

数字信号处理

Digital Signal Processing

任课教师：刘英 副教授

邮箱：yingliu@zju.edu.cn

办公室地址：行政楼425室

课程简介

- ❖ 《数字信号处理》是电子信息类专业核心课，理论性、系统性较强，同时又是实用的技术。
- ❖ 前修课程：《信号与系统》
- ❖ 拓展课程：《离散控制系统》 《数字处理技术及应用》或《数字系统设计》

整体优化信号处理课群体系，突出**信号分析是基础，系统分析是桥梁，仿真分析为手段**，实现原理、方法和应用的有机结合。

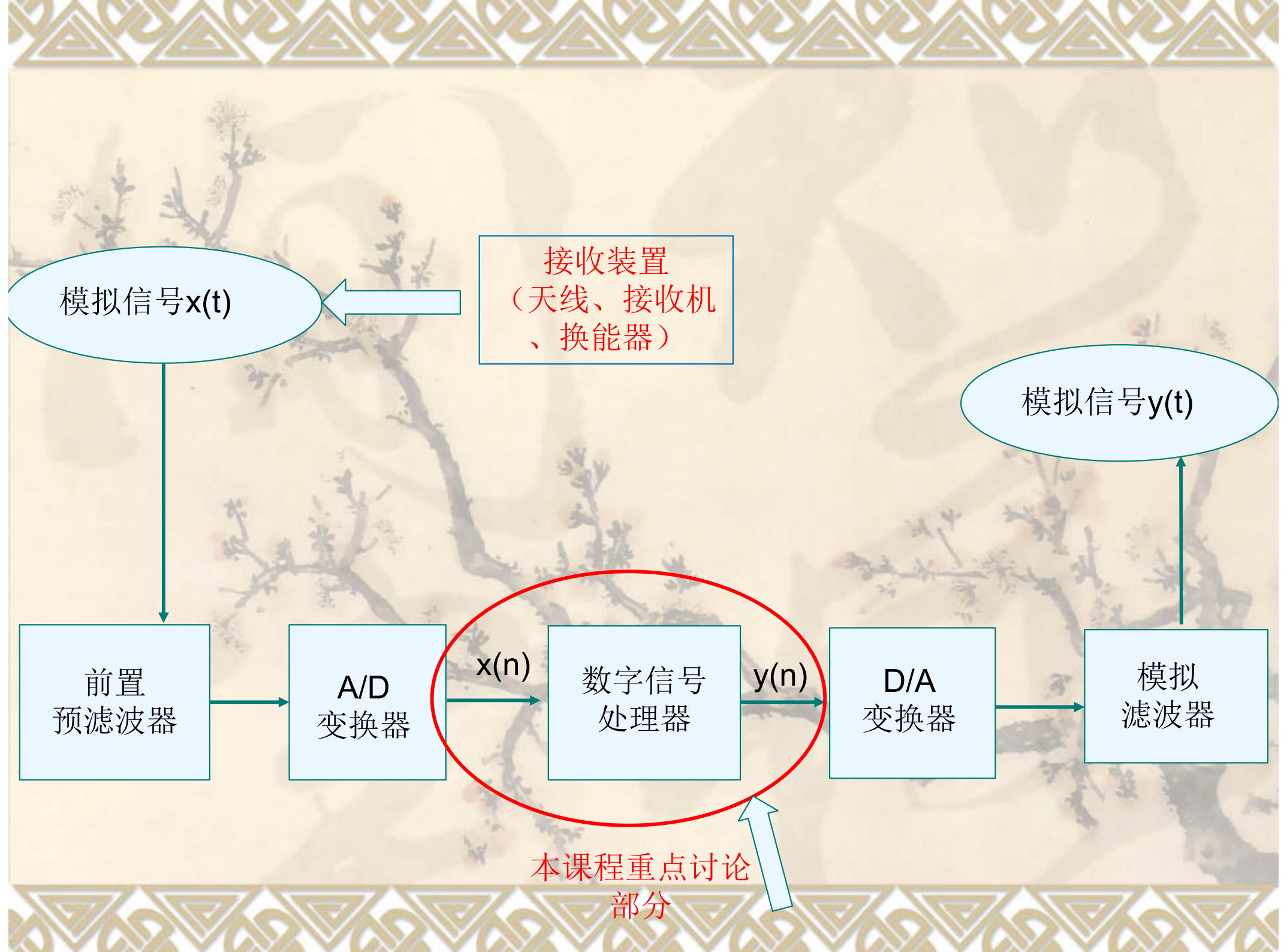
DSP技术及应用
(设计应用)

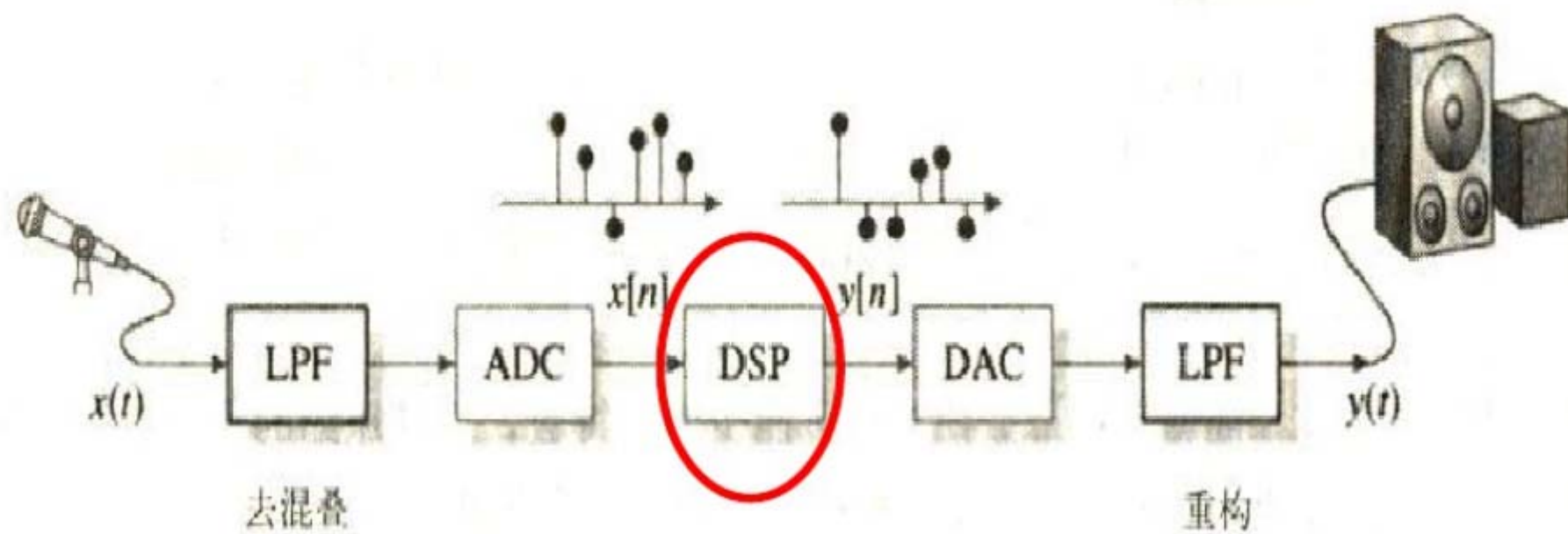
DSP系统课程设计
(开发应用)

信号分析与处理实验
(基于MATLAB仿真)

信号与系统
(原理与概念)

数字信号处理
(方法与技术)





教学目标

- 掌握信号、系统、抽样、数字处理、有限字长效应等的基本概念；
- 掌握基本方法如时域/频域/复频域分析、DFT、FFT、IIR/FIR滤波器设计；
- 较为熟练地进行基本运算如卷积、相关等运算，培养学生将理论分析与技术实现、实验验证结合的能力；
- 能够应用MATLAB，对信号进行分析以及DFT、FFT、IIR/FIR滤波器设计。

● 教材:

- 门爱东、苏菲、王雷、王海婴、李江军 《数字信号处理》（第二版），科学出版社，2009。

● 参考书:

- 美国加州大学圣芭芭拉分校Mitra教授,《**Digital Signal Processing—A Computer Approach Second Edition**》（美国McGraw-Hill出版社2001年出版，清华大学出版社2001年影印出版）。
- A.V.奥本海姆， R.W.谢弗，《数字信号处理》（第二版）
- Vinay K.Ingle and John G.Proakis 著，陈怀琛等译,《数字信号处理及其MATLab实现 **Digital Signal Processing Using Matlab**》，电子工业出版社，1998。

● MATLAB:

- Matlab2019a;
- 使用方法参看 **MATLab** 随机帮助、使用手册或相关的教材。

考试评分（暂定）

- 作业/实验报告

- 14 次作业（每周一次），每章节完成后上交
- 3次实验作业，布置作业 2 周后提交。

注：作业、实验应及时完成。迟交则成绩递减。不交作业每次将被扣掉 1.5 分，晚交每次将被扣掉 0.5分。

- 分数组成

- 平时：50% 包括:出勤、课堂互动（小测）10%；作业20%和实验报告20%

加分：课后作业或实验讲解，每次加分2分，鼓励大家参加。

- 期末考试：50%

历史沿革

数字信号处理起源于十八世纪的数学，随着信息科学和计算技术的迅速发展，数字信号处理的理论与应用得到迅速发展，形成一门极其重要的学科。当今数字信号处理的理论和方法已得到长足的发展，成为数字化时代的重要支撑，其在各个科学和技术领域中的应用具有悠久的历史，已经渗透到我们生活和工作的各个方面。

历史沿革

信号处理在生物医学工程、地震学、声纳、雷达、通信、控制等领域都日益显示其重要作用。例如在医学信号或地震信号分析中，我们需要提取某些重要的特征参数，在雷达和通信信号处理中，我们希望剔除信号中的噪声或干扰。

.....

历史沿革

20世纪80年代中后期，我国开设数字信号处理课程的高校不断增加，一些重点大学为某些专业本科生开设此课，课程教学内容主要以原理阐述与算法推导为主。国内出版的教材也相应增加。

西安交通大学，邹理和《数字信号处理》，1985

北京交通大学，吴湘淇《数字信号处理技术及应用》，1986

北京理工大学，王世一《数字信号处理》，1987

.....

历史沿革

20世纪90年代初期，开设本科生数字信号处理课程的高校数量大增，已成为许多高校本科生的必修课，大量面向本科教学的数字信号处理教材问世。

西电丁玉美编著的《数字信号处理》，1994

清华大学程佩清编著的《数字信号处理教程》，1994

北交大吴湘淇编著的《信号、系统和信号处理》，1996

课程内容中增加了利用Fortran、C等高级语言进行算法仿真与实现等内容。

历史沿革

从20世纪90年代末以来，数字信号处理课程几乎在国内所有大学的电气信息类等学科专业的本科生和研究生中开设，且是本科生的必修课和研究生的学位课。面向本科教学的数字信号处理教材大幅增加。

吴镇杨编著的《数字信号处理》(十五规划)，高等教育出版社，2003

陈后金编著的《数字信号处理》(十五规划)，高等教育出版社，2004

增加了近代信号处理的理论和方法，并将Matlab与数字信号处理有机结合，作为信号处理的仿真分析手段，从而将理论分析与计算机仿真融为一体。

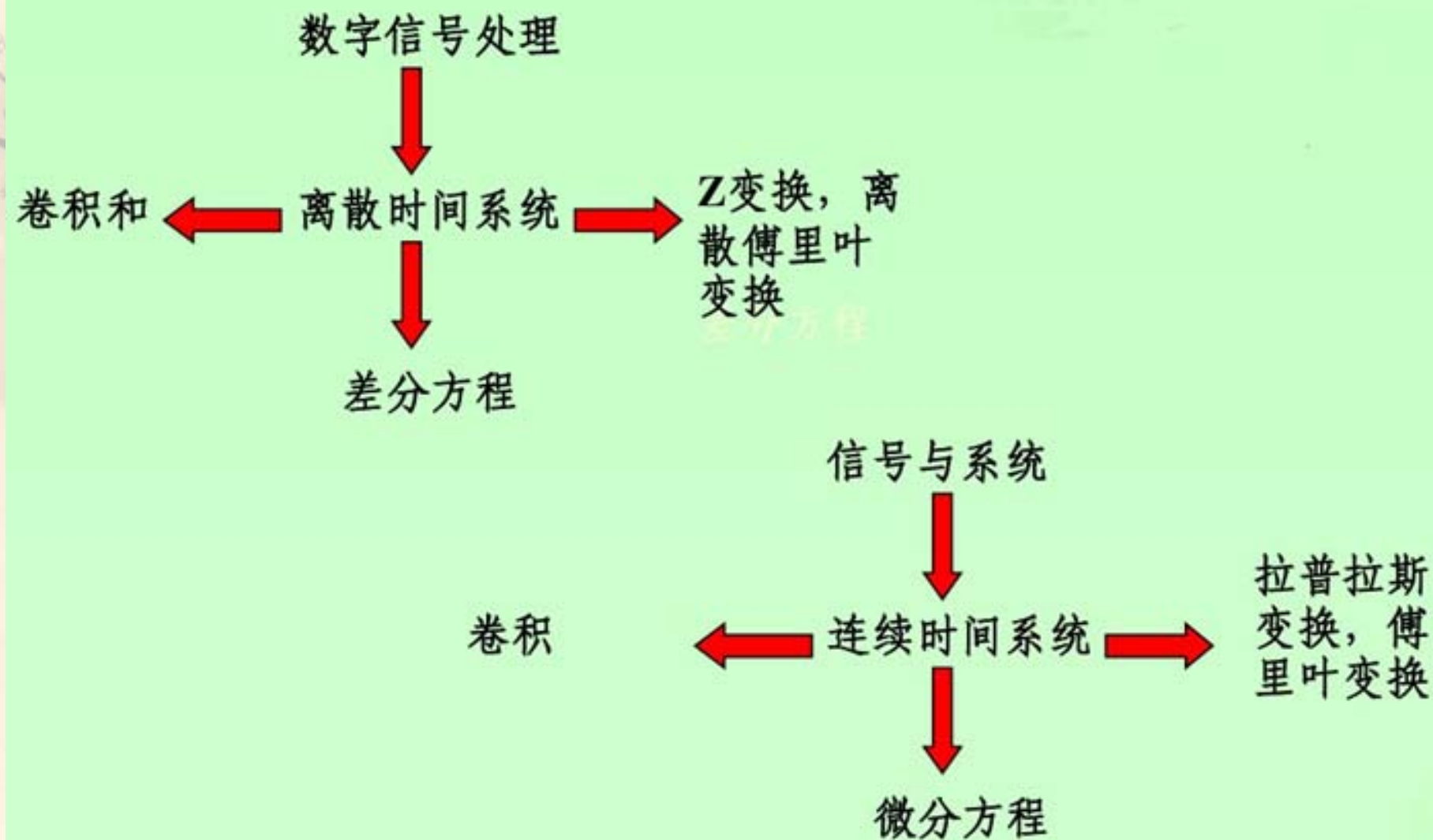
门爱东，编著的《数字信号处理》(十一五规划)，科学出版社

历史沿革

在DSP实验平台建设方面，90年代后期，美国德州仪器公司先后与我国100多所高校联合建立DSP系统实验室，用于本科生和研究生的DSP实践教学。

近年来，由于各级电气信息类实验教学示范中心建设的推动，大批高校纷纷扩建DSP实验室，为本科生开设DSP方面软件分析与硬件实现实验。目前DSP技术已成为学生就业和开展科研工作的基本技能。

如何学好这门课程?



基本概述

- 掌握离散时间系统的基本特性和离散信号的变换
 - 数字信号的定义和特点
 - 离散系统的普遍关系（线性、时不变、稳定性、因果性、离散卷积）
 - 离散信号的 Z 变换和离散时间傅氏变换 DTFT
 - 离散系统的描述
 - 时域：差分方程 $y(n)$ 、脉冲响应 $h(z)$
 - 变换域：传输函数 $H(z)$ 、频率响应 $H(e^{j\omega})$
- 掌握离散傅里叶变换原理，能够应用DFT分析信号频谱
 - 离散付氏级数 DFS
 - 有限长度离散傅氏变换 DFT
 - DFT 的应用，用 DFT 求有限长序列的线性卷积以及分段卷积、频谱分析
 - 快速离散傅氏变换 FFT（时间抽选法、频率抽选法）
- 掌握数字滤波器的原理，能够设计数字滤波器
 - IIR 数字滤波器的原理、设计和实现结构
 - FIR 数字滤波器的原理、设计和实现结构
 - 理解字长效应，掌握数字信号处理的实际实现
- 能够用 MATLAB 解决数字信号处理相关的问题
- 了解多取样滤波的原理、应用和发展

Tips:

1. 课堂认真听讲、不玩手机，发现平时成绩适当减扣。
2. 作业及时完成，不抄袭。
3. 有问题及时解决，及时复习。



第一章 绪论

1.1 数字信号处理的定义、特点和方法

1.1.1 数学信号定义

1.1.2 数字信号处理的特点

1.1.3 数字信号处理的方法

1.1.4 数字信号处理的应用

1.2 数学预备知识

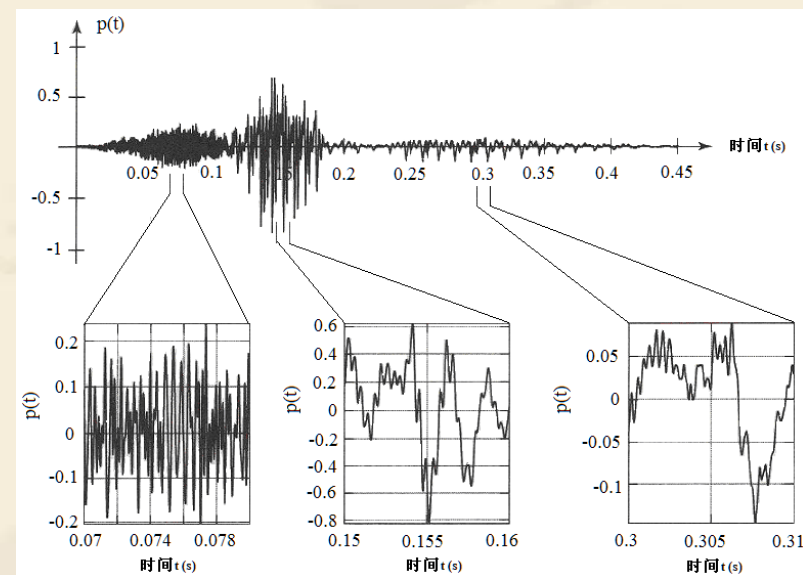
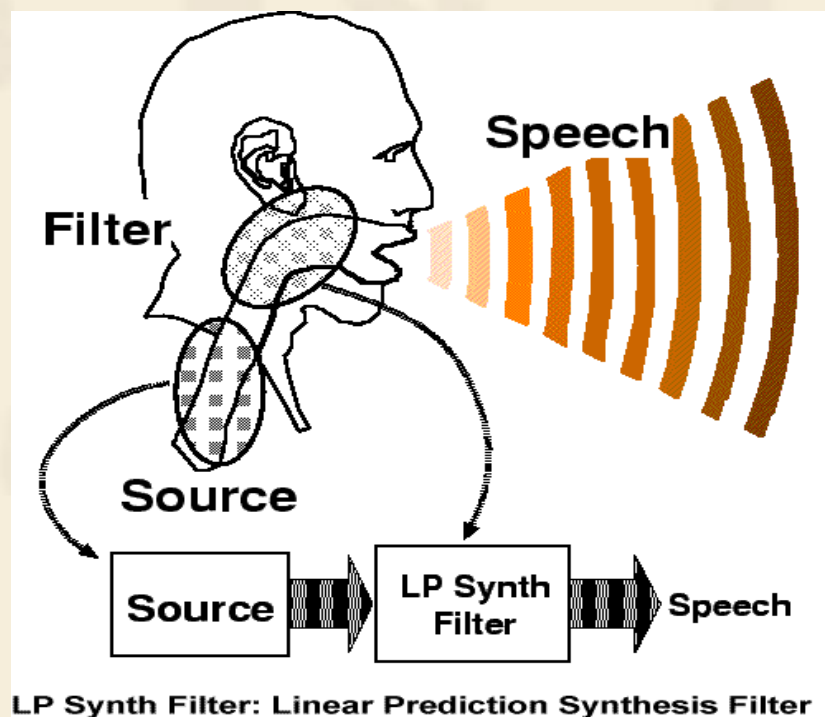
1.2.1 傅里叶变换的几种形式

1.2.2 常用的模拟信号

1.1 数字信号处理的定义、特点和方法

1.1.1 信号的定义和分类

- 信号：信息的载体，可以定义为传递信息的函数或信息的物理表现形式。
- 信息：信号的具体内容（物理系统状态或特性）：
表现形态：数据、文字、声音、图像
- 信息和信号的关系：内容和形式的关系



单词“signal”发音时的声压时域波形

- ❖ 信号：手势、脸部表情、烽火、语言、图像。。。
- ❖ 从数学上可把信号看成具有一个或多个变量的函数。有时表示信号的函数关系是未知的或非常复杂的。

❖ 自变量：

$s(t)$: 时间 t 的函数 一维

$s(x)$: 位移或距离 x

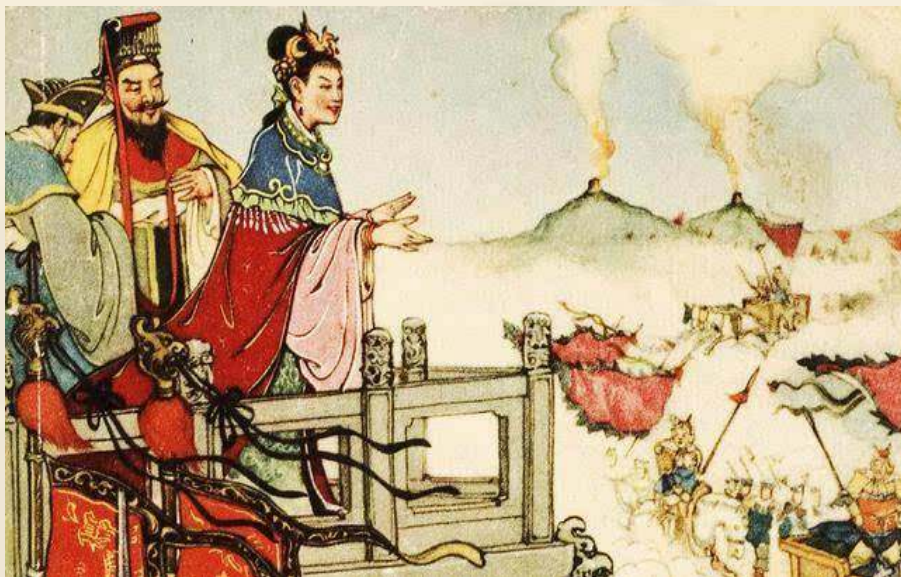
图片 $s(x,y)$ 直角坐标系中的位置变量 x,y 二维

电视 $s(x,y,t)$ 三维

CT $s(x,y,z)$ 空间位置变量 x,y,z 三维

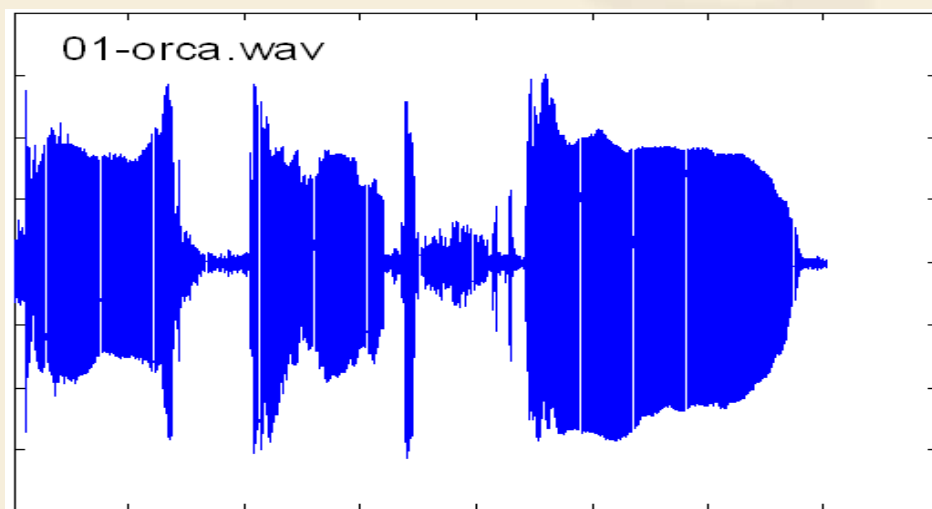
多维信号可以一维、一维地处理

这门课中只考虑一维信号，看做是时间的函数。



“信”左手拇指与四指成
“[”形，右手四指并拢
指尖插入左手“[”形中
象征信件投入邮筒。

“号”（暂无该词手语）



1.1.1 信号的定义和分类：信号

❖ 信号的分类（方法很多）

◆ 时间离散否，幅度连续否？

- ❖ 连续时间信号（模拟信号）

- ❖ 离散时间信号或称取样数据信号（数字信号）

◆ 根据物理量的不同特性，可把信号区分为

- ❖ 声信号、图像信号、光信号、电信号等不同类别

◆ 维数

- ❖ 多通道信号：由多个信源或多个传感器产生的矢量信号

- ❖ 多维信号：由M个独立变量确立的信号。如：彩色电视信号为三通道三维信号

◆ 确知性

- ❖ 确定信号：能用明确的数学式、数据表或明确的规则来描述的信号。

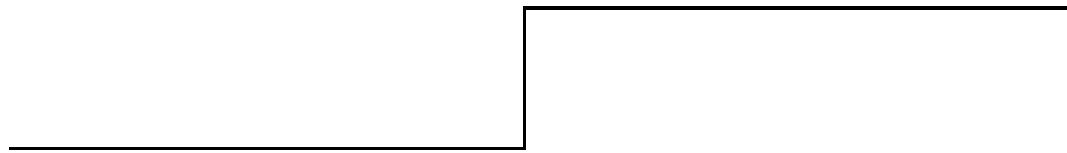
- ❖ 随机信号：信号随时间的变化不可准确预测

❖ 信号处理及分析系统的方法很大程度上依赖于信号的属性

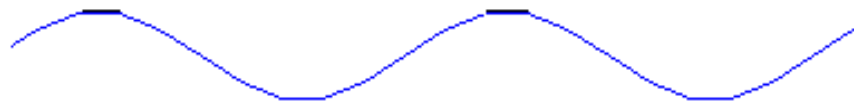
1.1.1 信号的定义和分类：模拟信号

- 模拟信号：
 - 模拟信号— 幅度为连续的时间函数，并只含有分立的不连续点。
 - 特点：时间连续，幅度连续（幅度理论上无限 精确，实际受测试仪器的精度限制）。

- 阶跃信号：

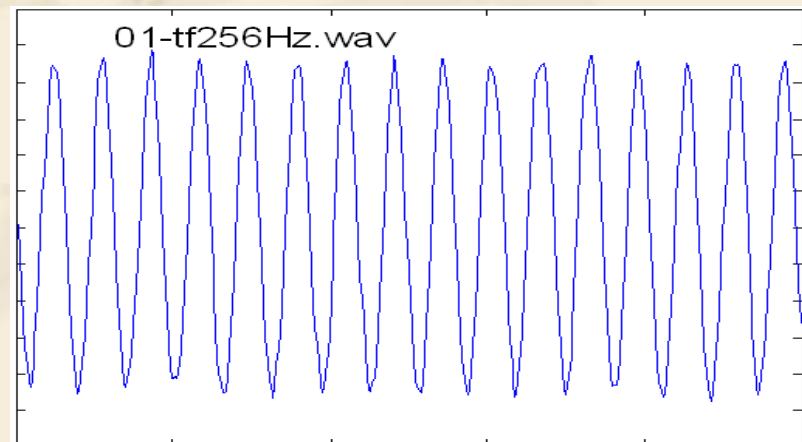
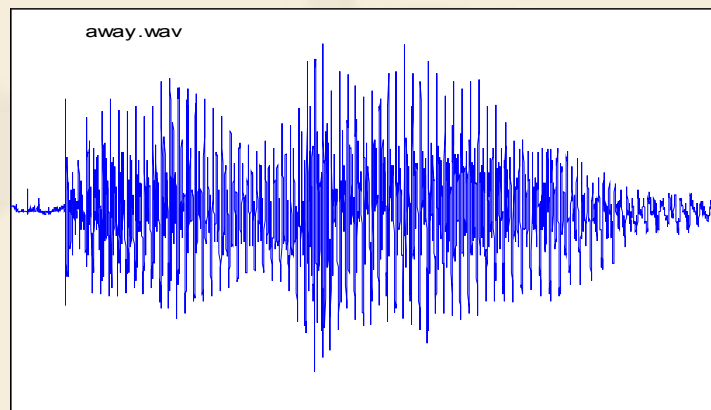
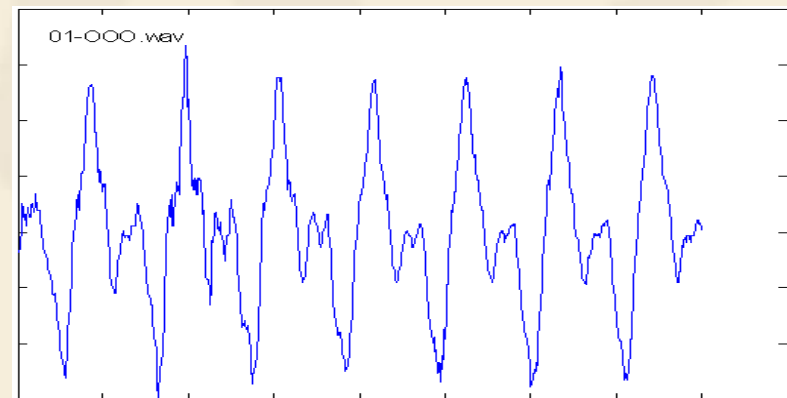
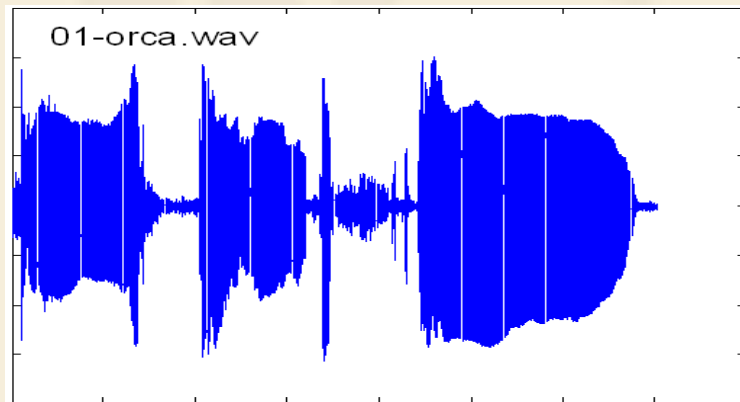


- 正弦信号：



1.1.1 信号的定义和分类：模拟信号

语音信号



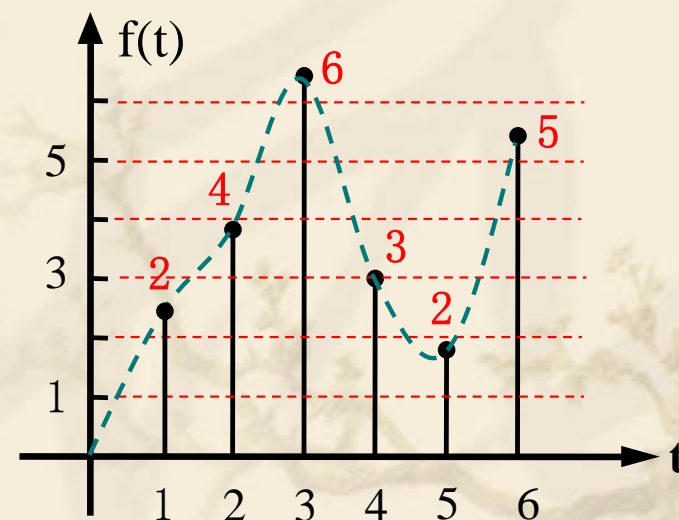
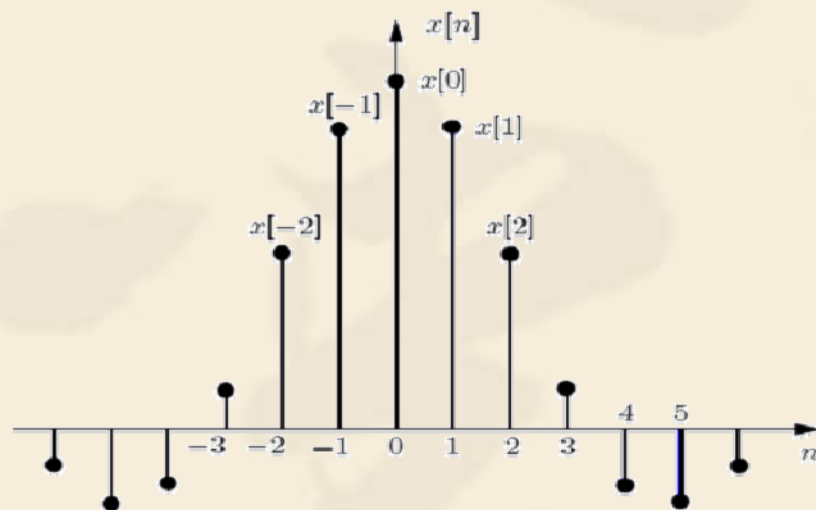
1.1.1 信号的定义和分类：离散信号

❖ 离散信号

- 只在离散的时间点上有数值，而在其他时间上其值为零或未知
- 特点：时间离散（通常时间上等间隔；不等间隔）；幅度连续（同模拟信号一样具有无限精度）

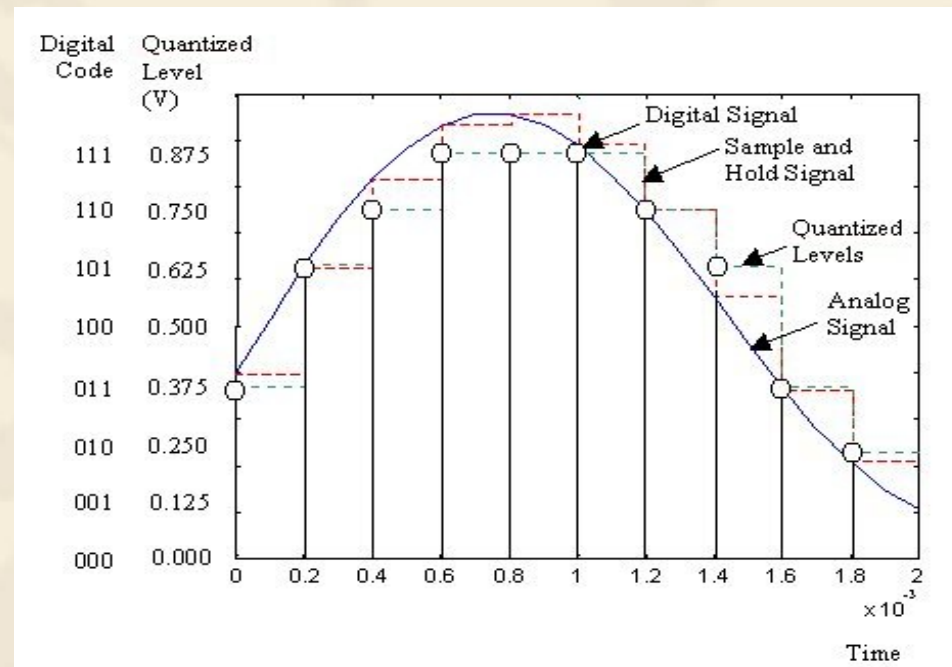
❖ 取样信号

- 离散信号的幅度在一定范围内可连续取值
- 取样：将已知的模拟信号每隔一定的时间 T 抽出一个样本数据



1.1.1 信号的定义和分类： 数字信号

- 数字信号：
 - 将离散信号的幅值也离散（量化），并用二进制表示（编码）。
 - 量化：用一些不连续的幅值逼近信号精确值的过程
 - 特点：时间离散、幅值离散

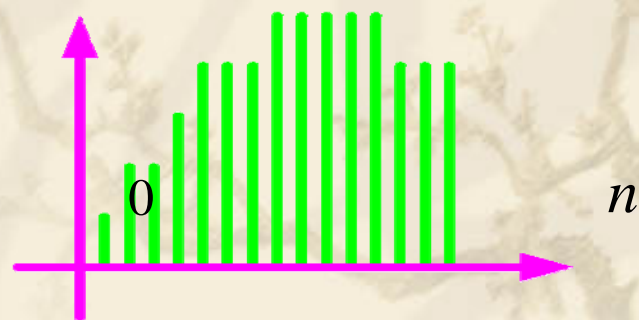
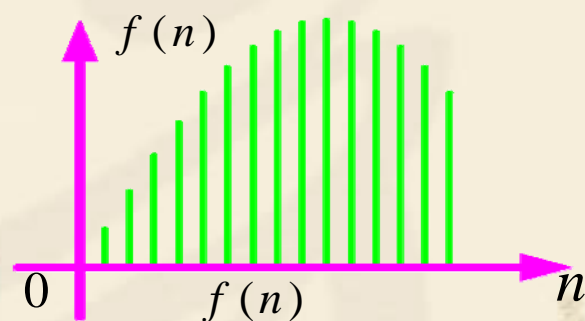
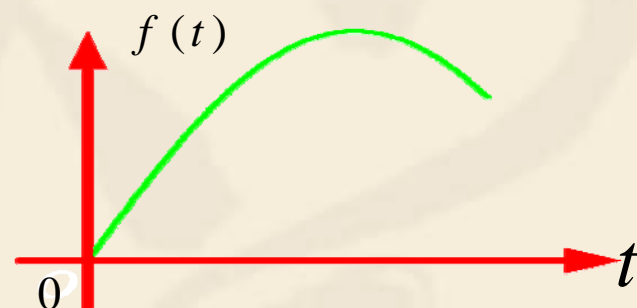


- 数字信号是离散信号的特例，是离散信号最重要的子集。

1.1.1 信号的定义和分类：三者的关系

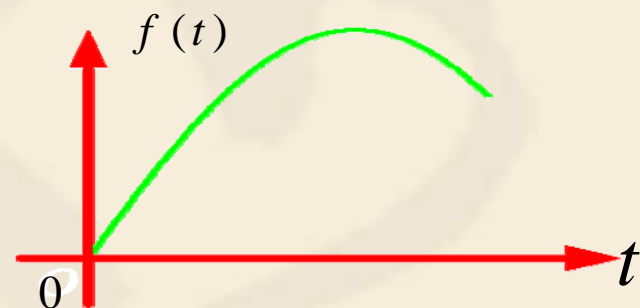
按自变量与函数值的取值形式不同分类：

	时间	幅度
连续时间信号	连续	连续
离散时间信号	离散	连续
数字信号	离散	量化

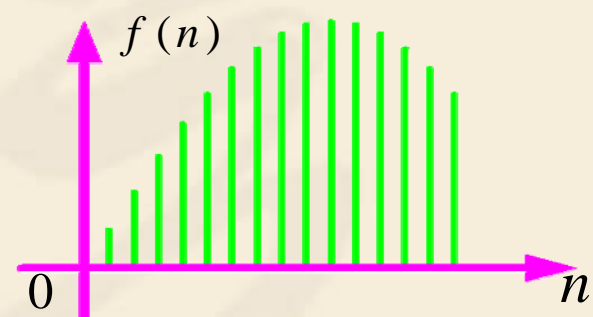


1.1.1 信号的定义和分类：三者的关系

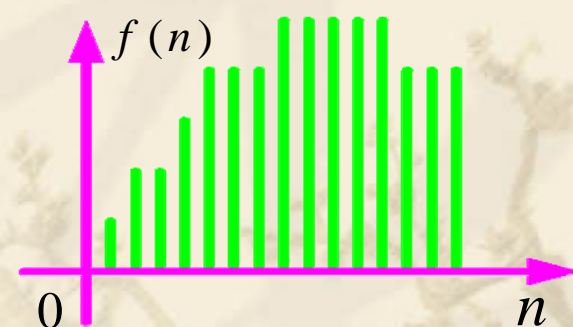
- 模拟信号：时间和幅值均为连续的信号。



- 取样信号：时间是离散的，幅值是连续的信号。



- 数字信号：时间和幅值均为离散的信号。



⑩ 001,010,010,011,100,100,100,101,101,101,101,101,.....

1.1.1 信号的定义和分类：系统

- ❖ **系统**是将信号进行处理（或变换）以达到人们要求的各种设备。系统可以是硬件的，也可以是软件编程实现的。
- ❖ **特点：**有输入和输出，系统对输入作用（变换或处理）产生输出

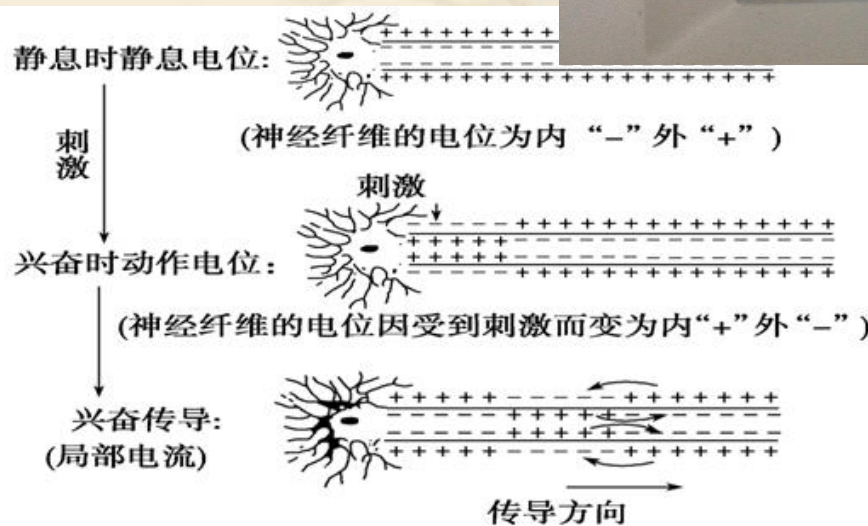
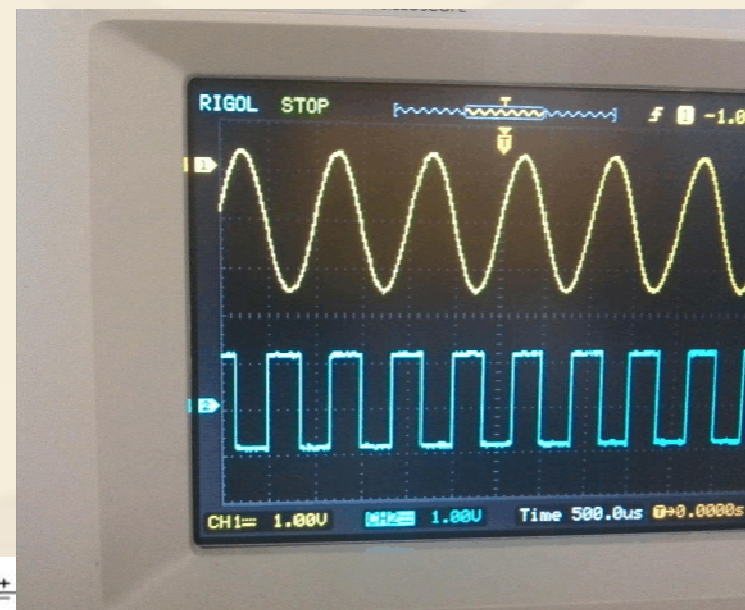
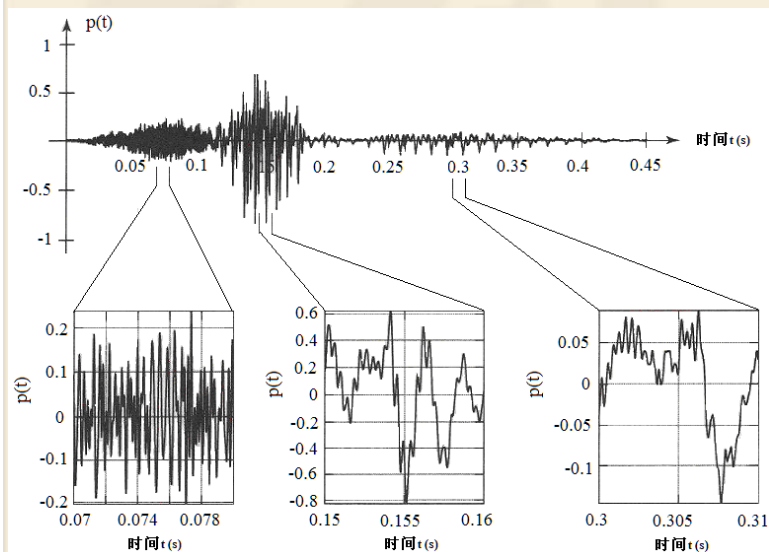


- ❖ **系统的分类（按所处理的信号种类不同分类）**
 - 连续时间信号系统（模拟信号系统）
 - 离散时间信号系统
 - 数字信号系统

1.1.1 信号的定义和分类：物理特性分类

◆根据物理量的不同特性，可把信号区分为

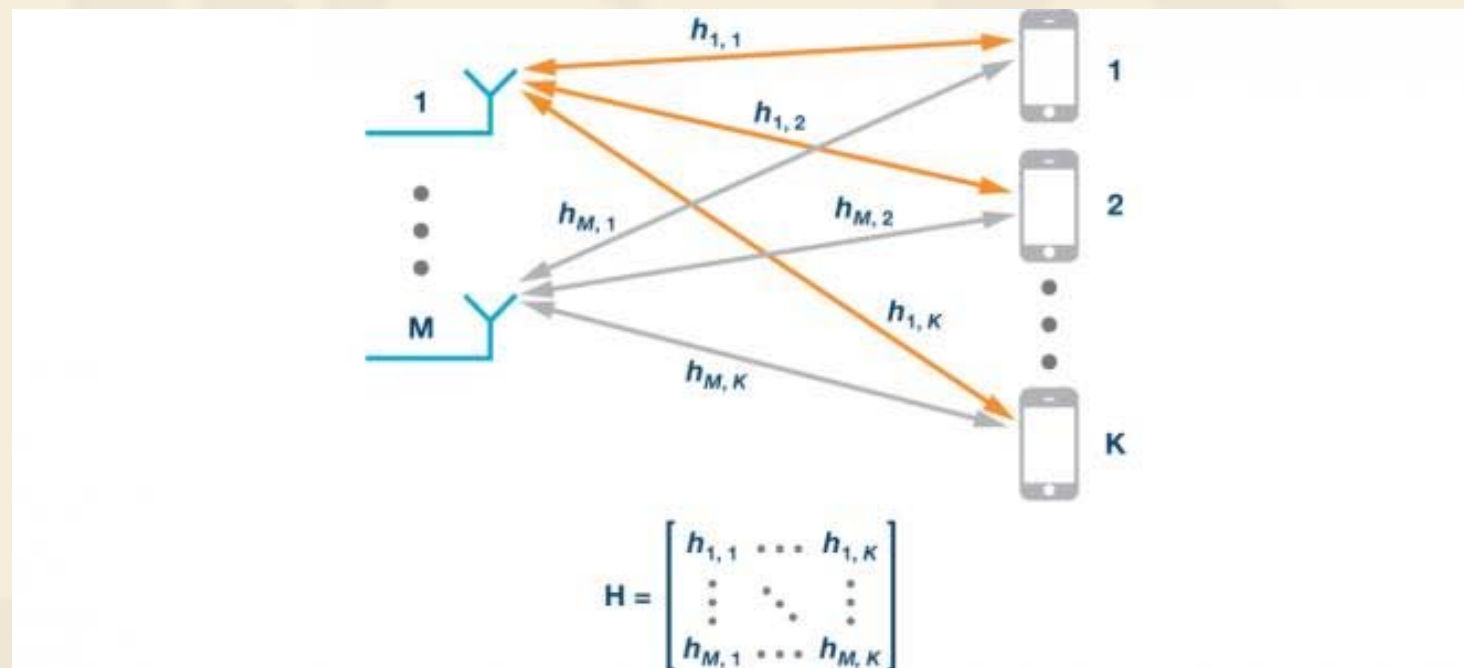
声信号、图像信号、光信号、电信号等不同类别



1.1.1 信号的定义和分类：信号维数

◆维数

❖多通道信号：由多个信源或多个传感器产生的矢量信号



❖多维信号：由M个独立变量确立的信号。如:彩色电视信号为三通道三维信号

1.1.1 信号的定义和分类：确定性

◆确知性

❖确定信号：能用明确的数学式、数据表或明确的规则来描述的信号。

正余弦信号、单位阶跃、单位冲击信号

❖随机信号：信号随时间的变化不可准确预测
白噪声

1.1.2 数字信号处理的特点

目的：使信号变成更合适的/便于利用的形式

■ 信号分析：估计信号的特征

- 频率分量（频率、幅度、相位）
- 体温、呼吸、脉搏（周期、强度、形态）等参数

■ 信号滤波：改变信号中各分量的比例

- 滤除干扰和噪声（声音、图像、工业测量）。
- 削弱无用分量（地震监测、海杂波）
- 增强有用信息（CT=病变位置、大小、边界）

1.1.2 数字信号处理的特点

- **精度高**
 - 模拟： 10^{-3} ，数字： 10^{-5} ，16 位字长
- **可靠性高**
 - 模拟：受温度和噪声影响大
 - 数字：只有 0，1 两种电平，受温度和噪声影响小
- **灵活性高**
 - 模拟：一旦确定不容易改变；
 - 数字：性能由乘法器系数决定，系数存放在存储器中，改变系数，改变系统
- **便于大规模集成化**
 - 由逻辑和记忆器件构成，具有高度的规范性，便于集成
- **便于处理低频信号：**例如地震信号等
- **便于加密处理：**
- **便于纠错编码：**
- **便于采用压缩技术，节省频带**
- **.....**

1.1.3 数字信号处理的方法

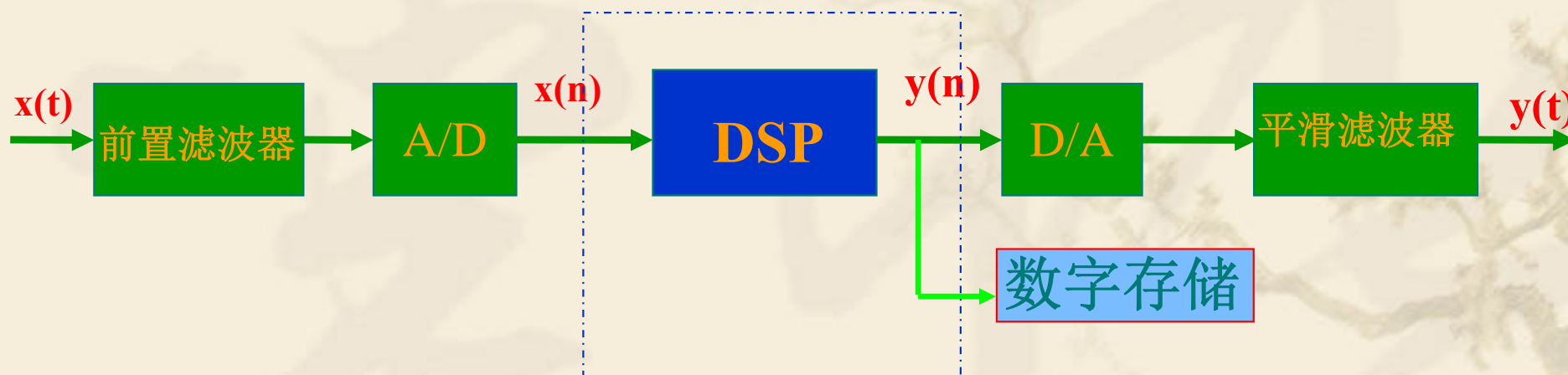
- ❖ **数字信号处理的定义：**研究如何用数字或符号序列来表示信号，以及如何对这些序列作处理（滤波、变换、压缩、增强、估计、识别，调制/解调，编码/解码等）的一门学科。
 - ❖ **数字信号处理器：**是为了有效地实现数字信号处理的算法，而专门设计和制作的一大类微处理器。
 - ❖ **数字信号处理的方法：时域 —— 频域**
 - 1965年，Cooley和Tukey在《计算数学》上发表了“一种用机器计算复序列傅里叶级数的算法”论文后，“数字信号处理”可以在时域和频域两个域中进行。
 - 三种方式：软件、硬件、软硬结合
- 软件处理**
- 信号的产生、存储、滤波（变换）等非实时处理。
 - 通用灵活方便；处理速度受计算机速度的限制。由于体系结构不同，无法充分利用计算机，成本高。
 - 目前有许多数学处理软件，如 Matlab 等。

• 硬件处理

- 加法器、乘法器、延时器、逻辑器件等基本数字器件以及它们的各种组合构成专用的数字信号处理芯片或电路。
- 处理速度快，可以实时信号处理。
- 专用芯片（通信、图象处理等）；
- **FPGA/EPLD** 等现场可编程器件：处理速度、集成度和可编程。现场下载或自动调用不同的功能模块，从而得到不同的系统功能。

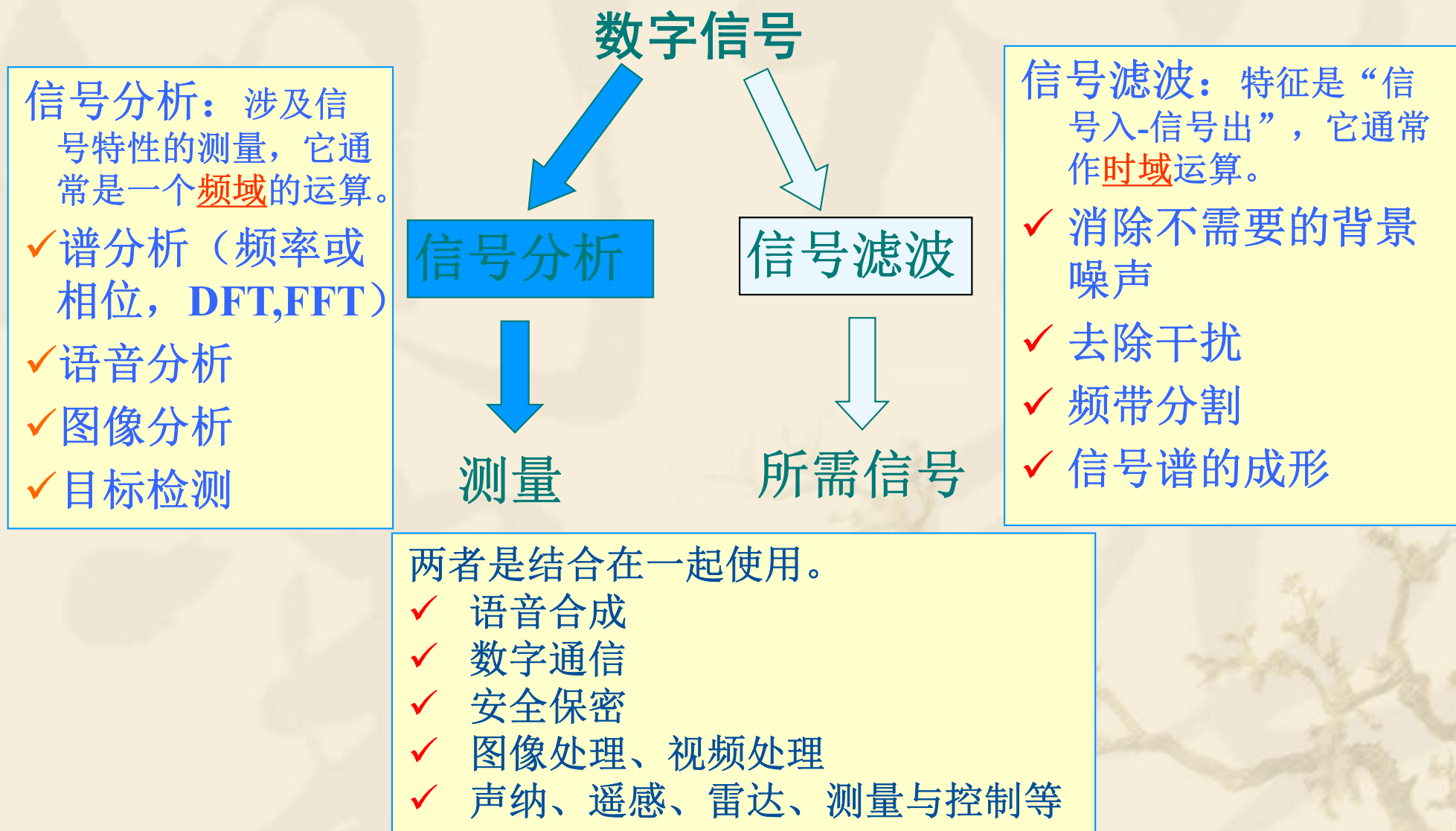
• 软硬结合

- 数字信号处理器（器件+特定编程）：Ti TMS320 系列、Motorola DSP5600、Philips Trimedia TM1300等



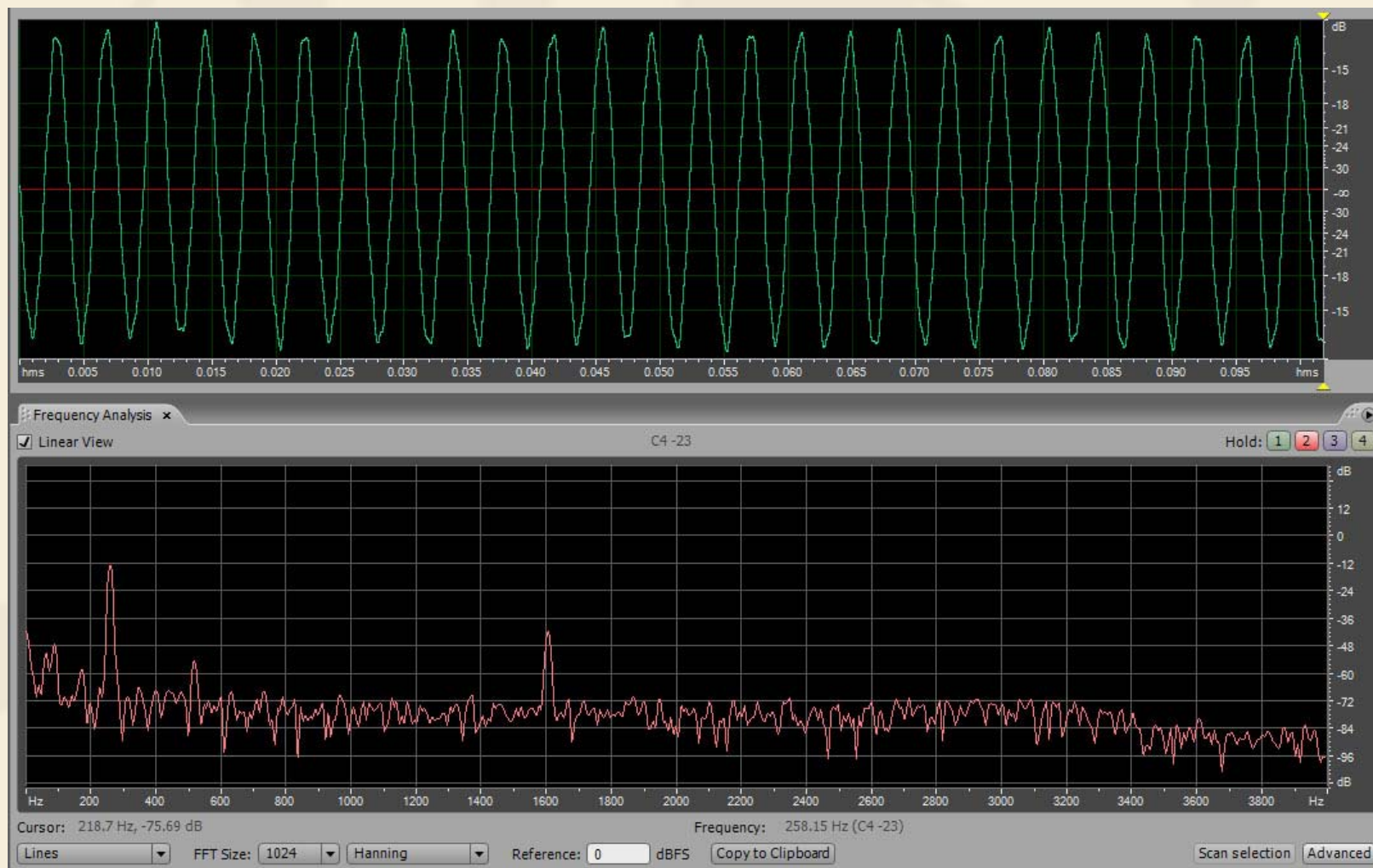
1.1.4 数字信号处理的应用

❖ 大部分的DSP运算可分为**信号分析**和**信号滤波**两类



1.1.4 数字信号处理的应用

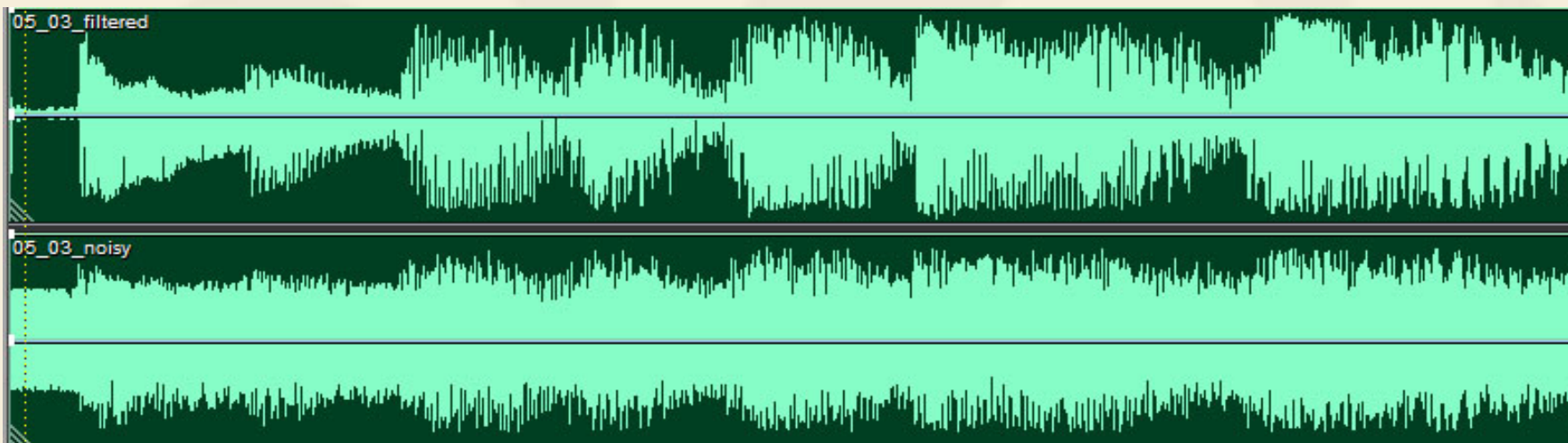
❖ 信号分析举例



1.1.4 数字信号处理的应用

❖ 信号滤波举例

- 声音滤波: 05_03_noisy.wav; 05_03_filtered.wav



- 图像滤波:



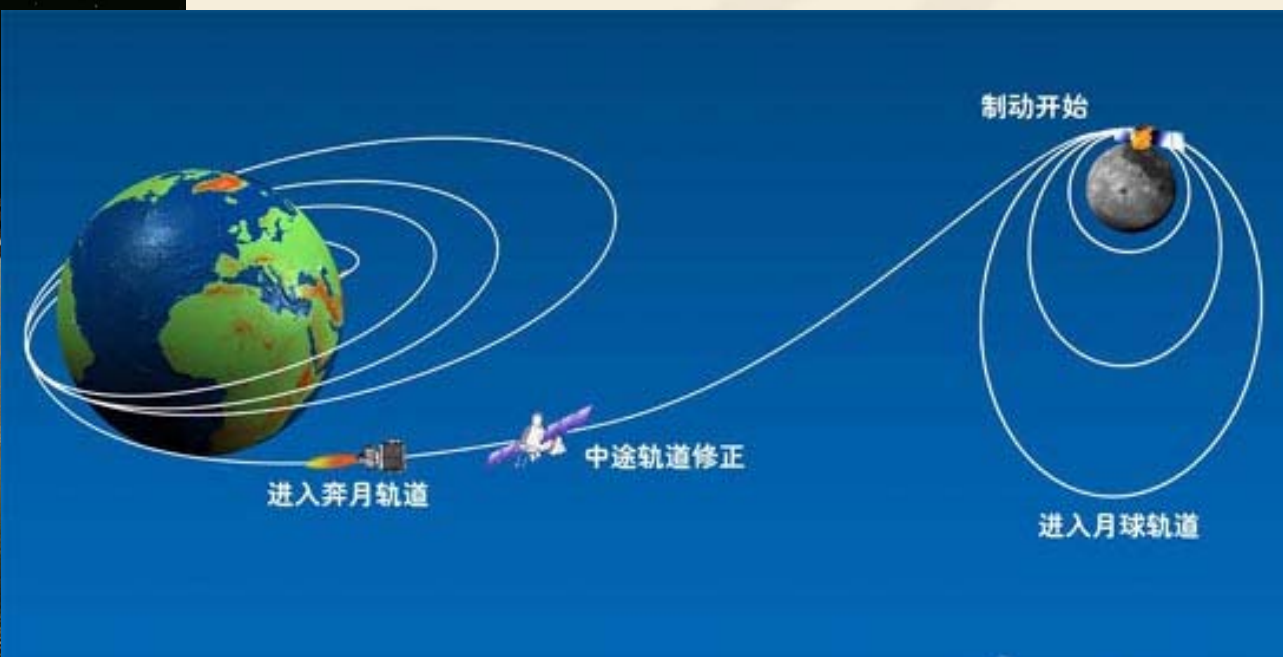
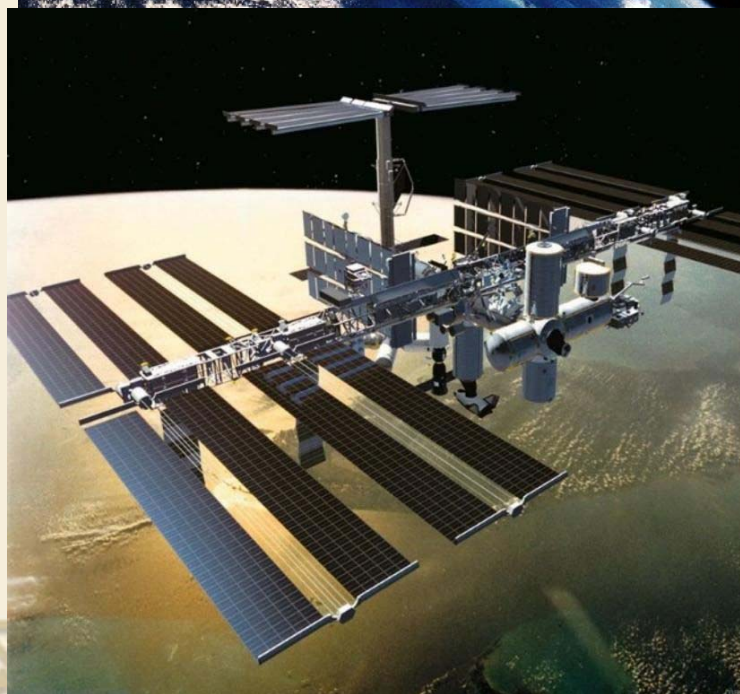
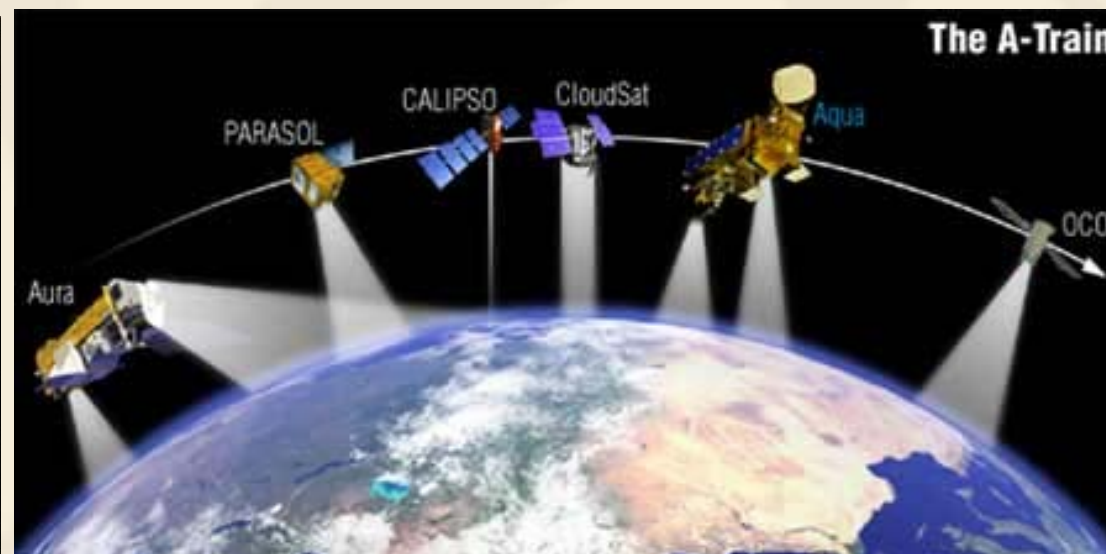
Why study DSP

- ❖ 信息化的基础是数字化
- ❖ 数字化的核心技术之一是数字信号处理
- ❖ 数字信号处理的任务，特别是实时处理的任务，在很大程度都需要**DSP**器件或以**DSP**为核心来完成
- ❖ **DSP**技术已成为人们日益关注的并得到迅速发展的前沿技术。

DSP的应用日益发展



雷达/声呐



视频电话



消费类电子



DC/DV



HDTV



Home Theater



MP3



第一章 绪论

1.1 数字信号处理的定义、特点和方法

1.1.1 数学信号定义

1.1.2 数字信号处理的特点

1.1.3 数字信号处理的方法

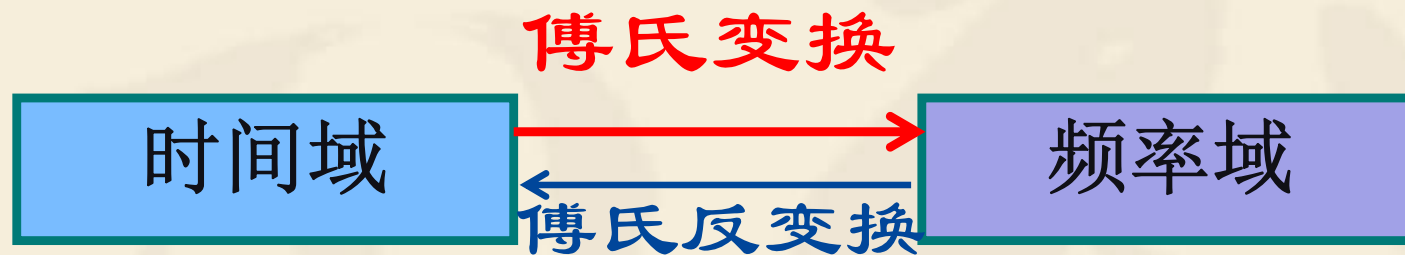
1.1.4 数字信号处理的应用

1.2 数学预备知识

1.2.1 傅里叶变换的几种形式

1.2.2 常用的模拟信号

1.2.1 傅氏变换



❖ 傅氏变换存在的充分、非必要条件:

➤ 根据信号功率: $\int_{-\infty}^{\infty} |h(t)|^2 dt < \infty$ 能量信号 (充分条件)

➤ 狄里赫利收敛条件:

➤ 信号绝对可积, 即 $\int_{-\infty}^{\infty} |h(t)| dt < \infty$

➤ 在任何有限区间内, $h(t)$ 只有有限个最大值和最小值。

➤ 在任何有限区间内, $h(t)$ 只有有限个不连续点, 并且在每个不连续点上信号都必须是有限值。

1.2.1 傅氏变换：几种定义

- 第一形式：频率变量

$$H_1(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

$$h_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H_1(f) e^{j2\pi ft} df$$

- 第二形式（本书采用）：角频率变量

$$H_2(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h_2(t) e^{-j\Omega t} dt$$

$$h_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_2(\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega$$

1.2.1 傅氏变换：几种定义

❖ 第三形式：

$$H_3(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} h_3(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

$$h_3(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} H_3(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega$$

■ 说明：

- ❖ 第一种形式e的指数中带有 2π ，第二、第三种形式的前面带 $1/2\pi$ （因为它的核不带 2π ）。
- ❖ 第三种形式把 $1/2\pi$ 拆分在正反变换的两边，保持反变换后的恢复值与原始值一样。
- ❖ 相互转换：

若 $\Omega = 2\pi f$ ，则：

$$\begin{aligned} h_2(t) &= h_1(t) \\ H_2(\Omega) &= H_2(2\pi f) = H_1(f) \end{aligned}$$

若 $\omega = \sqrt{2\pi} f, \tau = \sqrt{2\pi} t$ ，则：

$$\begin{aligned} h_3(\tau) &= h_1(t) \\ H_3(\omega) &= H_1(f) \end{aligned}$$

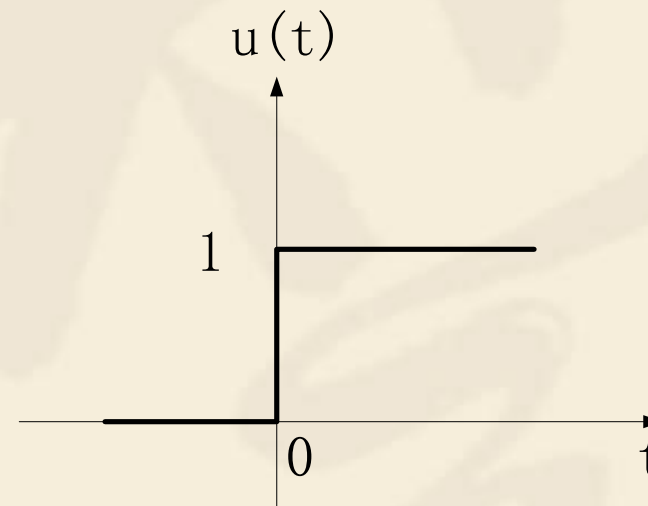
1.2.2 常用的模拟信号函数

- ❖ 单位阶跃函数
- ❖ 矩形函数
- ❖ Sinc函数
- ❖ 冲激函数 (δ 函数)
- ❖ 梳状函数

1.2.2 常用函数：单位阶跃函数

■ 单位阶跃函数

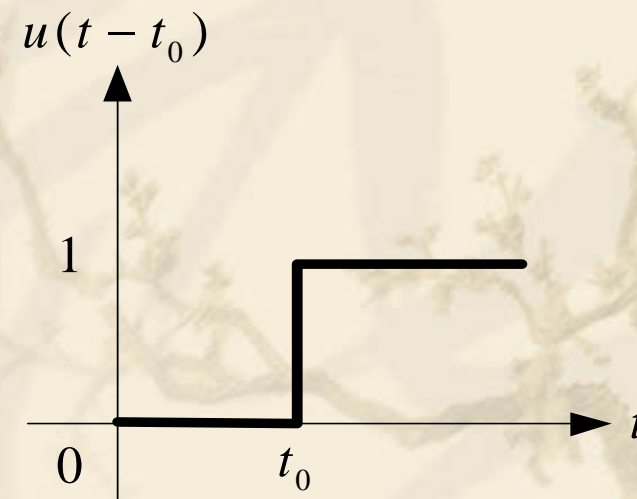
$$u(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ 1 & (t > 0) \\ \frac{1}{2} & (t = 0) \end{cases}$$



傅氏变换： $u(t) \leftrightarrow \pi\delta(\Omega) + \frac{1}{j\Omega}$

延时的单位阶跃函数：

$$u(t - t_0) = \begin{cases} 0 & (t < t_0) \\ 1 & (t > t_0) \\ \frac{1}{2} & (t = t_0) \end{cases}$$



1.2.2 常用函数：矩形函数

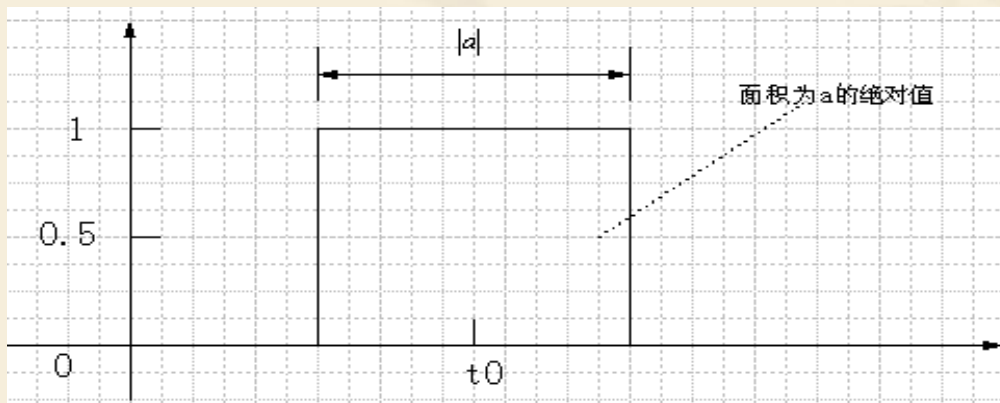
■ 矩形函数

$$\text{rect}\left(\frac{t-t_0}{a}\right) = \begin{cases} 0, & |t-t_0| > \frac{|a|}{2} \\ 1/2, & |t-t_0| = \frac{|a|}{2} \\ 1, & |t-t_0| < \frac{|a|}{2} \end{cases}$$

此函数只与 $|a|$ 的大小有关，与 a 的正负无关， t_0 是中心点处。

当 $t_0 = 0$ ， $a=1$ 时， $\text{rect}(t)$ 的傅氏变换为：

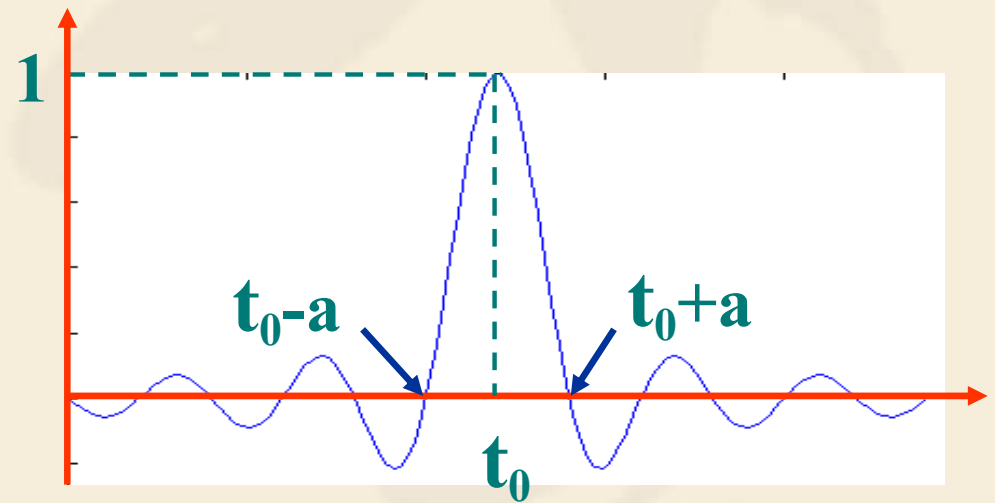
$$\text{rect}(t) \rightarrow \frac{\sin \Omega / 2}{\Omega / 2}$$



1.2.2 常用函数：Sinc 函数

■ Sinc 函数（偶函数）

$$\text{sinc}\left(\frac{t-t_0}{a}\right) = \frac{\sin \pi[(t-t_0)/a]}{\pi[(t-t_0)/a]}$$



sinc 函数是偶对称的，其曲线对t 轴形成的面积为a，即：

$$\int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{t-t_0}{a}\right) dt = a$$

其傅氏变换为：

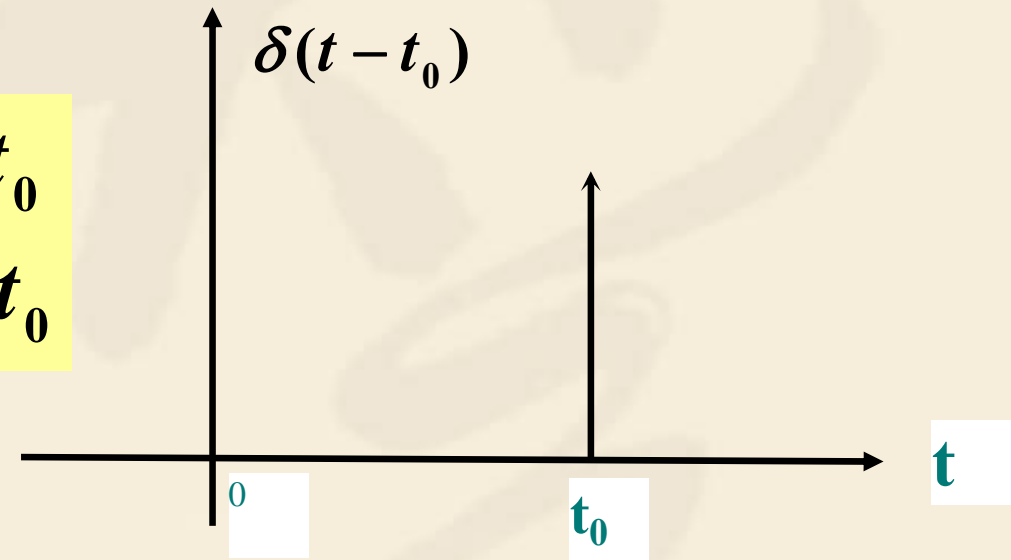
$$\text{sinc}\left(\frac{\sigma}{2\pi}t\right) \leftrightarrow \frac{2\pi}{\sigma} \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\sigma}\right)$$

矩形函数 **Rect** 和 **Sinc** 函数互为傅氏变换。

1.2.2 常用函数：冲激函数

■ δ 函数（冲激函数）

$$\delta(t - t_0) = \begin{cases} 0, & t \neq t_0 \\ \infty, & t = t_0 \end{cases}$$



其傅氏变换为：

$$\delta(t) \leftrightarrow 1$$

$$\delta(t - t_0) \leftrightarrow e^{-j\Omega t_0}$$

$$e^{-j\Omega_0 t} \leftrightarrow 2\pi\delta(\Omega + \Omega_0)$$

δ 函数和指数函数互为傅氏变换

1.2.2 常用函数：冲激函数性质

- 偶函数 $\delta(t) = \delta(-t)$
- 积分 $\int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau = u(t)$
- 微分 $\frac{d}{dt} u(t) = \delta(t)$
- 时间尺度变换 $\delta(at - t_0) = \frac{1}{|a|} \delta(t - \frac{t_0}{a})$ $\delta(\frac{(t-t_0)}{a}) = |a| \delta(t - t_0)$
- 筛选特性
(相乘特性) $\delta(t - t_0) f(t) = f(t_0) \delta(t - t_0)$
- 卷积特性 $f(t) * \delta(t) = f(t)$
 $f(t) * \delta(t - t_0) = f(t - t_0)$

重要性质

1.2.2 常用函数：梳状函数

■ 梳状函数

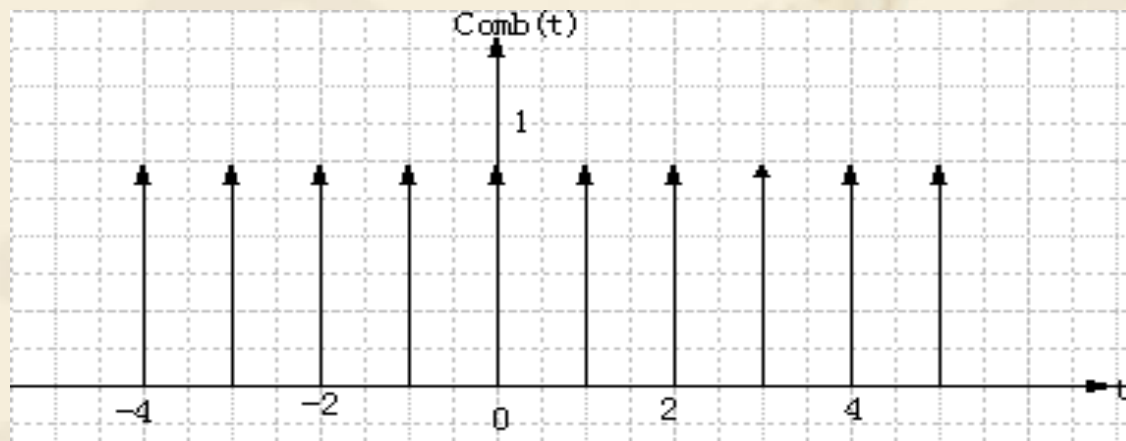
δ 函数周期延拓后形成：

$$Comb(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - n)$$

更一般的形式为：

$$Comb\left(\frac{t - t_0}{T}\right) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\frac{t - t_0}{T} - n\right) = T \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0 - nT)$$

δ 函数的标尺特性



1.2.2 常用函数：梳状函数

由梳状函数引出一个重要函数--**取样函数**

$$p(t) = \frac{1}{T} \text{Comb}\left(\frac{t}{T}\right) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$$

梳状函数和取样函数的**傅氏变换**分别为：

$$\text{Comb}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - n) \leftrightarrow \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-jn\Omega}$$

(线性变换)

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \leftrightarrow \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-jnT\Omega}$$

本章小结

- ❖ 介绍了数字信号处理的定义、特点、方法和应用
- ❖ 介绍了一些数学预备知识，以及一些常用的模拟信号（函数）：
 - ✧ 重要：傅氏变换的定义和性质（熟悉）
 - ✧ 重要：矩形函数
 δ 函数及其特性
(可以推导到梳状函数和取样函数)