

《仪器系统设计基础》第四讲

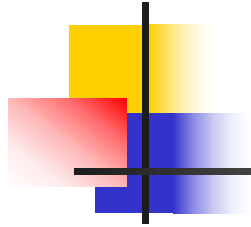
数字信号处理技术

仪器科学与工程系专业必修课

主讲： 宋开臣 教授

kcsong@zju.edu.cn

13600513662

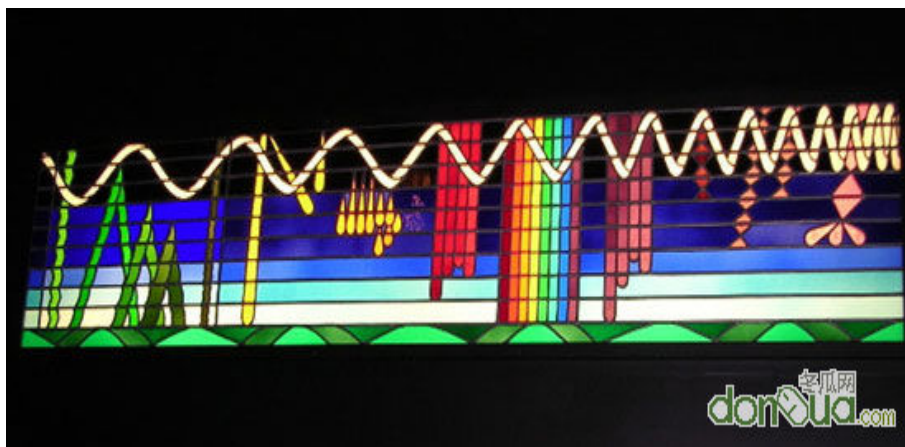
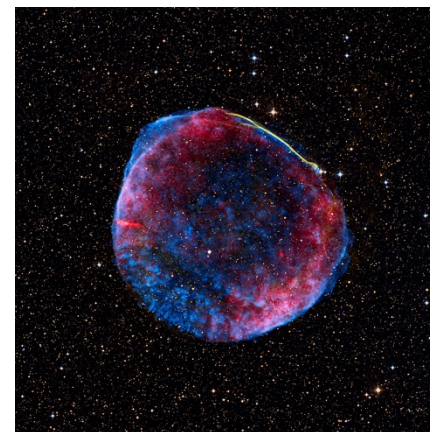


数字信号处理技术与嵌入式系统

- 一. 数字信号处理的概念
- 二. 常用数字信号处理方法
- 三. 数字信号处理器

一. 数字信号处理的概念

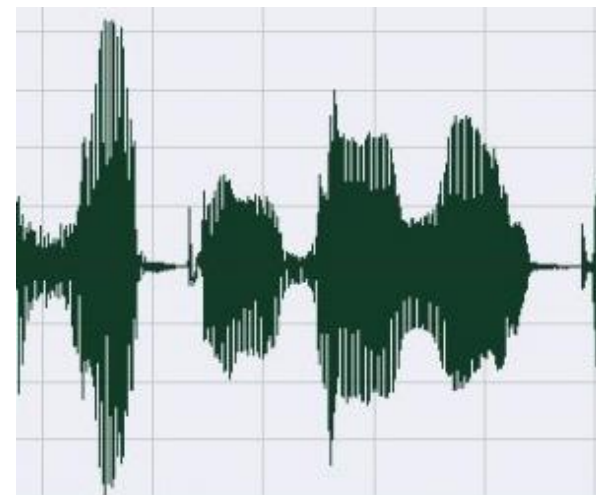
1. 信号的概念
2. 数字信号处理的概念和种类
3. 数字信号处理系统



1. 信号的概念

- **信号**是一种物理体现。在信号处理领域中，信号被定义为一个随机变化的物理量。

如：话筒--->放大器-->扬声器

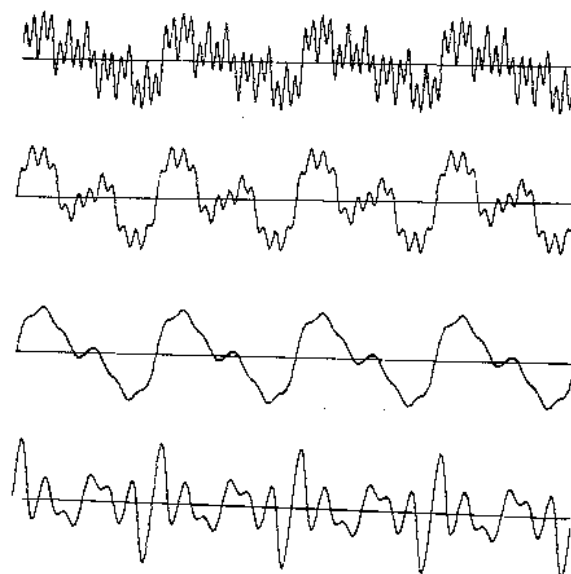
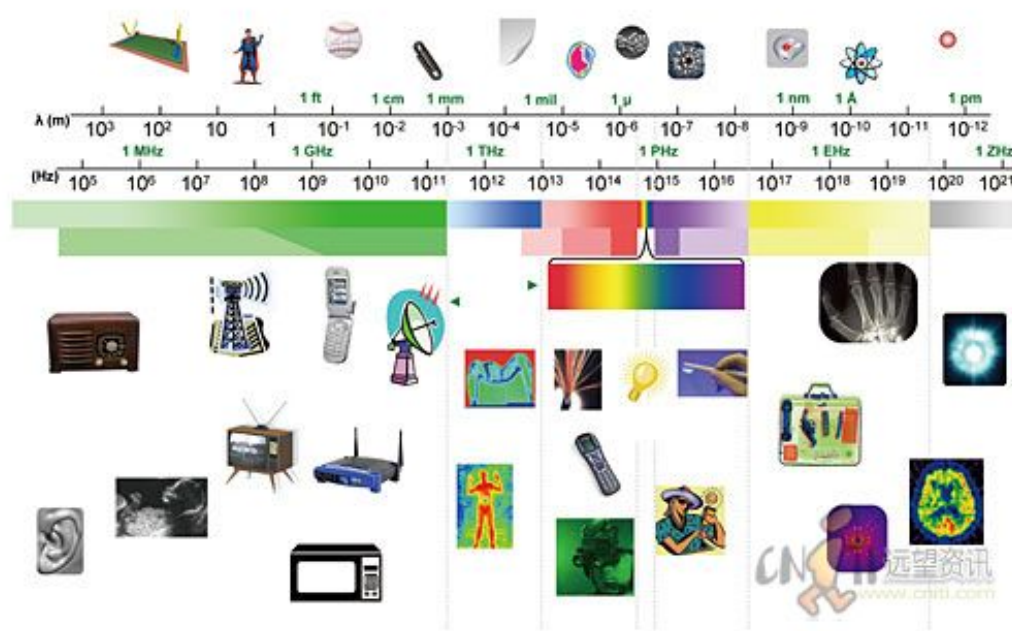


信号的分类

(1) 连续信号和离散信号

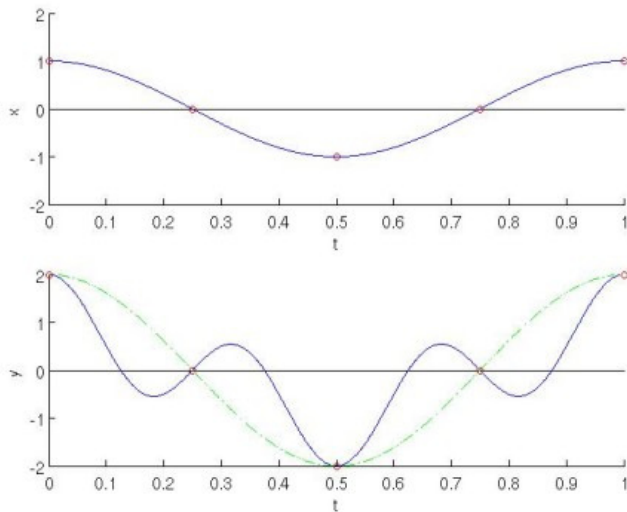
(2) 模拟信号和数字信号

(3) 确定性信号和随机信号



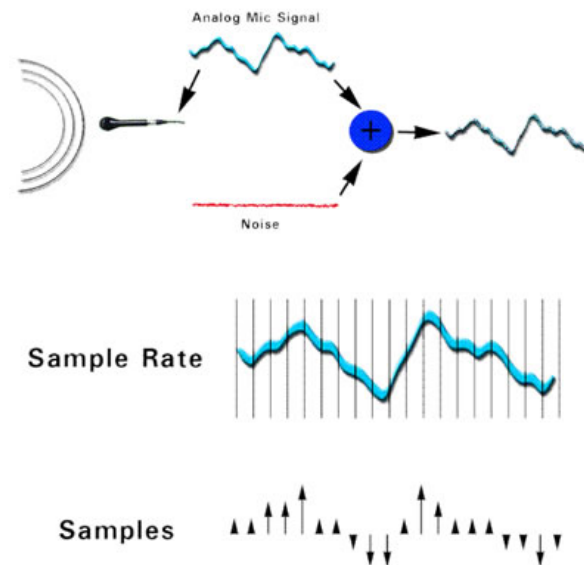
(1) 连续信号和离散信号

- **连续信号**：指随时间信号而连续变化的信号。
- **离散信号**：只有在离散的时间点有确定的值。
它通常都是通过对连续信号采样而得到的。



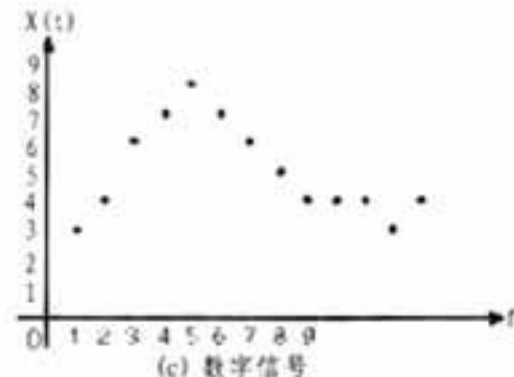
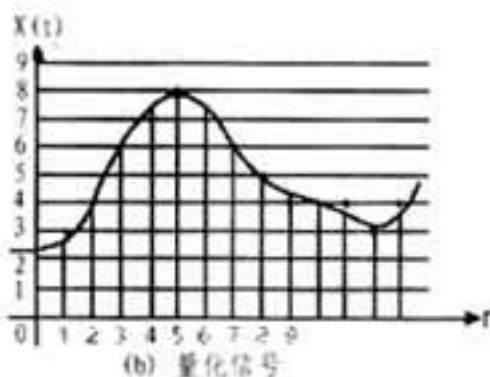
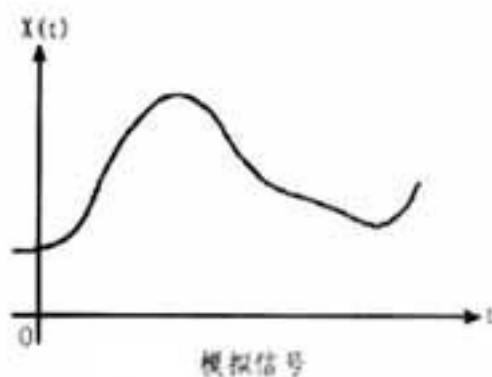
BOKEE PHOTO

<http://photo.bokee.com/karlchen>



(2) 模拟信号和数字信号

- **模拟信号**：指幅度连续的信号，通常指时间和幅度上都是连续的信号。
- **数字信号**：时间和幅度上都是离散的信号。





(3) 确定性信号和随机信号

- **确定性信号**：它的每一个值可以用有限个参量来唯一地加以描述。

例：直流信号：仅用一个参量可以描述。

阶跃信号：可用幅度和时间两个参量描述。

正弦波信号：可用幅度、频率和相位三个参量描述。

- **随机信号**：不能用有限的参量加以描述。也无法对它的未来值确定地预测。它只能通过统计学的方法来描述（例如：概率密度函数来描述）。

例：许多自然现象所发生的信号、语音信号、图象信号、噪声一般都是随机信号。它们具有幅度（能量）随机性、或具有发生时间上的随机性或二者兼有之。



2. 数字信号处理的概念和种类

- 数字信号处理就是用数值计算方法对数字序列进行各种处理，把信号变换成符合需要的某种形式。
- 凡是利用数字计算机或专用数字硬件、对数字信号所进行的一切变换或按预定规则所进行的一切加工处理运算。

数字信号处理的种类

- 滤波
- 变换
- 压缩
- 估计
- 识别

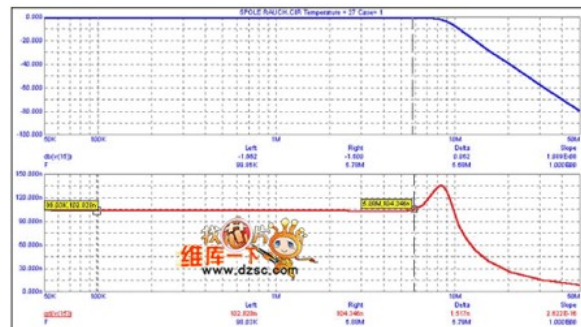
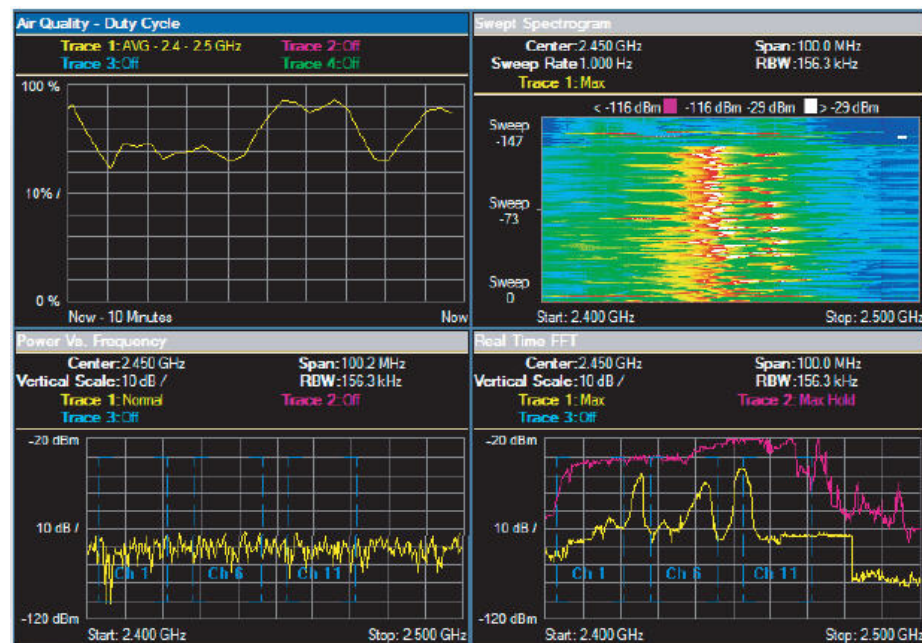
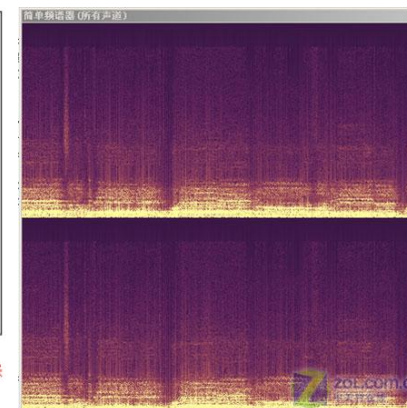


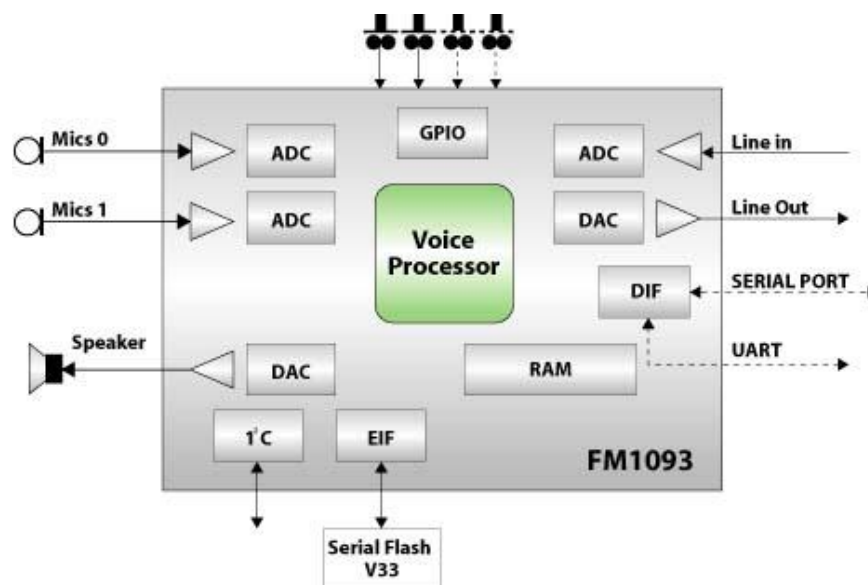
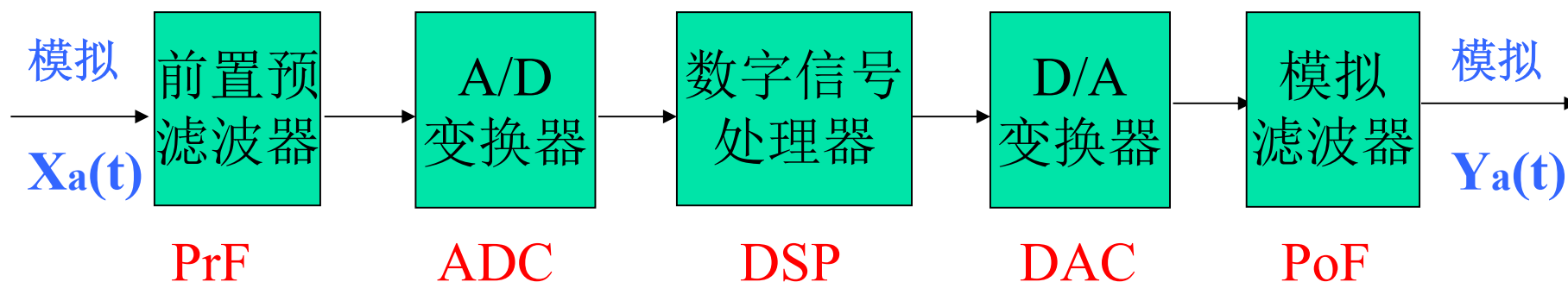
图 3b) 输出响应

图 3 此原理图(a)与输出响应(b)表示的是针对 ITU-601 标准滤波的 5 极点, 5.75MHz Butterworth 滤波器, 采用的是 Rauch 电路与延时均衡器。



3. 数字信号处理系统的组成

模拟信号的数字化处理系统:





二. 常用数字信号处理方法

1. 离散傅立叶变换 (**DFT**)
2. 快速傅立叶变换 (**FFT**)
3. 数字滤波器 (**FIR**滤波器、**IIR**滤波器)
4. 现代智能信号处理方法介绍

1. 离散傅立叶变换 (DFT)

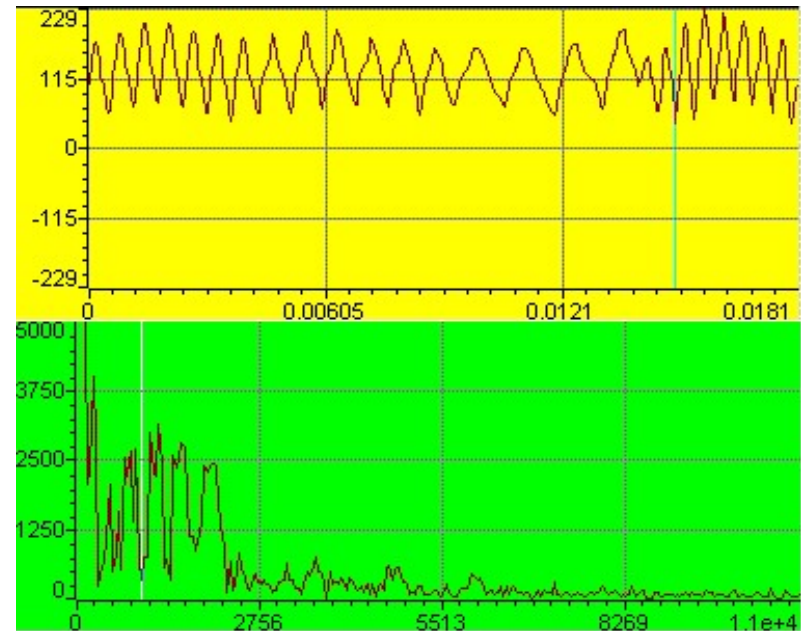
- 连续形式的傅立叶变换

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i\omega x) f(x) dx$$

- 离散傅立叶正变换

$$X(k) = DFT[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk}$$

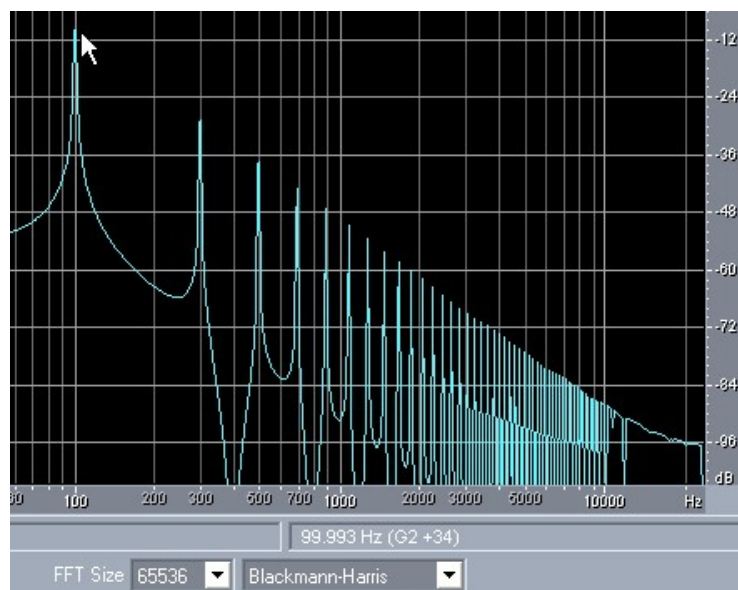
- $X(k)$ 、 $x(n)$ 为有限长序列的离散付里叶变换对，已知其中一个序列就能确定另一个序列。



离散傅立叶变换 (DFT) 的应用

- (1) 用DFT计算线性卷积
- (2) 用DFT去逼近连续信号
- (3) 用DFT进行频谱或功率谱分析

三角波频谱





FFT的诞生

- 1965年库利--图基在<计算数学>、**Mathematic of Computation** 杂志上发表了著名的“机器计算付里级数的一种算法”文章，提出一种快速计算**DFT**的方法和计算机程序，由此揭开了**FFT**发展史上的第一页，促使**FFT**算法产生原因还有1967年至1968年间实现**FFT**的数字硬件制成。



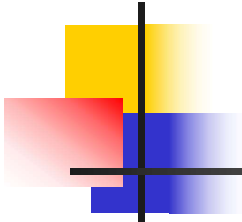
2. 快速傅立叶变换 (FFT)

- **FFT并不是一种新的变换形式，它只是DFT的一种快速算法。**并且根据对序列分解与选取方法的不同而产生了**FFT**的多种算法。
- **FFT**在离散傅里叶反变换、线性卷积和线性相关等方面也有重要应用。



基-2按时间抽取的FFT算法

- 设输入序列长度为 $N=2^M$ (M 为正整数，将该序列按时间顺序的奇偶分解为越来越短的子序列，称为基2按时间抽取的FFT算法。也称为Coolkey-Tukey算法。



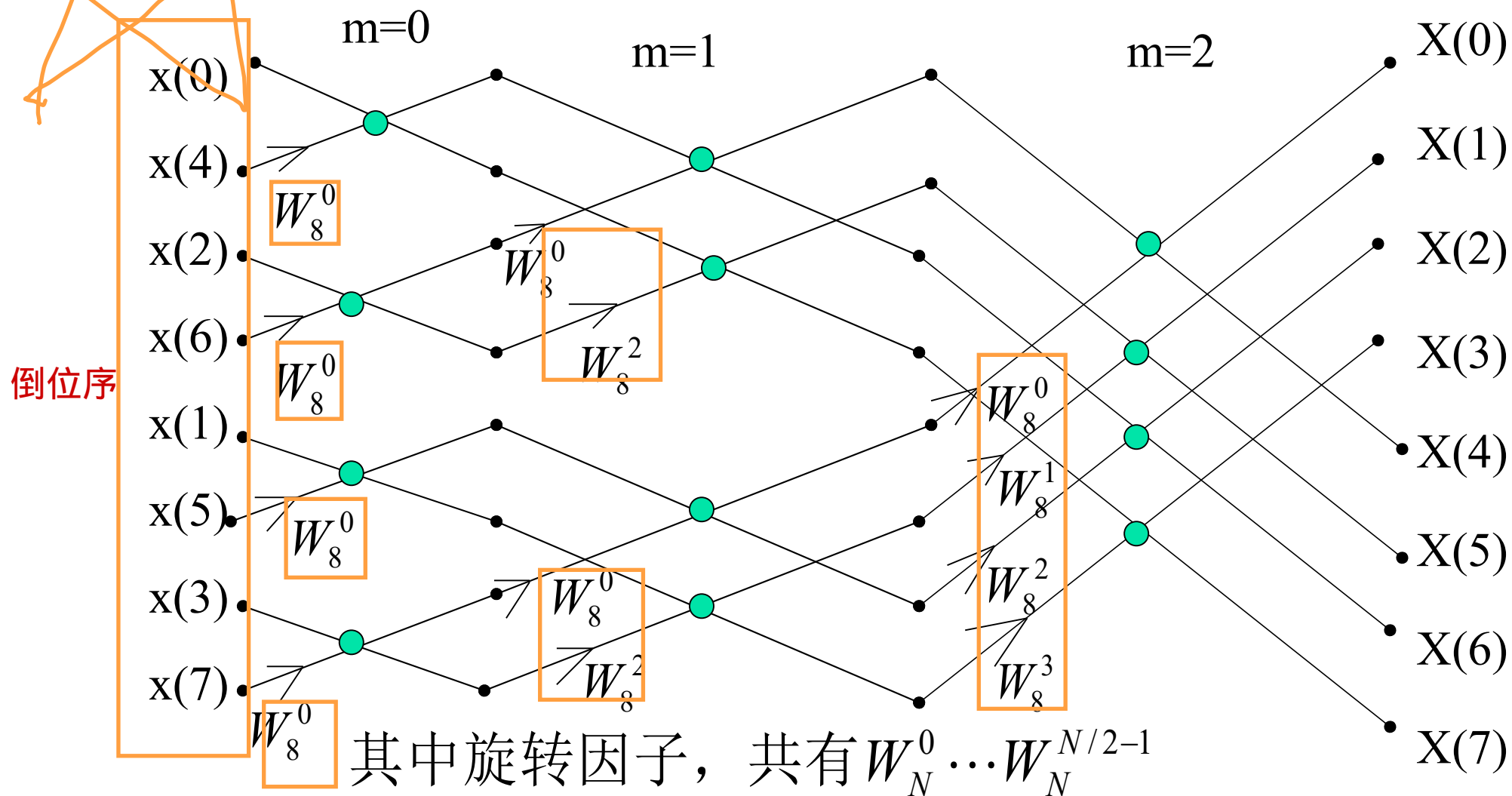
例子：求 $N=2^3=8$ 点FFT变换

- $N=8$ 点的直接DFT的计算量为： N^2 次(64次)复数相乘， $N(N-1)$ 次($8 * (8-1)=56$ 次)复数相加。共计120次。
- 分解为两个 $N/2=4$ 点的DFT的运算量：

8点FFT求 $X(k)$ 共需 $\frac{N^2}{2} + \frac{N}{2} = \frac{N(N+1)}{2} \approx \frac{N^2}{2} = 36$ 次复数乘法,

$N(\frac{N}{2}-1) + N = \frac{N^2}{2} = 32$ 次复数加法, 共计为68次。看出仅做一次分解就可以节省约一半计算量。

一个完整N=8抽取FFT的运算流图



FFT的应用

- 凡是利用付里叶变换来进行分析、综合、变换...的地方，都可以利用**FFT**算法来减少其计算量。

- **FFT**主要应用在

- (1) 快速卷积
- (2) 快速相关
- (3) 频谱分析

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(x - \tau) d\tau$$



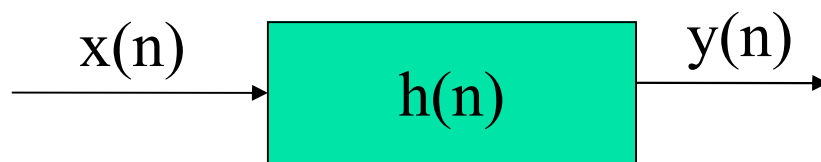


3. 数字滤波器

设 $x(n)$ 是系统的输入， $X(e^{j\omega})$ 是其付氏变换。

$y(n)$ 是系统的输出， $Y(e^{j\omega})$ 是其付氏变换。

则：



则线性系统的输出为：

$$y(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(n-m)x(m) = F^{-1}[X(e^{j\omega})H(e^{j\omega})]$$

看出：输入序列的频谱 $X(e^{j\omega})$ 经过滤波器

(其系统性能用 $H(e^{j\omega})$ 表示) 后变成 $X(e^{j\omega})H(e^{j\omega})$

选取 $H(e^{j\omega})$, 使滤波器输出 $X(e^{j\omega})H(e^{j\omega})$ 符合我们的要求,
这就是数字滤波器的工作原理。

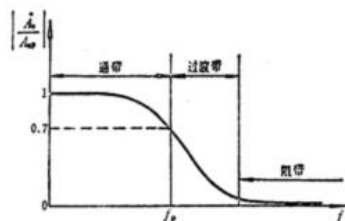


数字滤波器的分类

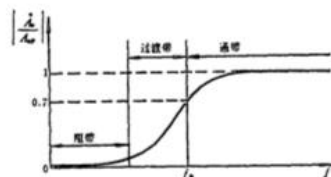
滤波器的种类很多，分类方法也不同。

1. 从功能上分；低通、高通、带通、带阻。
2. 从实现方法上分：**FIR、IIR**
3. 从设计方法上来分：**Chebyshev(切比雪夫)**, **Butterworth (巴特沃斯)**
4. 从处理信号分：经典滤波器、现代滤波器

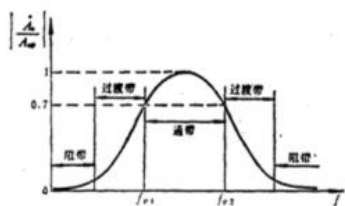
数字滤波器的幅频特性



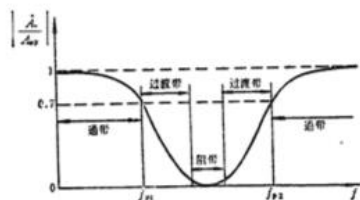
低通 LPDF



高通 HPDF



带通 BPDF



带阻 BSDF

数字滤波器的设计方法

以低通滤波器为例：

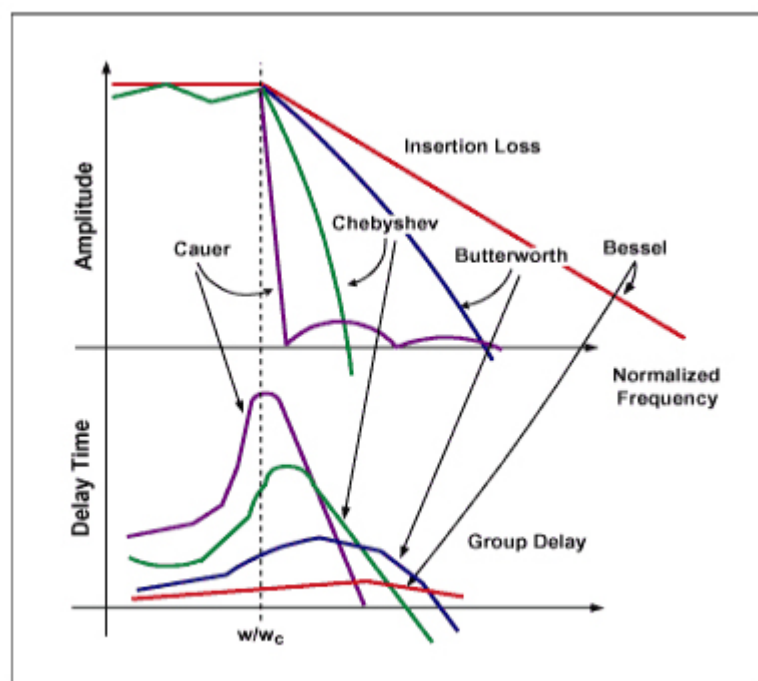
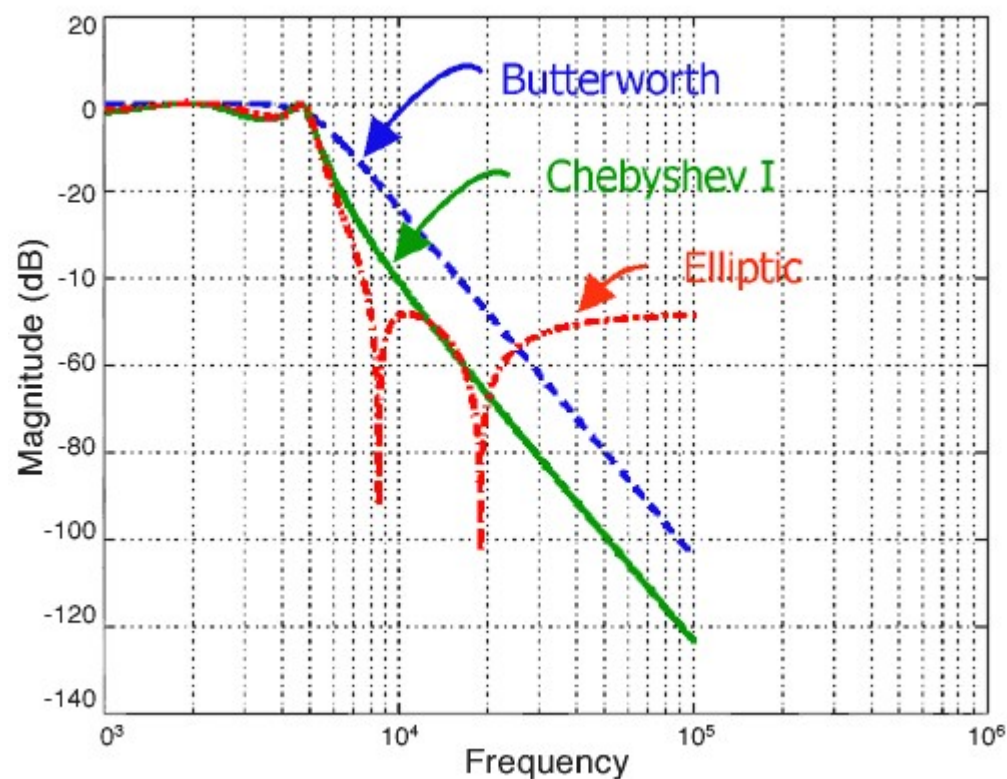
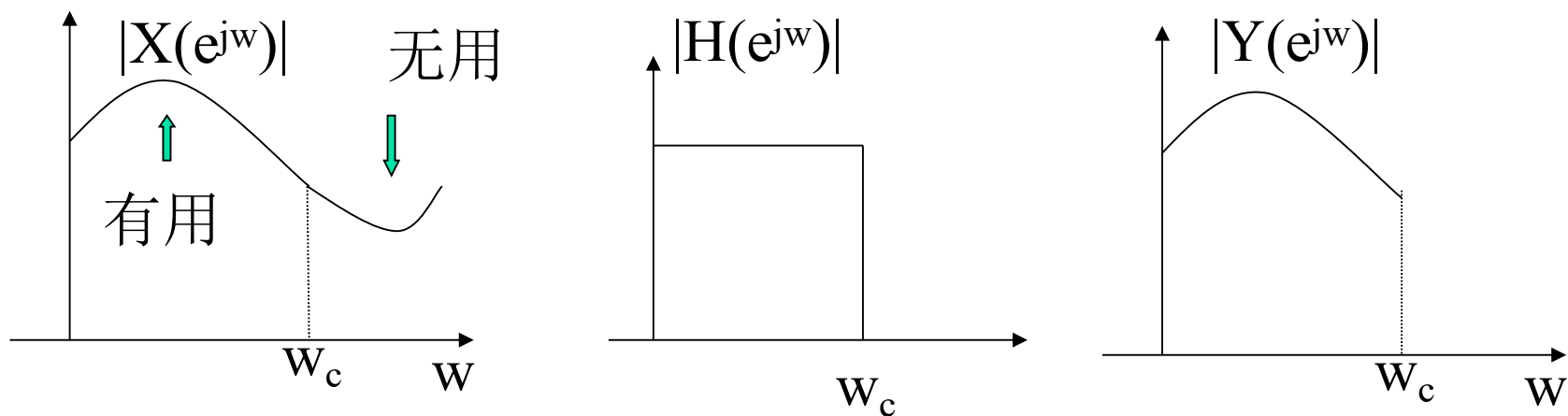


图1 归一化为1-rad 带宽后，各种滤波器的幅值和群延时与频率之间的关系。



经典滤波器

- 假定输入信号 $x(n)$ 中的有用成分和希望去除的成分，各自占有不同的频带。当 $x(n)$ 经过一个线性系统（即滤波器）后即可将欲去除的成分有效地去除。但如果信号和噪声的频谱相互重叠，那么经典滤波器将无能为力。





FIR的系统函数及差分方程

FIR是有限冲激响应（Finite Impulse Response），长度为N的单位冲激响应 **$h(n)$** 的系统函数为：

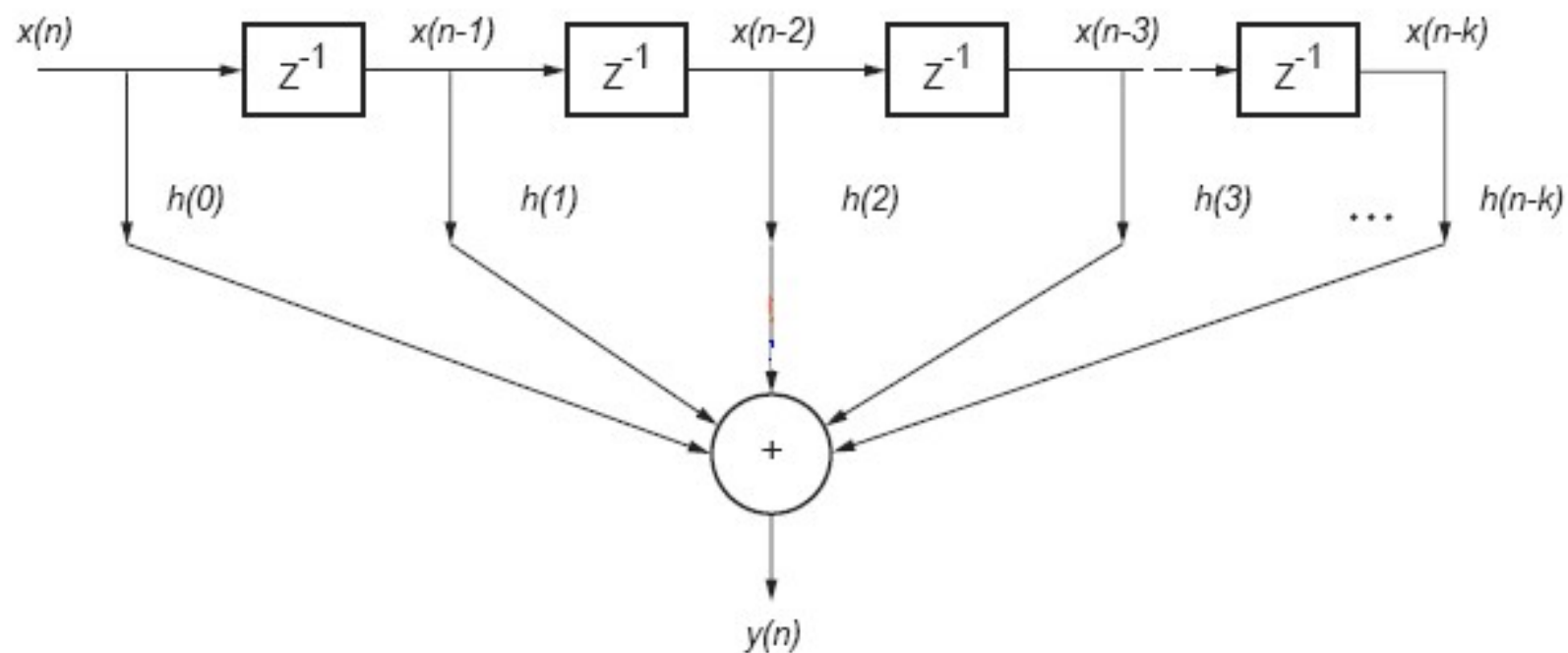
$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n}$$

特点：当前的输出只与当前的输入以及过去的输入有关

其差分方程为：

$$y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} h(m) x(n-m)$$

FIR滤波计算框图





IIR数字滤波器

IIR是无限冲激响应（ Infinite Impulse Response），

一个**N**阶**IIR**有理的系统函数可能表示为：
特点：当前的输出不仅与输入有关，还与过去的输出有关

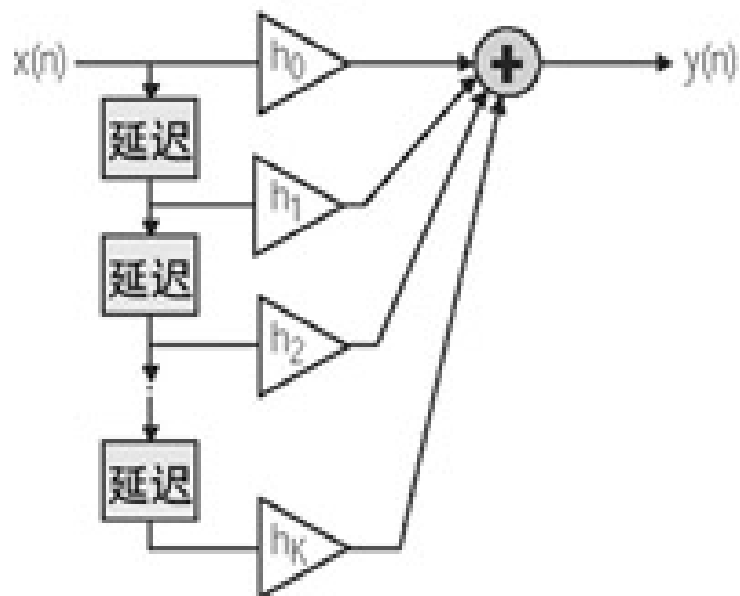
$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^M b_i Z^{-i}}{1 - \sum_{i=1}^N a_i Z^{-i}} = \frac{Y(z)}{X(z)}$$

FIR与IIR数字滤波器的比较

(a)

FIR滤波器

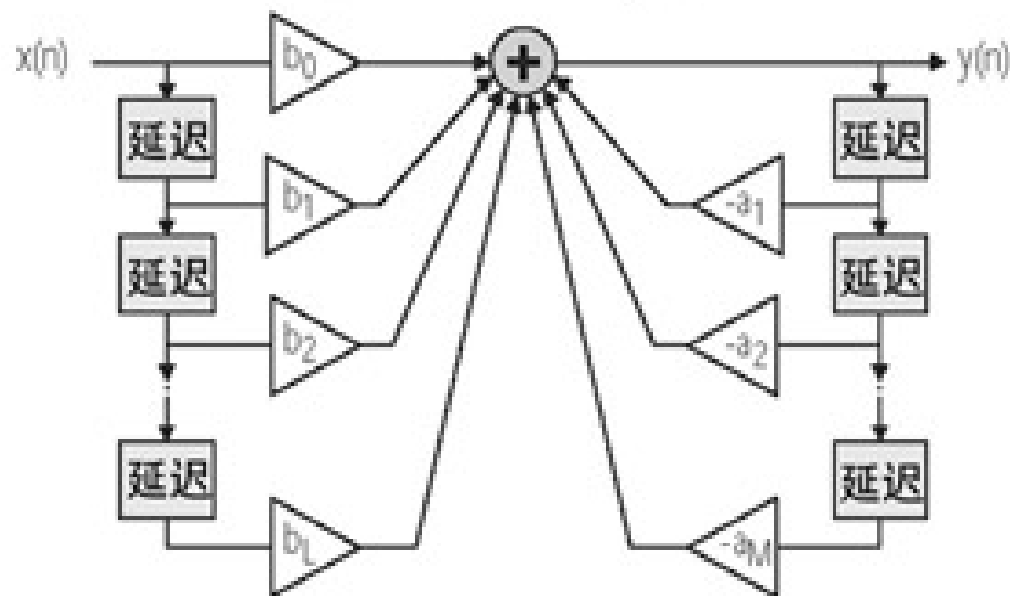
$$y[n] = \sum_{k=0}^K h[k]x[n-k]$$



(b)

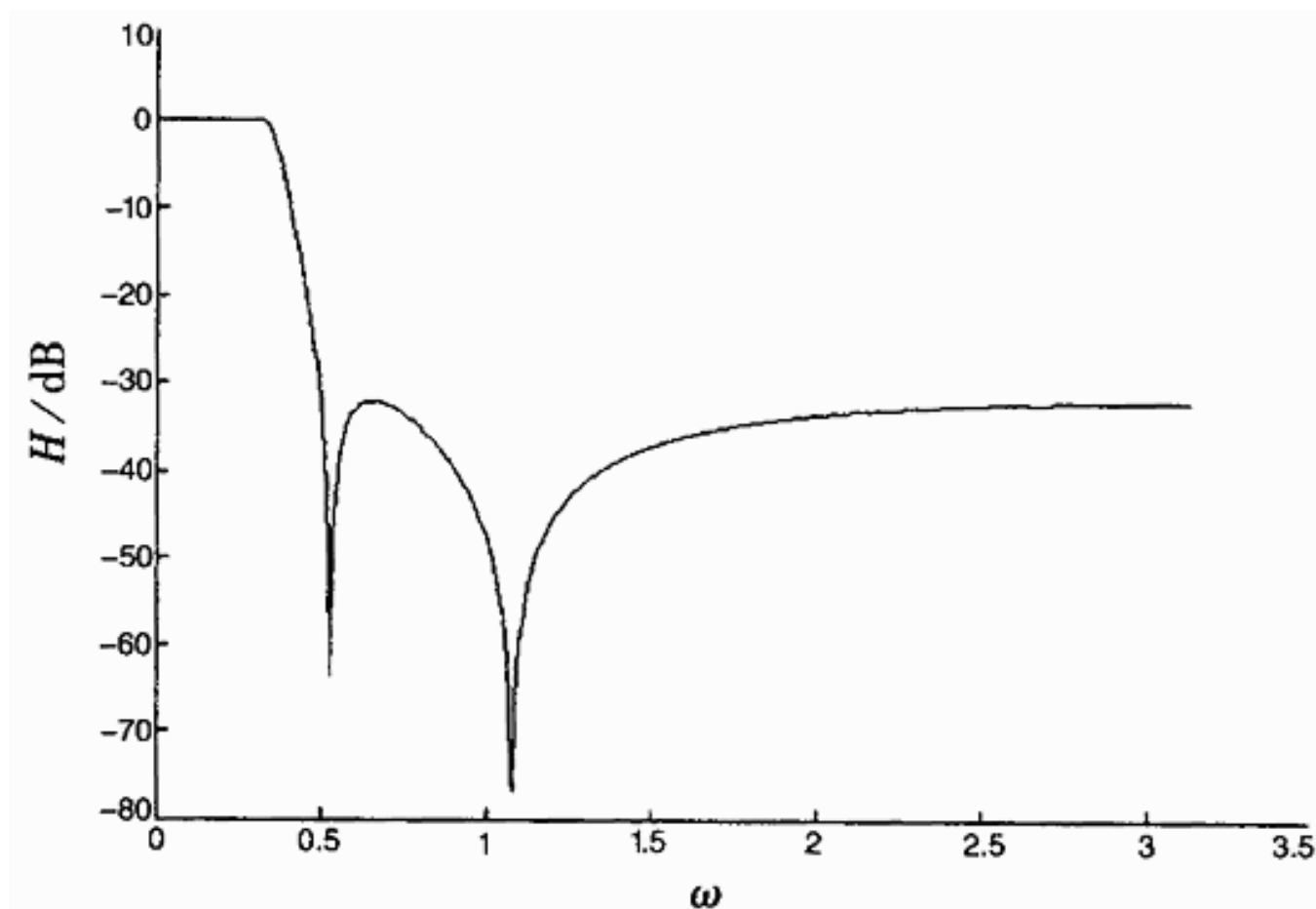
IIR滤波器

$$y[n] = \sum_{i=1}^M (-a_i y[n-i]) + \sum_{j=0}^L (b_j x[n-j])$$

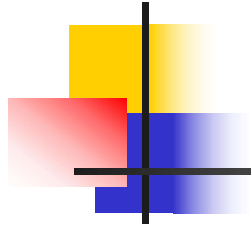


FIR工作稳定，但实现相同的性能需要更多的器件支持；
IIR则相反

一个四阶IIR数字滤波器的幅频特性



四阶 IIR 椭圆滤波器频率响应曲线



4. 现代智能信号处理方法

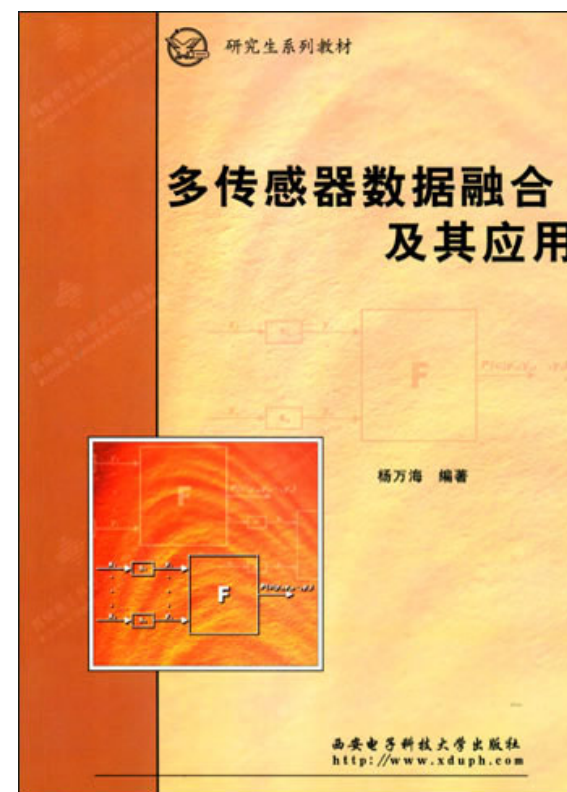
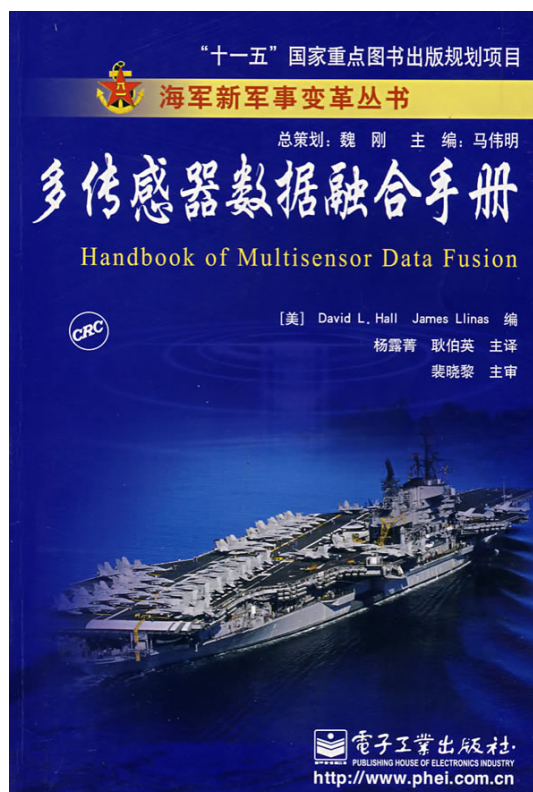
- 数据融合技术
- 神经计算技术
- 模糊计算技术
- 进化计算技术



数据融合技术

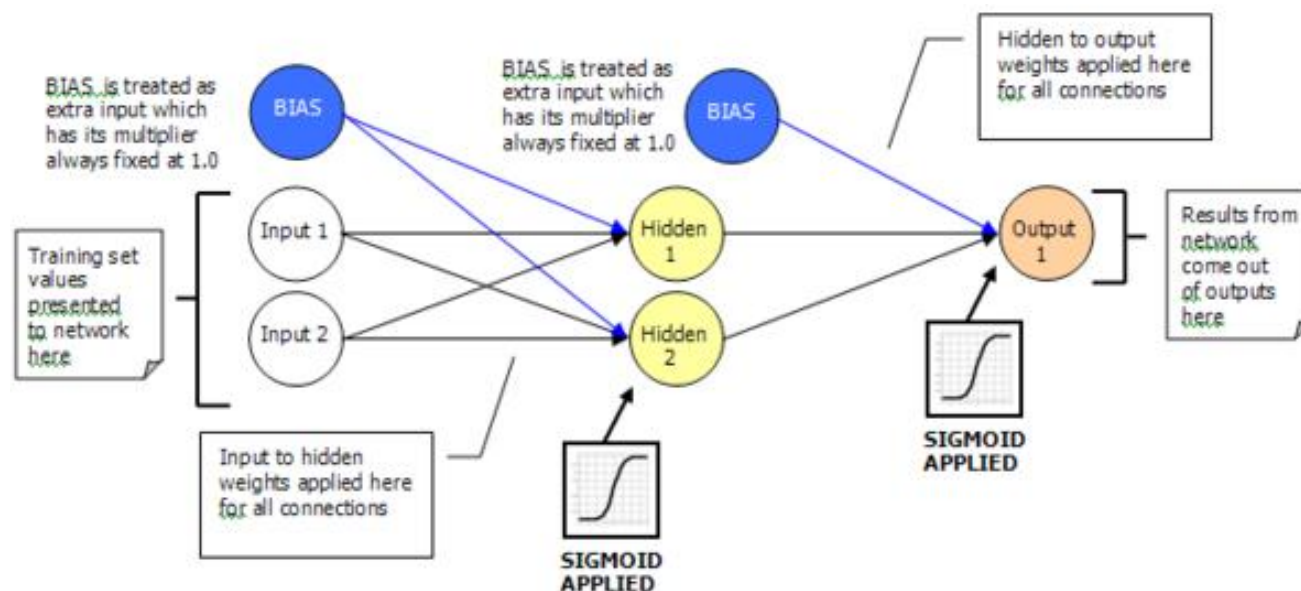
- **数据融合技术**是指利用计算机对按时序获得的若干观测信息，在一定准则下加以自动分析、综合，以完成所需的决策和评估任务而进行的信息处理技术。
- 举例：最简单的数据融合就是平均值算法，例如：**等精度加权算术平均。**

数据融合理论



神经计算技术

- **神经网络**的主要特征是大规模的并行处理、分布式的信息存储、良好的自适应性和自组织性以及很强的学习功能、联想功能和容错功能。



模糊计算技术

- 随着系统复杂性的增加，人们对系统进行精确而有效描述的能力会降低，直至一个阈值，精确和有效成为互斥。
- 一个极其简单而又重要的思想：任何事情都离不开隶属程度这样一个概念。这就是模糊理论的基本出发点。

IF A_i AND B_j THEN C_{ij} 。

A_i 、 B_j 、 C_{ij} 表示 E 、 E_C 和 U 的对应语言值。本系统规则库中共有 49 条规则。

表 1 模糊控制规则表

$U_0 \backslash E$ ΔE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	ZE	ZE
NM	PB	PB	PB	PB	PM	ZE	ZE
NS	PM	PM	PM	PM	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PM	ZE	NM	NM	NM	NM
PM	ZE	ZE	NM	NB	NB	NB	NB
PB	ZE	ZE	NM	NB	NB	NB	NB

表2 语言变量C模糊子集隶属度表

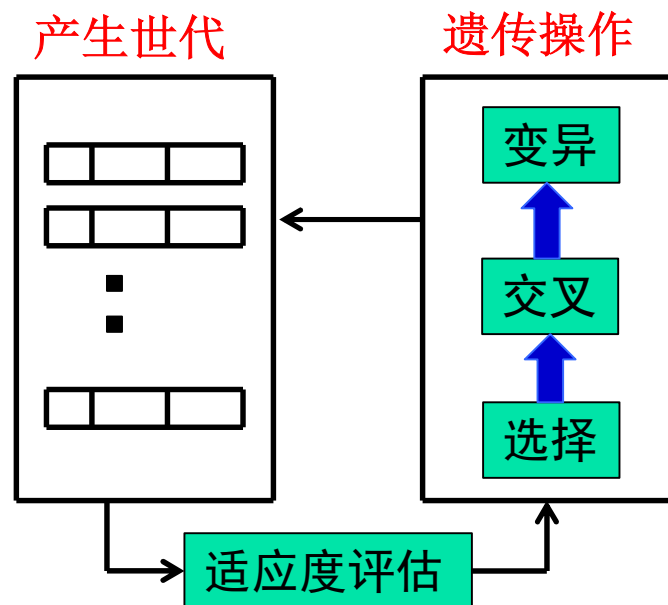
C	y_i				
	-2	-1	0	1	2
PB	0	0	0.6	0.8	1
PS	0	0.6	0.8	1	0.8
ZE	0.6	0.8	1	0.8	0.6
NS	0.8	1	0.8	0.6	0
NB	1	0.8	0.6	0	0

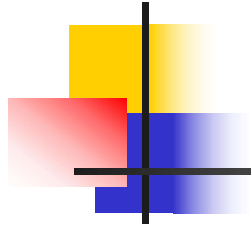
表3 语言变量L模糊子集隶属度表

L	z_i				
	-2	-1	0	1	2
PB	0	0	0.2	0.4	1
PS	0	0.2	0.4	1	0.4
ZE	0.2	0.4	1	0.4	0.2
NS	0.4	1	0.4	0.2	0
NB	1	0.4	0.2	0	0

进化计算技术

- 通常遗传算法主要采用计算的方法模拟达尔文生物进化的优胜劣汰过程。
- 进化计算体现了生物进化中的**4**个要素，即繁殖、变异、竞争和自然选择。





三. 数字信号处理器 (DSP)

1. **DSP**的特点和主要生产厂家
2. **TI**的**TMS320**系列**DSP**
3. **TI**的**DSP**产品发展路线
4. **ADSP-21xx**处理器



1. DSP的特点和主要生产厂家

DSP芯片较之单片机有着更为突出优点:

- 如内部带有乘法器，累加器，采用流水线工作方式及并行结构，多总线速度快。配有适于信号处理的指令(如**FFT**指令)等。

目前市场上的**DSP**芯片有:

- 美国德州仪器公司(**TI**):**TMS320CX**系列 占有**90%**
- 还有**AT&T**公司**dsp16,dsp32**系列
- **Motorola**公司的**dsp56x,dsp96x**系列
- **AD**公司的**ADSP21X,ADSP210X**系列

2. TI的TMS320系列DSP

- 1. **哈佛结构**。它不同于传统的冯. 诺依曼结构的并行体系结构，其主要特点是将程序和数据存储在不同的存储空间中，**每个存储器独立编址，独立访问**。系统中设计了**程序总线**和**数据总线**两条总线，从而使数据的吞吐率提高了一倍。

计算方式：MCU浮点，DSP定点
密集乘法：DSP支持快速复杂乘法运算





2. TI的TMS320系列DSP

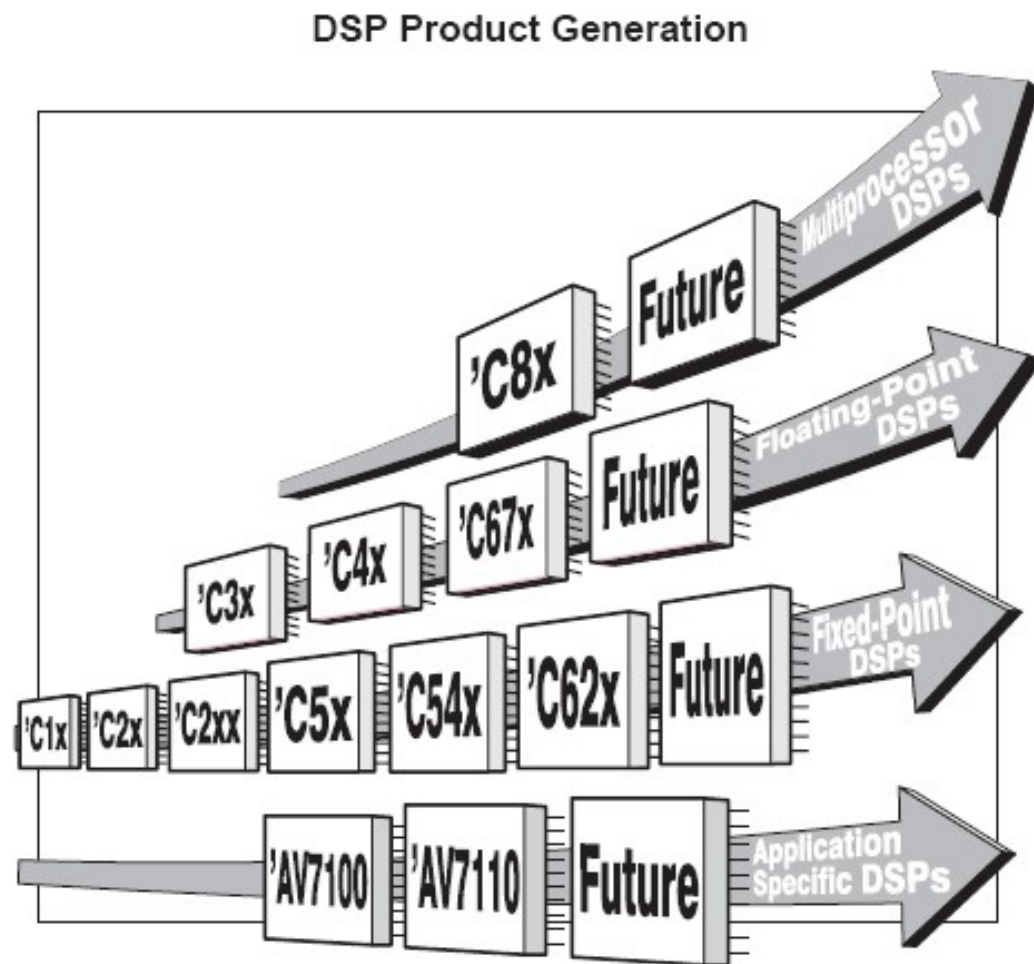
- **2.流水线操作。** TMS320系列处理器的流水线深度从2-6级不等，也就是说，处理器可以并行处理2-6条指令，每条指令处于流水线上的不同阶段。例如在一个三级流水线操作中，取指，译码和执行操作可以独立地处理，这可使指令执行能够完全重叠。这样就增强了处理器的处理能力。
- **3.专用的硬件乘法器。** 在一般形式的FIR滤波器中，乘法是DSP的重要组成部分。在TMS320系列中，由于具有专用的硬件乘法器，乘法可以在一个指令周期内完成。这样可以大量降低FIR的计算时间。



2. TI的TMS320系列DSP

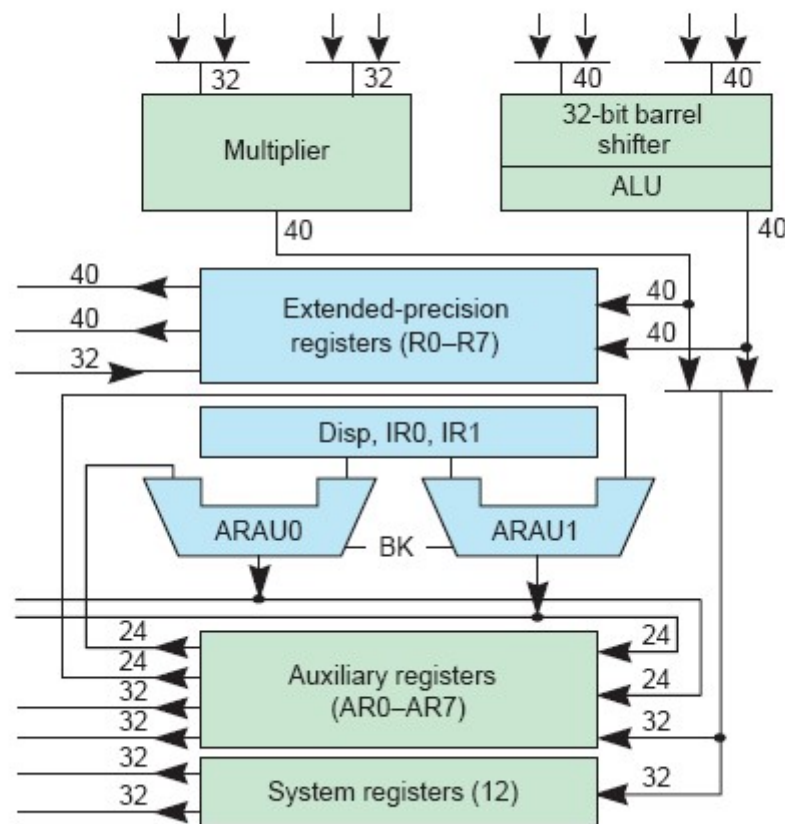
- **4.特殊的DSP指令**。在TMS320系列中有一些特殊的**DSP**指令，它们在一个指令周期内用一条指令就可以实现普通需要几条指令才可以实现功能，如**MAC**指令，它可以在一个指令周期中完成一次乘法和一次加法运算。这样即节省了时间，又提高了编程的灵活性。
- **5.快速的指令周期**。目前TMS320系列处理器的指令周期已经达到了**20ns**以下，有的甚至达到了几个**ns**，这使得**DSP**芯片能够实时实现许多**DSP**应用。

3. TI的DSP产品发展路线

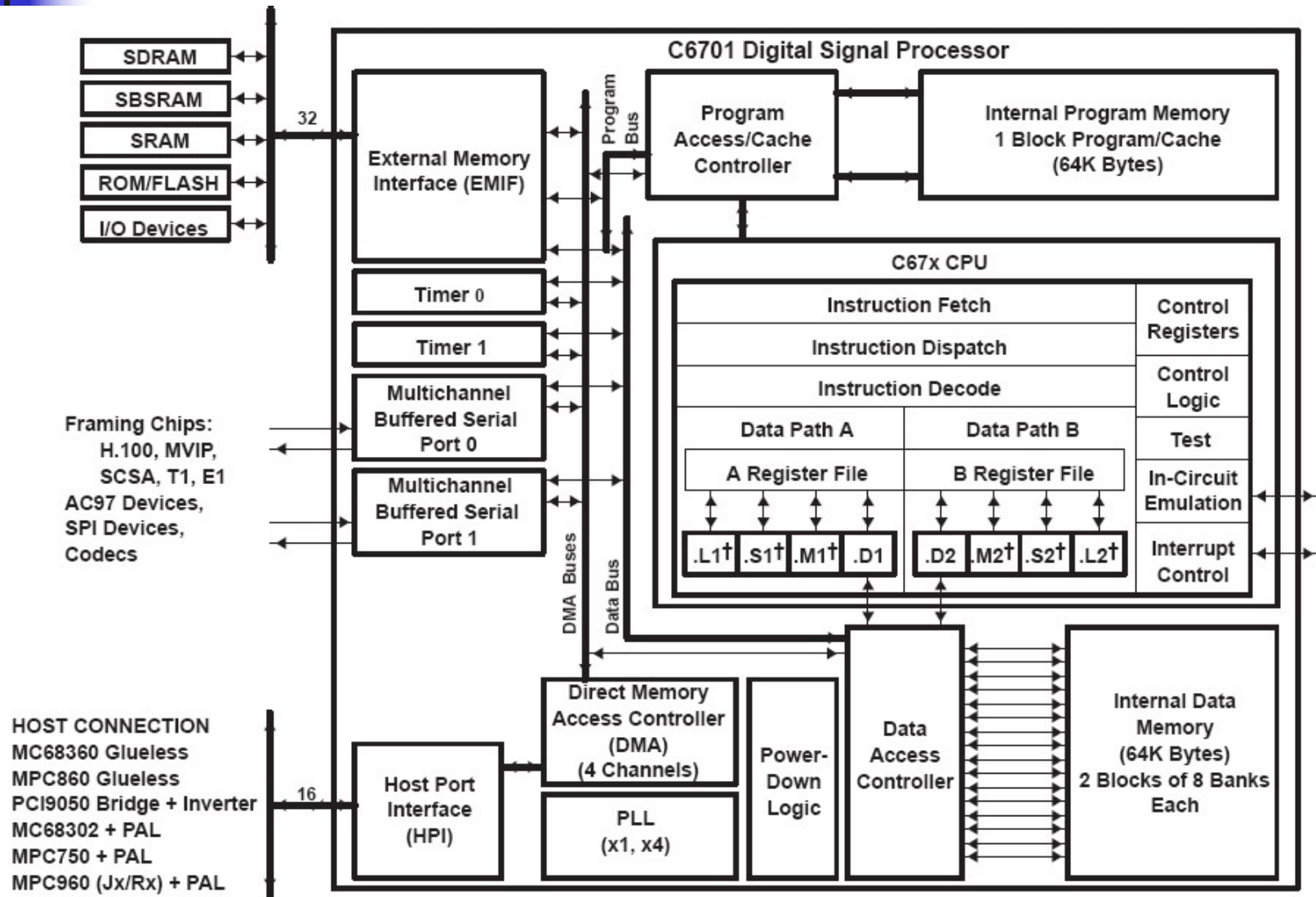


TMS320C3X的CPU结构

TMS320C3x CPU Block Diagram



TMS320C67XX的内部结构

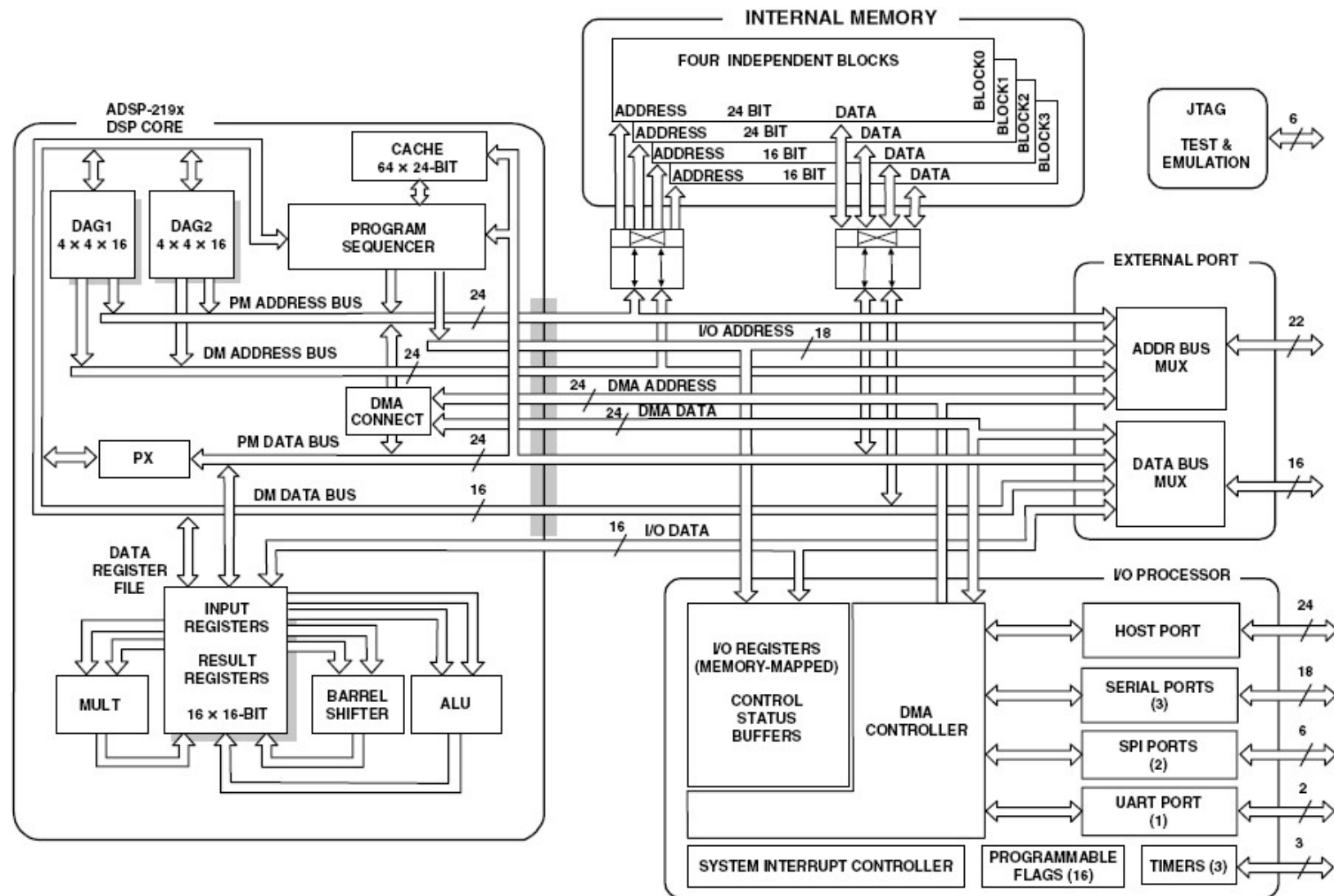




4. ADSP-21xx处理器

- ADSP-21xx处理器是代码和引脚兼容的数字信号处理器家族，具有高达**160MHz**的工作频率和低至**184 μ A**的功耗。ADSP-21xx系列产品适合语音处理和话音频带调制解调以及实时控制应用。
- 21xx系列产品包括适合蜂窝通信应用在Softfone 产品中嵌入的系统芯片（SOC）级集成产品，以及适合电机控制应用的**2199x**系列产品。21xx系列产品广泛用于从调制解调到工业测试设备多种应用。

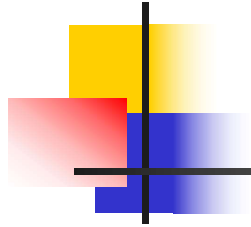
ADSP-21xx处理器的内部结构





参考资料

1. 《数字信号处理教程》 程佩青 清华大学出版社
2. 《离散时间信号处理》 刘树棠等译 西安交通大学出版社
3. 《测试智能信息处理》 王雪编著 清华大学出版社
4. 《智能仪器设计基础》 史健芳 电子工业出版社
5. 《智能仪器工程设计》 尚振东等 西安电子科技大学出版社



课后作业

1. 举例说明什么是模拟信号、数字信号、连续信号和离散信号。
2. 用图形或者公式描述一个8点FFT计算过程。
3. 写出FIR和IIR滤波器的运算公式，指出二者的区别。
4. 指出数字信号处理器（**DSP**）与单片机（**MCU**）有哪些不同。