

一维和二维数字信号处理

V. Cappellini

(意大利佛罗伦萨大学电子-工程研究所和 IROE—C.N.R.)

摘要 本文研究了用于一维和二维信号处理的数字方法和技术。详细叙述了谱估计、数字滤波和数据压缩运算。指出数字信号处理运算可以用标准计算机(即软件)或专用数字处理器(即硬件)来具体实现。对最近发展起来的微处理器和电荷耦合器件的应用也作了讨论。作为典型例子,详细介绍了一些实现数字滤波和谱估计的数字处理器和它们在信号(音响、心电图)和图象(从地球资源卫星上来的、生物医学的)处理中的应用。

一、绪 言

最近十年,一维和二维信号(图象)处理有很大进展,并广泛应用到科学和实践活动的所有分支。

从理论和实践两方面来看,这个给人深刻印象的进展特别表现在一维和二维信号处理的数字方法和技术愈来愈重要。数字信号处理器在各个不同领域用得很多,如:电视通信、声纳——雷达、地球物理、生物工程、气象学、空间活动……等。这是由于几个原因:用数字方法和技术可以得到高效率;快速数字计算机和小型计算机的重大进展;由于高集成度数字电路、微处理器和电荷耦合器件(CCD)的发展降低了硬件装置的成本。

在一维和二维信号数字处理的不同方法和技术中愈来愈感兴趣的是谱的估算、数字滤波、数据压缩和编码^[1]。本文在叙述了这些数字信号处理运算的比较重要的性质以后,特别给出了完成这些运算的数字信号处理器的一般设计准则;研究了标准计算机、小型计算机(即软件)和专用数字处理器;还注意到了最近发展起来的微处理器和 CCD;详细叙述了完成数字滤波和谱估算的具体处理器;介绍了在信号和图象处理中的应用的例子。

二、数字信号处理运算

为了实现数字处理,信号必须是数字形式的。如果被处理的是模拟信号和图象,可以把它们作下列变换:

(a) “抽样”。根据抽样定理,对于一个谱的最高频率为 f_M 的一维信号 $f(t)$,要求抽样频

原文题目:“One/Two Dimensional Digital Signal Processors.”

率 $f_s \geq 2f_M$, 得到离散的时间信号抽样 $f(nT)$, 其中 $T=1/f_s$; 对于一个具有最大空间频率 f_M , (对 x)、 f_M , (对 y) 的二维信号(图象) $f(x, y)$, 要求抽样频率 $f_{s_1} \geq 2f_M$, (对 x)、 $f_{s_2} \geq 2f_M$, (对 y), 得到以 $X = \frac{1}{f_{s_1}}$ 和 $Y = \frac{1}{f_{s_2}}$ 抽样的离散空间图象抽样 $f(n_1X, n_2Y)$ (通常用同一个值 f_s , 它等于 f_{s_1} 和 f_{s_2} 中间较大的那一个, 抽样间隔为 $X = \frac{1}{f_s}$).

(b) “量化”。根据一维和二维信号的离散表示所要求的振幅精度, 如果 q 是量化台阶, 信号的振幅范围是通过 Nq 个离散振幅电平来表示的, N 是一个适当的整数。

(c) “编码”。根据所选择的数字表示一般采用二进制形式, 把量化振幅值变换成 n 个比特的字, $N = 2^{n1, 21}$ 。

一旦一维和二维信号通过模—数(A—D)转换器转换成一组数字以后, 就可以对它进行各种数字处理运算。图 1 给出一个数字处理器的简化结构(从输入端的 A—D 转换器接收数据), 它有三个主要部分: 一个对输入数据进行数字运算的运算装置, 一个按照所要求的时间间隔保持输入—输出数据的存储器, 一个一般的程序装置, 它控制运算按正确的时间顺序进行(按照给定的指令), 并保证各个部分的同步。如果需要的话, 数字处理器的输出数据可以通过数—模(D—A)转换器再转换成模拟形式, 这个数—模转换器按上述 (a)、(b)、(c) 三条考虑实行逆变换。

对一维和二维信号可以进行的几项重要的数字运算为: 谱估算, 数字滤波, 数据压缩和编码^{[1][2]}。

1. 谱估算

这里介绍对一维和二维信号以数字方式进行谱估算的几个方法。三个与模拟情况相

应的重要方法是: 付氏变换, 自相关, 带通分析^[1, 21]。

和模拟情况一样, 付氏变换是用得较多的方法。为了进行付氏变换的数字计算, 定义了离散付氏变换(DFT)。假定一维信号 $f(t)$ 表示为 N 个采样的序列 $f(n) = f(nT)$, $0 \leq n \leq (N-1)$, 把这个采样序列的 DFT 定义为另一个序列^[2, 31],

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-jkn(2\pi/N)} \quad (1)$$

这里, $F(k) = F(k\Omega)$ 代表连续付里叶谱 $F(\omega)$ 的采样, $\Omega = 2\pi/NT$ 是频域采样间的角频率增量。当 $0 \leq k \leq (N-1)$, 用 (1) 式计算 $F(k)$ 可得 N 个不同值。在此也存在一个逆的 DFT (IDFT), 它把 DFT 反演成原来的序列, 用下式给出:

$$f(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{jkn(2\pi/N)} \quad (2)$$

同前面一样, 在此 n 和 k 可以假定为仅有 N 个不同值。

考虑二维信号 $f(x, y)$, 把它表示成 $N_1 \cdot N_2$ 个采样的矩阵 $f(n_1, n_2) = f(n_1X, n_2Y)$,

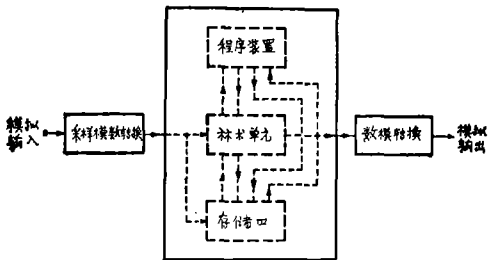


图 1 一个带输入、输出装置(A—D和D—A转换器)的数字处理器简化结构方块图

$0 \leq n_1 \leq (N_1 - 1)$, $0 \leq n_2 \leq (N_2 - 1)$ 。这个采样矩阵的 DFT 定义为^[3,4]：

$$F(k_1, k_2) = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} f(n_1, n_2) e^{-j k_1 n_1 (2\pi/N_1)} e^{-j k_2 n_2 (2\pi/N_2)} \quad (3)$$

在此, $F(k_1, k_2) = F(k_1 \Omega_1, k_2 \Omega_2)$ 代表连续付氏谱 $F(\omega_1, \omega_2)$ 的采样, $\Omega_1 = 2\pi/N_1 X$ 和 $\Omega_2 = 2\pi/N_2 Y$ 是频域采样间的角频率增量。当 $0 \leq k_1 \leq (N_1 - 1)$, $0 \leq k_2 \leq (N_2 - 1)$, 用(3)式计算, $F(k_1, k_2)$ 可得 $N_1 \cdot N_2$ 个不同值。DFT 的反变换(IDFT)现在由以下关系式给出(一维情况的推广)：

$$f(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1=0}^{N_1-1} \sum_{k_2=0}^{N_2-1} F(k_1, k_2) e^{j n_1 k_1 (2\pi/N_1)} e^{j n_2 k_2 (2\pi/N_2)} \quad (4)$$

在此, n_1 和 k_1 可取 N_1 个不同值, 而 n_2 和 k_2 可取 N_2 个不同值。

从实际观点出发, 感兴趣的是考察那些通过适当的数制^[2-4]可以用快速方法(FFT)计算的 DFT 和 IDFT: 对于 N 是 2 的乘方的一维快速付氏变换(FFT), 要求计算的次数正比于 $N \log_2 N$ 。对于 N_1 和 N_2 是 2 的乘方的二维 FFT, 要求计算的次数正比于 $2N_1 N_2 \log_2(N_1 N_2)$ 。

对于很多应用, 一个有效的谱估计方法是用数字滤波来实现带通分析: 计算每个带通滤波器输出的均方根值容易得到功率谱密度的估计。

2. 数字滤波

数字滤波代表对采样数据的一般线性滤波运算。一维数字滤波可以用下式定义^[1-4]：

$$g(n) = \sum_{k=0}^N a(k) f(n-k) - \sum_{k=1}^M b(k) g(n-k) \quad (5)$$

在此, $f(n) = f(nT)$ 是输入数据, $g(n) = g(nT)$ 是输出数据, $a(k)$ 和 $b(k)$ 是确定数字滤波器的系数, N 和 M 是整数。如果 $a(k)$ 和 $b(k)$ 不为零, 数字滤波器称为“递归的”, 而如果所有的 $b(k)$ 是零, 称为“非递归的”(或“横向的”)。

数字滤波器的一种重要的分类是按滤波器脉冲响应的持续时间, 可以分成两个主要类型: 具有有限持续时间的脉冲响应(FIR)的滤波器和具有无限持续时间脉冲响应(IIR)的滤波器^[1-4]。

利用 z 变换, 数字滤波器的传递函数 $H(z)$ 表示为:

$$H(z) = \frac{G(z)}{F(z)} = \frac{\sum_{k=0}^N a(k) z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^M b(k) z^{-k}} \quad (6)$$

在此, $F(z)$ 和 $G(z)$ 分别代表数据的输入和输出序列的 z 变换, 而 z^{-1} 是单位延迟运算。把 $z = e^{j\omega T}$ 代到(6)式中得到频响 $H(\omega)$ 。

二维数字滤波器可用下式定义^[1-4]：

$$g(n_1, n_2) = \sum_{k_1=0}^{N_1} \sum_{k_2=0}^{N_2} a(k_1, k_2) f(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - \sum_{\substack{k_1=0 \\ k_1+k_2 \neq 0}}^{M_1} \sum_{k_2=0}^{M_2} b(k_1, k_2) g(n_1 - k_1, n_2 - k_2) \quad (7)$$

式中, $f(n_1, n_2) = f(n_1 X, n_2 X)$ 是输入数据, $g(n_1, n_2) = g(n_1 X, n_2 X)$ 是输出数据, $a(k_1, k_2)$ 及 $b(k_1, k_2)$ 是确定滤波器的系数。与一维情况一样, 若 $a(k_1, k_2)$ 及 $b(k_1, k_2)$ 不等于零, 则称为

“递归”的；若 $b(k_1, k_2)$ 全等于零，则称为“非递归”的或横向的。同样，按其脉冲响应，二维数字滤波器也分为有限持续时间脉冲响应 (FIR) 滤波器和无限持续时间脉冲响应 (IIR) 滤波器。

二维数字滤波器的传递函数 $H(z_1, z_2)$ 是

$$H(z_1, z_2) = \frac{\sum_{k_1=0}^{N_1} \sum_{k_2=0}^{N_2} a(k_1, k_2) z_1^{-k_1} z_2^{-k_2}}{1 + \sum_{\substack{k_1=0 \\ (k_1+k_2 \neq 0)}}^{M_1} \sum_{k_2=0}^{M_2} b(k_1, k_2) z_1^{-k_1} z_2^{-k_2}} \quad (8)$$

把 $z_1 = e^{j\omega_1 x}$ 和 $z_2 = e^{j\omega_2 x}$ 代入(8)式可得频响 $H(\omega_1, \omega_2)$ 。

有很多方法和算法适用于一维和二维数字滤波器的设计。这些方法对于 FIR 数字滤波器(通常是非递归型的)和 IIR 数字滤波器(递归型的)一般是不同的。

FIR 数字滤波器可以设计成具有精确的线性相位，采用非递归方法实现时，这种滤波器总是稳定的；由系数和数据的有限字长带来的误差象在递归型 IIR 滤波器里那样重要。在设计 FIR 数字滤波器的若干方法中，有^[1-5]：

(a) “窗法”，要点是修改系数(乘以适当的权重因子)以减少频域里的 Gibbs 振荡；

(b) “频率采样方法”，在这个方法里，把频率响应的采样用作滤波器脉冲响应的 DFT (得到一个递归的结构)；

(c) “等纹波滤波器设计方法”，特别是为了使频率响应接近最佳契比雪夫近似(高效率的设计方法已由 Parks 和 McClellan 给出^[6])。

上面的方法可以用来设计一维 FIR 数字滤波器(对此，其它的方法也适用)，在进行适当修正和推广以后，也可用于设计二维 IIR 数字滤波器。为了后面这个目的，McClellan^[7]提出了一个有效的方法：通过以下关系式可把一维滤波器变换为二维滤波器：

$$\cos \omega = A \cos \omega_1 + B \cos \omega_2 + C \cos \omega_1 \cos \omega_2 + D \quad (9)$$

A、B、C、D 为适当的系数。

为设计 IIR 数字滤波器，必须清楚区分一维和二维滤波器，因为代数学的基本定理不能推广到二维情况。在设计一维 IIR 数字滤波器的不同方法中，有^[1-5]：

(a) “通过直接的 z-变换设计” 这个方法所采用的从拉普拉斯 s-平面到 z-平面的变换是不变脉冲响应型的，它给出的数字滤波器具有的脉冲响应等于相应模拟滤波器的脉冲响应。

(b) “通过双线性 z-变换的设计” 在这个方法中采用双线性 z-变换，它给出的数字滤波器的频响等于模拟滤波器的，而频率刻度带有非线性收缩。

对于二维 IIR 数字滤波器，有几种设计方法可以给出稳定的递归滤波器：连续区域象法^[8]，差分修正法^[9]，合适的二维谱因子分解法^[10]，利用四个稳定的单象限滤波器的 McClellan 变换(9)式^[11]。

3. 数据压缩

在一维/二维信号的数字处理中一个重要的问题是，在数据的实际处理运算和存贮、归档中需要考虑和使用的数据量太大。一种称为数据压缩的数据变换可以解决这个问题(至少是部分地解决)。这种类型的变换减缩没有用的或重复的数据的数量。如果数据被传输，也可作到减小传输所必需的带宽。

有许多类型的数据压缩方法和技术。作为一个大的划分，我们可以把它们分成两类：

(a) “熵保持不变的数据压缩方法”，它可以是可逆的，在解压缩以后允许恢复全部原始数据(一维/二维采样)*；

(b) “熵减少的数据压缩方法”，它是不可逆的，在解压缩以后任何情况下都要使一些原始数据模糊。

一些重要的可逆方法是：自适应采样，预测，内插，编码(delta调制，微分脉码调制……)，覆盖整个谱的多路滤波，付氏分析，各种变换的利用(Hadamard, Walsh, Haar, Slant, Karhunen-Loeve…)。一些非可逆方法是：参量提取，门限，功率谱^[13]。

预测—内插算法是特别感兴趣的，因为它们的实现过程比较简单。在预测过程里要用前面的采样知识，而在内插中利用了前面的采样和下一个采样的知识。在这两种类型的运算中，是把预测的或内插的采样或数据与实际采样比较：如果二者的差值在允许的误差容限之内，则认为预测或内插是正确的，不保留实际采样；超过了误差容限，采样才保留下来^[12,13]。预测的两个简单情况是零级预测(ZOP)和一级预测(FOP)。前者特别简单，它仅用一个已知采样，后者用两个已知采样。一种更复杂的预测型算法是线性自适应预测，其中预测采样是通过给定的—组采样进行线性加权得到的，即：

$$g(n) = \sum_{k=1}^N a(k) f(n-k) \quad (10)$$

其中， $f(n)$ 是前面的采样或数据； $g(n)$ 是预测采样； $a(k)$ 是权重系数(一般由使均方预测误差最小来决定)； N 是一个整数。很明显，关系式(10)和非递归数字滤波器有相同的结构。

如上所述，为了得到一维或二维的数据压缩，可以利用各种变换(Hadamard, Walsh, Haar, Slant, Karhunen-Loève…)。通常，某种数据压缩是在变换后的空间用门限和对被变换数据组作可变量长编码(对于图象，相应于被处理图象的子面积)等方法来完成的。所以，简单的门限消除(把小于给定值的被变换值取消)常常给出明显的压缩比，因为大部分被变换值是集中在一个小的间隔和区域里的。

三、数字信号处理设备

任何数字处理运算，特别是以上研究过的那些，可以用下面两个主要解决办法来实现：

- (a) 用标准计算机或小型计算机(即软件)；
- (b) 用专门类型或专用的数字处理器(即硬件)。

还可以利用最近出现的微处理器和微计算机形成介乎两者之间的或混合的解决办法，在这里软件和硬件方法紧密联系在一起。为了设计和制成满意的数字信号处理器，要求对于这两者(软件和硬件)有完备的知识。因为后者的出现，下列三种办法都被看作是实现数字信号处理的主要手段：用标准计算机或小型计算机；用专门类型的处理器；以及用微型处理器和微计算机。

* 象通常规定的那样，可逆的方法定义为，在极限情况下给出无误差再现，但也可采用给定再现误差(决定于这个方法的参数值)的定义。——原注

1. 标准计算机或小型计算机的应用

数字信号处理运算可以用标准计算机或小型计算机根据所需要的处理运算适当选用软件包来实现*。

用标准计算机作数字信号处理的优点是：用修改程序的办法，同样的机器或计算机系统可以完成任意的数字信号处理。进一步说，在实际程序里插入一些初级部分，它们不是用于处理而是用以确定所要求的处理运算的结构。例如，为要进行数字滤波，程序的一部分首先计算对于这种特殊应用比较适合的数字滤波器。图 2 给出一维信号处理用的契比雪夫型递归数字滤波器程序的流程图。

但是用标准计算机作数字信号处理可能出现另外类型的问题和限制。先不管这种方法的规模和代价，问题在于计算机系统(内部机构)的速度有限，以致于连续信号或采样数据(二进制字)不能用图 1 的一般结构来进行“实时”处理，而只能在信号数据组被采集到以后，在延迟了的时间间隔内进行数字处理。这些问题已经用最新一代的计算机特别是一些最新型号的小型计算机部分地解决了。这些小型计算机的特点是规模比较小(一个标准机壳或更小)，处理速度比较高(周期为 0.1—1 微秒)。

用数字计算机进行信号处理的另一个特点是可以将不同的计算机和处理器联接起来以取得更高的效率：例如把一部或多部小型计算机联接到一个比较大的计算机上，数据经过适当的预处理以后才送给大计算机，或者用专门的快速处理器完成对数据的预处理，然后送给小型计算机。

2. 专门用途的数字处理器的应用

一种专门类型或专门用途的数字处理器，其结构被设计成以最好的方式来解决信号处

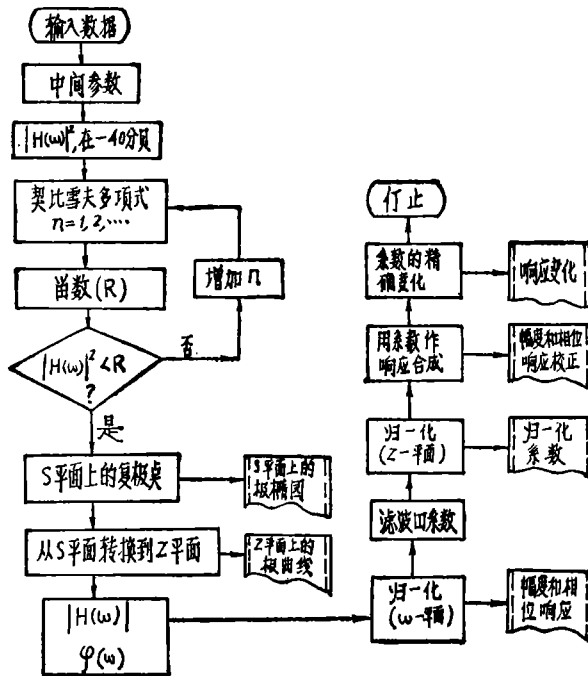


图 2 通过几级(子程序)的契比雪夫型一维递归数字滤波器程序流程图

* 计算机的一般结构象图 1 给出的那样，现在三个主要部分(运算装置、存储器、程序器)分成若干可以获得更大处理灵活性的子装置。—原注

理的某一特殊的或一些专门的问题。由于这是比较专门的手段，这个解决办法是上面讲的标准计算机的补充。

采用这种方法在处理的灵活性方面受到限制，而且复杂的运算一般不能完成。但它的规模小、价格低、处理速度快。

专门类型的处理器的一般结构也象图 1 所示的那样。处理器的具体结构由要实现的运算和所采用的硬件部件来决定。根据在处理器内部完成基本运算的方式，可将处理器分为两类：

- (a) “串行处理器”，基本运算是在相继的时间间隔里以串行方式完成的。
- (b) “并行处理器”，基本运算是在同一时间间隔里以并行方式完成的。

很明显，(a)处理器比(b)处理器经济，而后者处理速度快。图 3 给出的是专门类型数字处理器的一个例子，它完成一维非递归数字滤波或自适应线性预测（用于后者时一般没有输出采样存贮器），采用并行结构的乘法器（输入字的对应比特并行相乘）。

串-并行处理结构可以从基本的内部运算扩展到处理器的一般结构。图 4 给出一个专用处理器的例子，它通过数字滤波完成谱的估算，如第二(1)节中所述：使用单个数字滤波器按时间顺序给出每个带通滤波器的输出采样（第一组 m 个值，第二组 m 个值……）。处理器用这样的方式设计：以均方根值表示的谱估计通过多路调制器用 POM（脉码调制）格式传送到接收终端。如果包含在短时间谱估计里的信息对一个特殊的信号识别是足够的，那么图 4 的处理器可以很有效地获得大的压缩比或减少传输所要求的带宽^[12,13]。

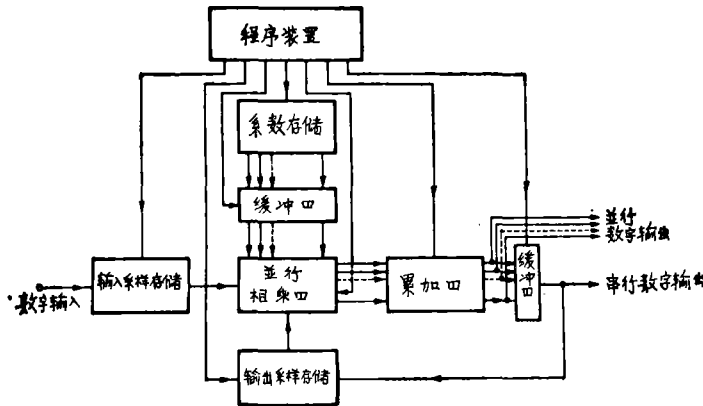


图 3 一个专用数字处理器的方块图，它可实现一维非递归数字滤波或自适应线性预测，具有并行结构的乘法器

数字处理器发展的一个重要方面如早已指出的那样，是所能达到的高处理速度。推广上面考虑过的并行处理器概念，“阵列处理器”已经研制出来并正在普遍设计制造，尤其是用于二维信号或图象的处理。阵列处理器在所有的结构里并行使用硬件：许多基本的专用处理器并行处理输入数据。在图象处理中，目的是建立一个基本处理器的大阵列，给每一个图画单元分配一个处理器或“单元”。用于图象处理的程序可控单元阵列的第一

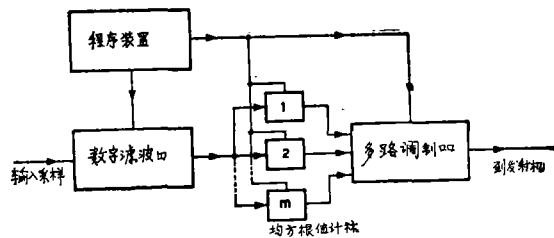


图 4 一个用谱估计和数据压缩的数字处理器

个实用设想是 Unger 在 1958 年提出来的^[14]，随后研究出了很多其他方法，特别是 Duff 设计制造的几种系统 (CLIP 阵)^[15] 速度很快，有可能较好地解决数字信号处理方面的若干问题(如图象识别)。

专用型数字处理器的发展与电子器件的技术进步和提高有紧密的联系(在某种意义上甚至标准计算机与后者的联系)。最近几年，半导体技术有了重大进展，特别是数字集成电路的出现：从标准的单功能集成电路、中等规模集成电路(MSI)和大规模集成电路(LSI)到上千个基本电路集成在同一个基片上，实现复杂功能(如同下面要研究的微计算机和微处理器)。新的高集成度器件的一个令人注意的方面是：许多情况下，运算速度的提高有了保证。

与电路集成度得到提高的同时，研制出了对信号和图象处理很有用的新器件或专用元件。在这方面的三种重要的元件和器件是：电—光元件、声表面波器件(SAW)和电荷耦合器件(CCD)。

电—光元件可以容易地把电信号转换为光信号，如发光二极管(LED)，光敏二极管，雪崩光检波器(APD)，半导体激光器，薄膜声光器件，光学纤维，……等^[1,16]。这样一来，处理结构可以定为用光系统进行很快速的预处理，然后用数字处理器作精确处理。

声表面波器件(SAW)具有其他方法不能得到的高频(VHF—UHF)信号处理功能。快速声电卷积器(在高频替代 FFT 处理器)、平面晶体 SAW 滤波器(在 VHF—UHF 范围取代模拟滤波器)可以用修改过的与集成电路相容的微电路技术来制造。

电荷耦合器件(CCD)是最近出现的有意义的离散时间元件，用它可以制成具有低成本、小尺寸和低功耗的离散时间处理器^[16]。它实质上是采样数据的模拟延迟线。使用 CCD 的一个基本部件是 CCD 横向滤波器，它的运算用关系式(5)来描述，其中所有的 $b(k)$ 是零，而 $f(n)$ 和 $g(n)$ 是连续模拟信号 $f(t)$ 和 $g(t)$ 的模拟采样。因此，它们提供了实现横向滤波器的另一个解决办法。这种滤波器在第二(2)节中论及数字滤波器时已描述过。进一步说，CCD 容易与集成电路(MOS)组合，以便得到复杂的信号处理功能。把 CCD 横向滤波器和 MOS 乘法器加在一起可以实现 DFT 的线性调频 z -变换算法，得到低成本的谱估算器(如第二(1)节所描述的)。CCD 在图象分析和处理方面的很多应用也得到了发展。

作为硬件信号处理的一般趋向(特别是用离散的方法和技术)，我们看到，应用的频率范围可以分成三个主要区域：低频区，数字处理可以用高集成度的数字电路来实现，而离散时间处理用 CCD；中频区，可用以上所说的两种类型的处理而 CCD 办法更方便；高频区，SAW 器件表现出更多的好处。中频区的具体数字是 1—20 兆赫。

3. 微处理器和微计算机的应用

象上面已经观察到的那样，微处理器和微计算机(计算机在一个基片上)的出现是最近打开的一个数字信号处理的新途径，从此软件和硬件两者紧密连系起来了，要实现有效的数字处理器需要这两方面的知识。

按照图 1 的一般结构，微处理器的基本组成是一组寄存器和算术运算器，它们由译码器和时序发生器控制的适当数据通路来互相连接。这样的基本结构见图 5，它用了—个简单的微处理器，还有一个存储程序的存储器^[17]。程序指令存在存贮器里，在程序计数器(PC)的控制下按时间顺序执行。在一个标准工作步骤里，首先按 PC 指定的地址把存贮器的存数转到指令寄存器 IR 中，PC 的存数同时加 1 (PC 起程序寄存器的作用)。由外部时钟同步的控制单元触发全部转移器并向存贮器发出需要的信号。操作顺序一般用时间图表示。

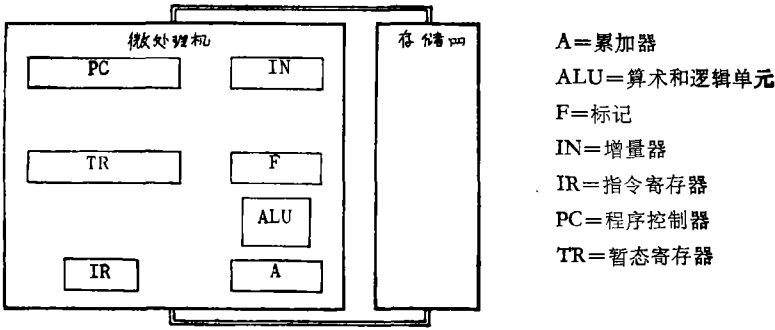


图 5 有一个存贮程序的存贮器的微处理器的基本结构

随着微处理器的发展引入了一些微程序术语：微程序（直接控制微处理器的每个功能元件的操作的那类程序），微指令（存在微程序存贮器里的比特图），微指令序列（微程序控制单元(MCU)从微程序中选出执行单个宏指令或控制命令的微指令串），宏指令（或是常规计算机指令，或是设备控制指令）。

微处理器采用 4 比特、8 比特、16 比特的字长，工作频率 10 兆赫，具有上百条指令的程序容量。把它们和标准 LSI 存贮器（动态的、静态的）组合起来可以容易地制成高性能的、有最少附加逻辑电路的数字处理器。几个微处理器可以串联或并联成阵列，形成微处理器系统，解决更复杂的问题。

目前微处理器可以以单个或多个组合的方式解决数字信号处理的很多问题（谱估算、数字滤波、数据压缩）。更进一步，可以把它们放在模拟处理系统里完成专门的功能，如自适应。最有兴趣的混合式处理器可以解决下列问题：自适应滤波，自适应均衡，自适应数据压缩等。

四、实现数字滤波和谱估计的专用处理器

作为专用数字处理器的实例之一，我们来描述叫做 ANPAD 的处理器。它是佛罗伦萨的 IROECNR 设计和制造的。这个处理器可以完成带通分析、谱估计和信号识别。这个处理器基于一种将采样信号谱逐级频移和采样逐级二分的特殊算法，并采用单个数字滤波器（用的方法与图 4 接近）。

这儿考虑的算法要求采样频率 $\omega_s = 2\omega_M$ ， ω_M 是限制输入信号谱的最大角频率。输入采样 $f(n)$ 乘以 $(-1)^n$ ，相应于被采样的信号谱频移了 ω_M ，此算法利用了这个性质^[5]。因此，用一个具有截止频率 $\omega_c = \omega_M/2$ 的单个低通数字滤波器，有可能在对原始输入采样 $f(n)$ 的第一次运算中得到谱的低频部分（0 到 $\omega_M/2$ ）。对乘过 $(-1)^n$ 的 $f(n)$ 采样作第二次运算，谱的高频部分（ $\omega_M/2$ 到 ω_M ）移到低频区域。同样的程序可以在所得到的两组输出采样上重复，在每一组里，对相继的采样二中选一（二分程序）。这个方法每次减小采样率一倍，同一个单个低通滤波器可以实现不同的带通滤波。实际上我们可以用树状结构把信号谱分为许多带；如果连着执行 r 次运算，则得到具有恒定带宽的 2^r 个频带（如果每次顺序运算仅给出一个带，则得到部分带宽的 r 个带通分析）。

按照以上所描述的算法设计和制造了一个数字带通分析器(图 6)，可完成 16 个频带的分

析。分析器有一个输入模-数转换器，它给出 8 比特的字的采样数据（7 比特用于振幅，1 比特用于符号），以及 16 个数-模转换器（一种专用数字线性内插器，在两个相邻的采样之间插入多级阶梯，也可用于输出^[5]）。采用 MSI 和 LSI 集成电路，可实时处理的输入信号的最高频率为 4 千赫。

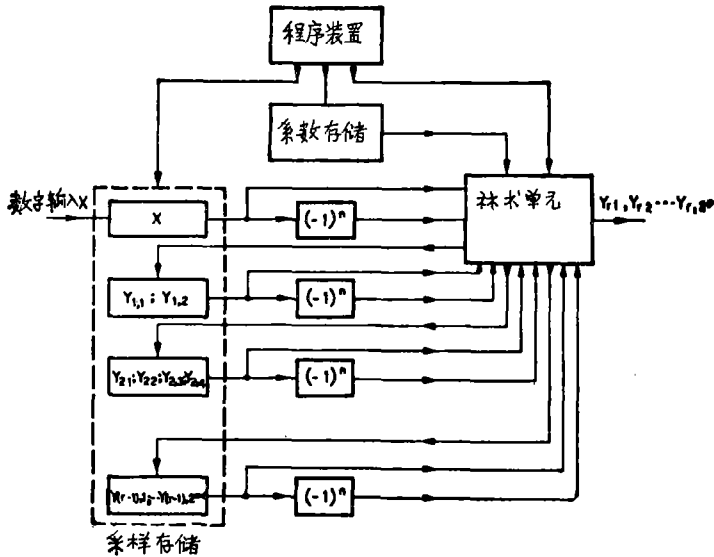


图 6 数字带通分析器的方框图

上述分析器的一个有意义的方面是，可以容易地用计算每个带的输出的均方根值来得到谱估计（通过一个由乘法器、累加器、N 倍除法器—N 是用来计算均方根值的采样数—以及实现平方根运算的电路组成的硬件来得到）。如果把表征已知信号短时间谱的 16 个均方根值预存在存储器里，并把它们实时地和输入信号比较，还可进一步进行信号识别。在带通分析器后面还串接了 2 个专门设计和制造的数字处理器，从而组成一个具有三个数字处理器的独特系统。

五、一维和二维数字信号处理器的应用

象在绪言里所说的那样，数字处理器可以用在科学和实践活动的很多方面，完成一维信号（音响、心电图、脑电图、雷达-声纳…）和二维信号及图象（从地球资源卫星来的、生物医学的、气象学的图象）的有效处理。

图 7 是一维信号数字处理的一个例子（用硬件），它是用前面叙述过的 ANPAD 系统对心电图信号作低通滤波（截止频率为 30 赫）。二维信号数字处理的例子示于图 8（用软件），它是用快速 Walsh 变换对地球资源卫星的接收图象（由 TELESPAZIO 给出）进行数据压缩的结果（示于 b）；按照第二(3)节的说明，在 4×4 的正方形里对变换值作可变字长编码，给出压缩后的象平均字长 1.30 比特/采样，相应的原始字长是 5 比特/采样（象是用 10 个灰度级来表现的）。

