向性的）传输到接收端。同时把从对方沿 $B \rightarrow A$ 方向传输来的信号，转送到用户。所以它起着把二线转换成四线和把四线转换成二线的作用。理想的混合线圈对发送出去的信号就不再回到发送端，但实际上并不理想，总是有回音存在，尤其当线路较长，如卫星通信，因延时长，回音听得很清楚，以致严重地影响通信质量。为此必须想法在终端接上回声抵消器将回声消除在远端。

回声抵消器系利用自适应数字滤波的原理，如图 0—5 虚线方框所示。图中 $x(t)$ ， $x_e(t)$ ， $\hat{x}_e(t)$ 和 $\varepsilon(t)$ 分别表示远端语音，实际的回音，估计的回音和它们之间的误差。通过自适应控制使抵消器系统的传输特性随信道与信号产生变化，达到最大限度