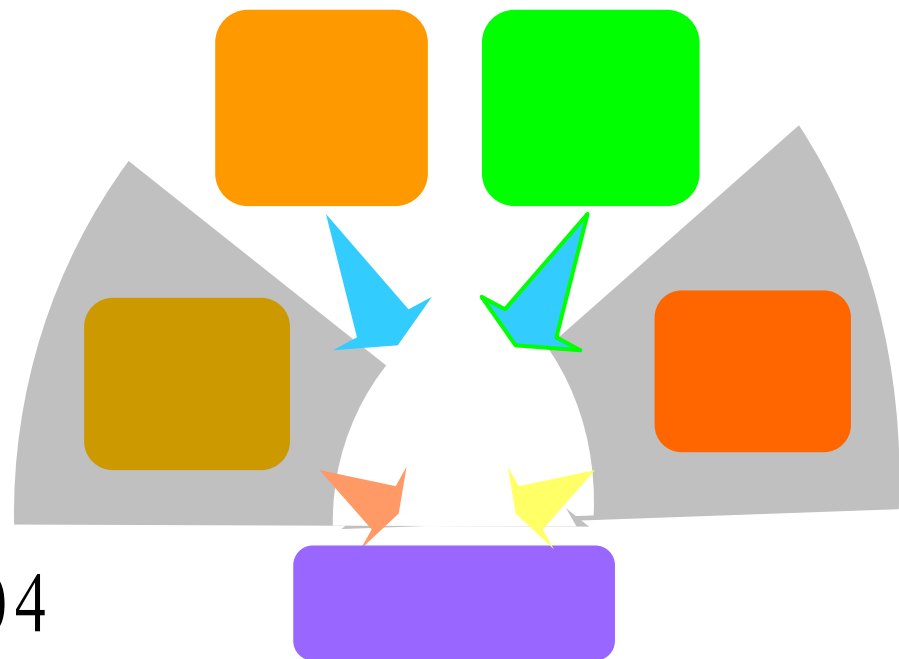


课程要求

- 平时作业: 10%
- 上机实验: 15%
- 期末考试: 75%



◆ 答疑 新主楼-B704

◆ 电话: 82338314

◆ 助教: 王林、张佳甜

wangr @ buaa.edu.cn

考核方式&交作业形式

- 期末考核采用半开卷考试方式，即允许学生带一张A4纸进考场，学生可以在A4纸上归纳总结所有自己认为重要的内容。
- 做完一章作业后，课代表收齐交上。

掌握基础知识，
会做重点题型， 获得理想成绩

课程内容

- 信号与信号处理的基本概念
- 信号分析与处理基础
- 离散时间序列及其Z变换
- 离散时间信号分析 (DFS,DFT,FFT)
- 数字滤波基础(差分方程, Z域分析, 模拟滤波器)
- 数字滤波器 (IIR, FIR)
- 随机信号分析基础

教学参考书

- 测试信号处理技术

- 周浩敏, 王睿 北京航空航天大学出版社 ➔

- 信号处理技术基础

- 周浩敏 北京航空航天大学出版社

- 数字信号处理-理论、算法与实现（第二版）

- 胡广书 北京：清华大学出版社，2003

- A. V. Oppenheim, A. S. Willsky with S. H. Nawab. Signals and Systems (Second Edition) . Prentic Hall, 1999 (清华大学出版社影印本)

- 中译本：刘树堂译. 信号与系统（第二版）. 西安：西安交通大学出版社，1998



北京市高等教育精品教材立项项目

测试信号处理技术

周浩敏 王睿 编著

CESHI XINHAO CHULIJISHU



北京航空航天大学出版社

内容简介

本书主要介绍了信号分析与处理的理论知识,包括:连续和离散时间信号的频谱分析、模拟和数字滤波器的设计原理及方法;同时介绍了随机信号分析、现代信号处理技术的基本概念及基本分析方法。

全书共8章,包括:连续周期信号的傅里叶级数、连续非周期信号与抽样信号的傅里叶变换、离散时间序列与 z 变换、离散时间信号分析、数字滤波基础、数字滤波器、随机信号分析和现代信号处理技术等内容。

本书可作为测控技术与仪器、自动化、电器工程和机电工程等大学本科专业的教科书,也可作为相关专业工程硕士的教材以及工程技术人员学习信号分析与处理技术的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

测试信号处理技术/周浩敏等编著. — 北京:北京航空航天大学出版社, 2004.9

ISBN 7-81077-496-4

I. 测… II. 周… III. ①信号分析—高等学校—教材②信号处理—高等学校—教材 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 045097 号

测试信号处理技术

周浩敏 王睿 编著

责任编辑 韩文礼

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

http://www.buaapress.com.cn E-mail:bhpress@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

开本:787×960 1/16 印张:28.75 字数:644千字

2004年9月第1版 2004年9月第1次印刷 印数:3 000册

ISBN 7-81077-496-4 定价:38.00元

内容提要

- 信号的概念、描述、分类
- 信号分析与处理的目的、方法
- 基本连续信号介绍
- 连续信号的基本运算

信号的概念

信号是反映（或载有）信息的各种物理量，是系统直接进行加工、变换以实现通信的对象。

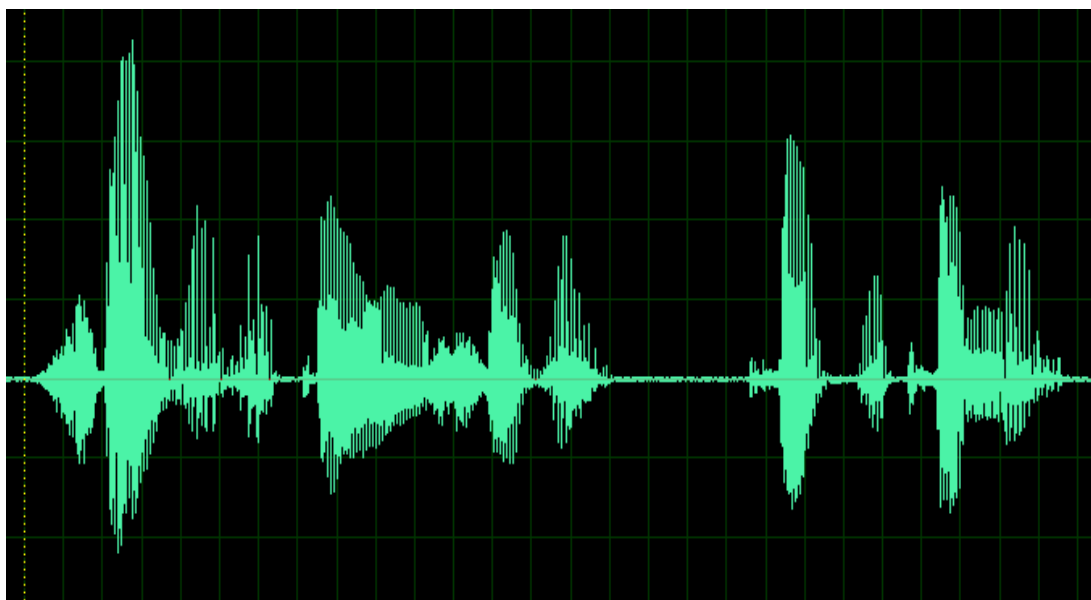
信号是信息的表现形式，信息则是信号的具体内容。

- 自然和物理信号
 - 例如：语音、图象、地震信号、生理信号等
- 人工产生的信号
 - 例如：雷达信号、通讯信号、医用超声信号、机械探伤信号等

信号是信息的载体

信息本身不具备传输和交换的能力，而必须通过信号来实现。

信号是随时间变化的物理量（电、光、文字、符号、图像、数据等），可以认为它是一种运载信息的函数。



信号是信息的载体



图像



图形

信号的获得

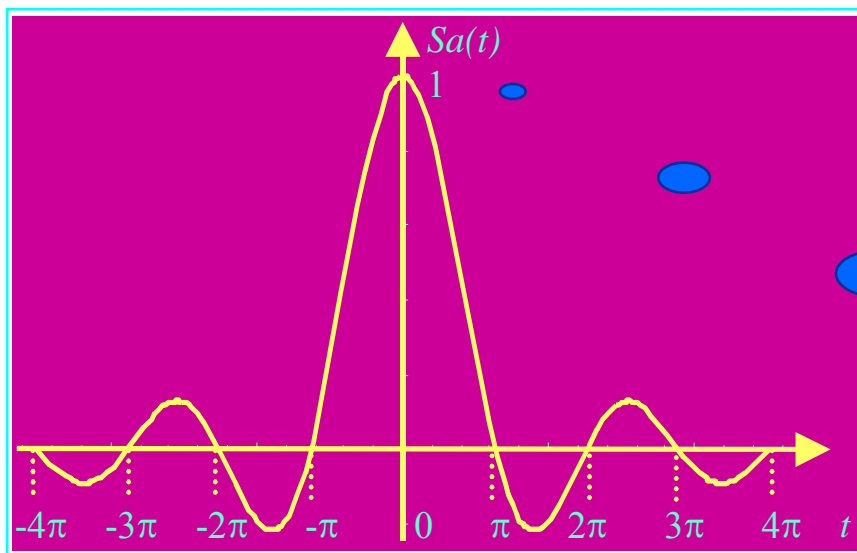
- 声音： 麦克风将声音信号转变成为电信号
- 图像：
 - 模拟相机： 光信号控制胶片上的化学反应
 - 数字相机： 光信号产生电荷包，再转变为二维栅上的电信号
- ○ ○ ○ ○ ○ ○

各种信号的传感器

- 声音：麦克风
- 光：半导体器件，如：光电二极管，光电晶体管，CMOS, CCD(电荷耦合器件)芯片。载流能力随入射光而变化。
- 温度：热敏电阻(阻值随温度变化)，半导体器件，热电偶(对温度反应不同两种金属制成，温差导致电压)。
- 其他：
 - 应力传感器，压力传感器，流量传感器

- **II 波形描述**

— 按照函数随自变量的变化关系，把信号的波形画出来。



$$Sa(t) = \frac{\sin(t)}{t}$$

- I 数学描述

- 使用具体的数学表达式，把信号描述为一个或若干个自变量的函数或序列的形式。

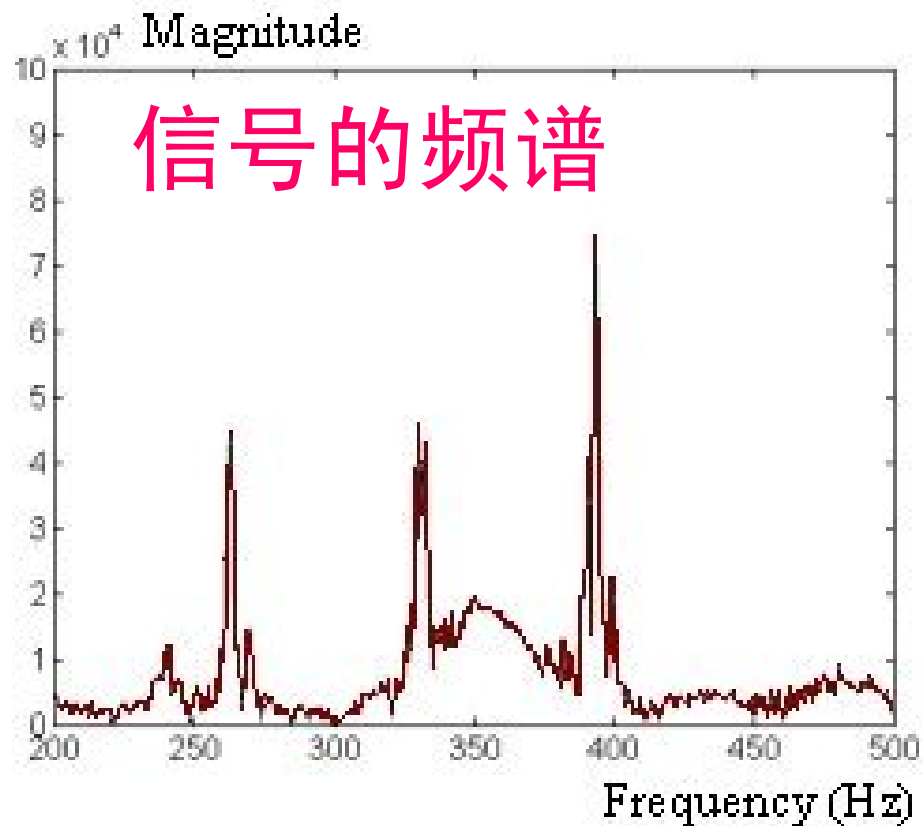
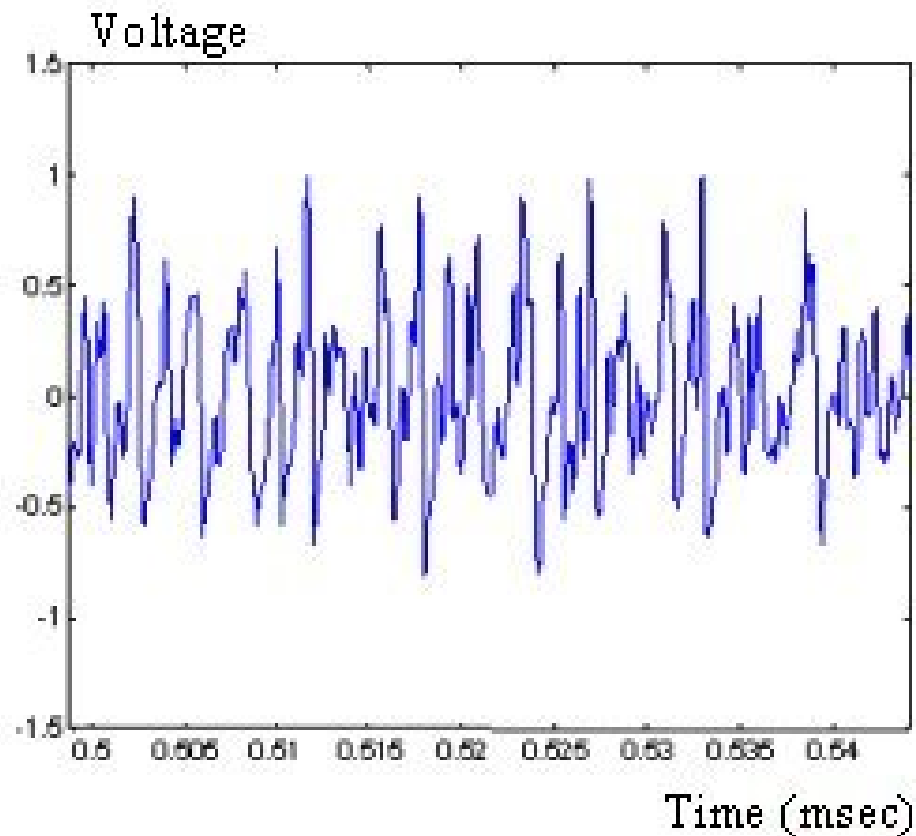
$$f(t) = \sin(t)$$

因此，常可将“信号”与“函数”和“序列”等同起来

$$x(n) = a^n u(n)$$

$$f(t) = \frac{\sin(t)}{t}$$

信号的波形



信号的分类

确定信号与随机信号

要点： 给定的自变量的值，是否可以唯一确定信号的取值。

区分方法： 任意给定一个自变量的值，如果可以唯一确定其信号和取值，则该信号是确定信号，否则，如果取值是不确定的随机值，则是随机信号。

周期信号与非周期信号

要点： 关系式是否成立？ $f(t) = f(t+T), \forall t \in R$

周期信号的周期（正值）：

最小
T值

非周期信号可以视为是周期无穷大的周期信号。

时限信号和频限信号

要点： 一个信号不可能在时域和频域上都是有限的

关于周期信号

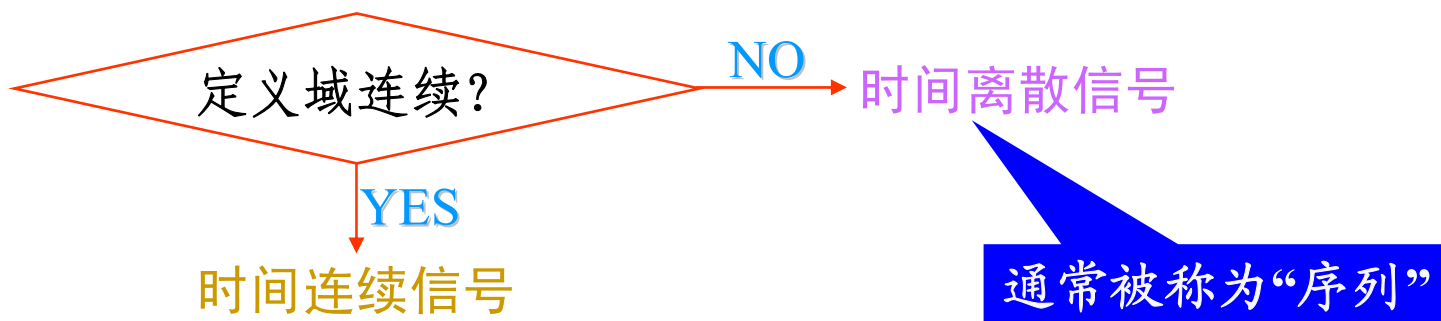
- 对于周期信号，因信号周期重现，所以通常只关心周期区间的宽度，而对区间的起点则可以根据需要来定
- 判断信号是否是周期的，参考点可以任意选取，只关心再现时的间隔
- 当周期 $T \rightarrow$ 无穷大时，成为非周期信号
- 考虑如何绘制周期信号示意图：
 - 复制+平移 \longleftrightarrow 数学表达方式？

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_0(t - nT)$$

信号的分类

时间连续信号与时间离散信号

信号的自变量是否在所讨论的整个连续区间内都有定义？



模拟信号、量化信号、抽样信号与数字信号

模拟信号的定义域和值域都是连续的；

量化信号的定义域连续而值域离散；

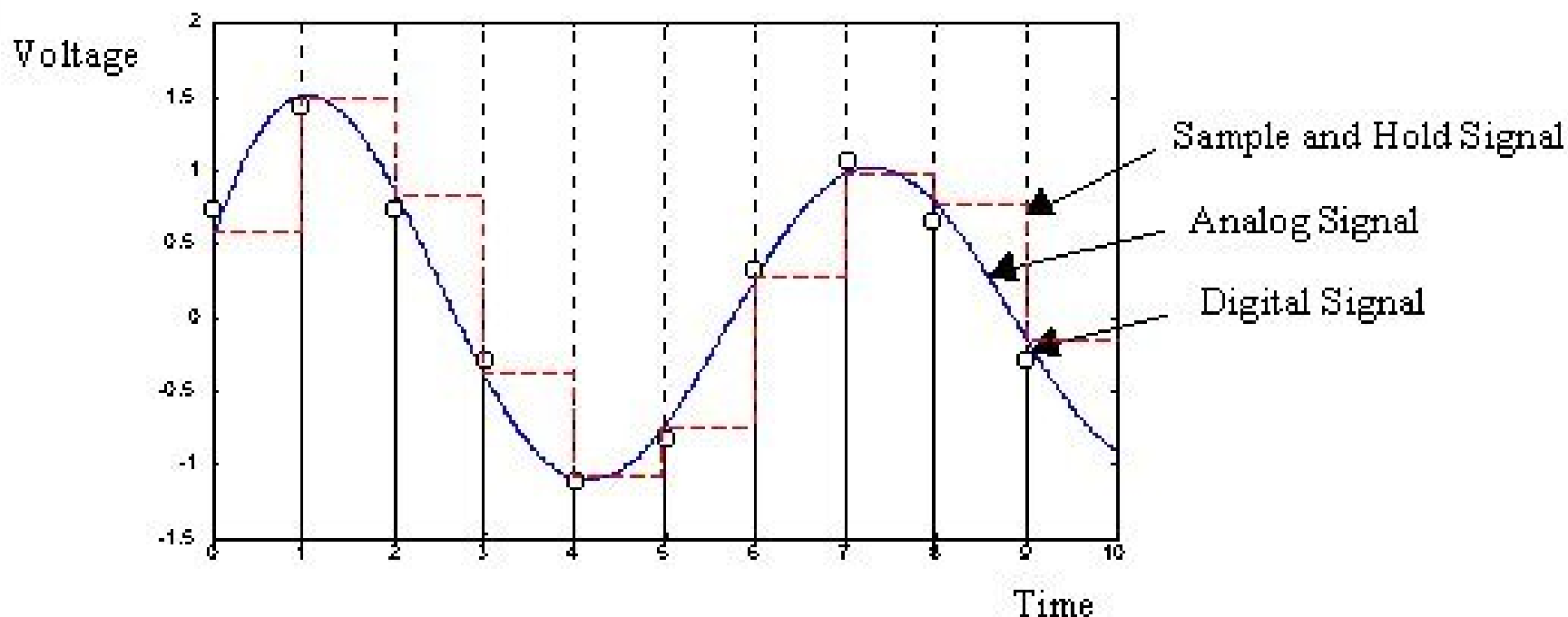
抽样信号的定义域离散而值域连续；

数字信号在定义域和值域都是离散的。

计算机特别适合于处理数字信号

信号的分类

模拟信号，抽样信号，数字信号



注意抽样信号与数字信号的取值是有差异的!

信号的分类

能量信号与功率信号

定义信号的能量为：

$$\text{连续时间信号 } E[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \|f(t)\|^2 dt$$

$$\text{离散时间信号 } E[f(n)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \|f(n)\|^2$$

定义信号的功率为：

$$\text{连续时间信号 } P[f(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \|f(t)\|^2 dt$$

$$\text{离散时间信号 } P[f(n)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \|f(n)\|^2$$

如果信号的能量是**有限**的，则称为**能量有限信号**，简称**能量信号**。

如果信号的功率是**有限**的，则称为**功率有限信号**，简称**功率信号**。

信号分析

信号分析是将一**复杂信号**分解为若干**简单信号**分量叠加，并以这些分量的组成情况去考察信号的特性。

信号分析的基本方法

把频率作为信号的自变量，在频域里进行信号的频谱分析

信号的频谱有两类

幅度谱和相位谱

为什么要进行信号处理??

信号处理及其目的

信号处理

对信号进行某种加工变换或运算（**滤波、相关、卷积、变换、增强、压缩、估计、识别**等），获取信息或变换为人们希望的另一种信号形式。

信号处理的目的

去伪存真

去除信号中**冗余**的和**次要**的成分。

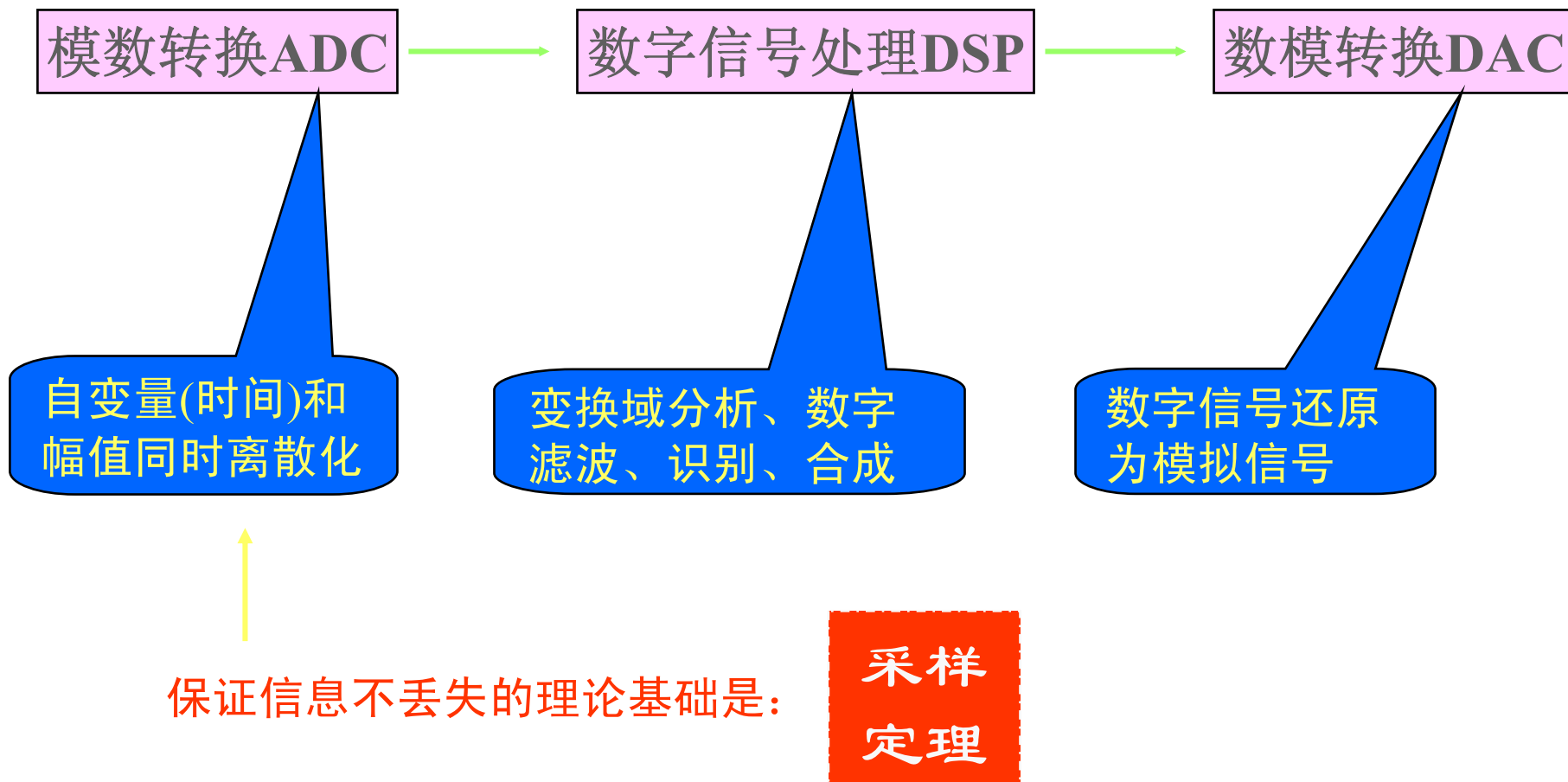
特征抽取

把信号变成易于进行**分析**和**识别**的形式。

编码解码

把信号变成易于**传输、交换与存储**的形式（编码），或从编码信号中恢复出原始信号（解码）。

数字信号处理的步骤



数字信号处理(DSP)系统

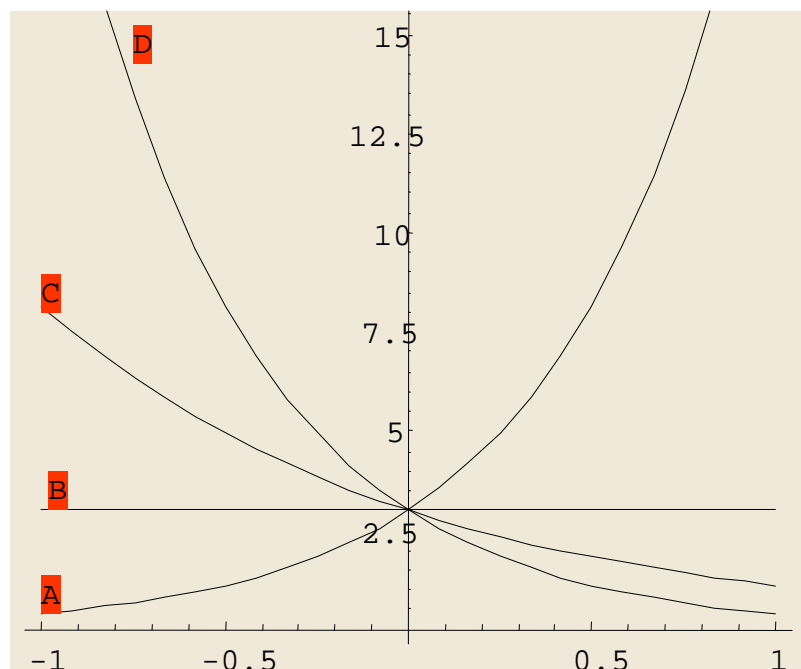
- 计算机的普及和高速处理能力，引起了数字信号的广泛应用，促进了数字信号技术的发展
- 数字系统的工作具有可预测性和可重复性。模拟系统是由元器件搭建而成的电路，制造误差范围大，特性随温度变化
- 体积小，功耗低。移动手机的发展
- 😊 高度的灵活性：
 - 修改程序中的一些语句就能修改系统

DSP的应用实例

- 蜂窝电话
- 声纳处理
- 卫星图像分析
- 语音识别
- 语音合成
- 文字识别
- 远程医疗监护
- 数字测绘
- 条形码阅读
- 数字摄像机
- 加密
- 磁共振成像扫描
- 高清晰度电视
- 地震波分析
- 数字音频
- 音乐合成

典型普通信号

- 指数信号: $f(t) = Ae^{\alpha t}$



参数 α

符号

正号 信号增强A

0

直流信号B

负号 信号衰减CD

绝对值

大 变化速度快D

小 变化速度慢C



微分或积分后还是指数信号

典型普通信号

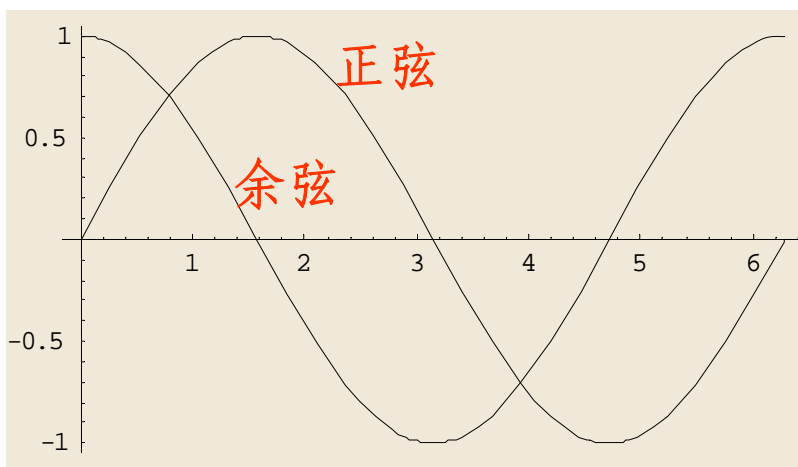
- 正余弦信号:

正弦信号

$$f(t) = A \sin(\Omega t + \theta)$$

余弦信号

$$f(t) = A \cos(\Omega t + \theta)$$



说明：

- (1) A 为振幅
- (2) Ω 为角频率
- (3) θ 为初相位

典型普通信号

- 复指数信号: $f(t) = Ae^{st}$

指数因子s
是复数

$$\begin{cases} e^{j\Omega t} = \cos \Omega t + j \sin \Omega t \\ e^{-j\Omega t} = \cos \Omega t - j \sin \Omega t \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \cos \Omega t = \frac{e^{j\Omega t} + e^{-j\Omega t}}{2} \\ \sin \Omega t = \frac{e^{j\Omega t} - e^{-j\Omega t}}{2j} \end{cases}$$

复指数信号与正余弦信号之间的关系

$$\begin{aligned} f(t) &= Ae^{st} = Ae^{(\sigma + j\Omega)t} \\ &= Ae^{\sigma t} \cdot e^{+j\Omega t} \\ &= Ae^{\sigma t} \cdot (\cos \Omega t + j \sin \Omega t) \\ &= (Ae^{\sigma t} \cos \Omega t) + j(Ae^{\sigma t} \sin \Omega t) \end{aligned}$$

典型普通信号

一个复指数信号可以分解成为实、虚两部分。其中，实部包含余弦信号，虚部则为正弦信号。

指数因子实部 σ 表征了正弦与余弦函数振幅随时间变化的情况：

若 $\sigma > 0$ ，正弦、余弦信号是增幅振荡；

若 $\sigma < 0$ ，正弦、余弦信号是衰减振荡。

指数因子虚部 ω 则表示正弦与余弦信号的角频率。

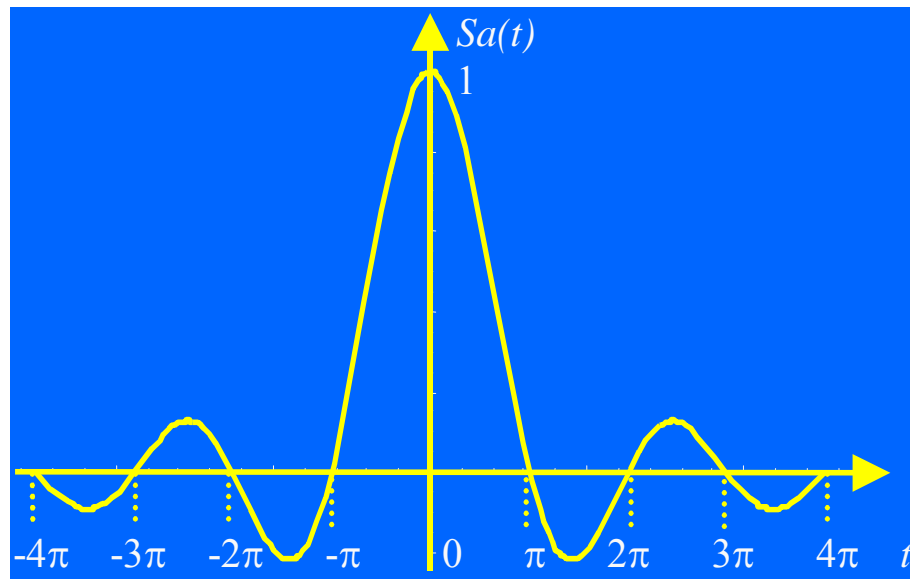
几个特殊情况：

$$f(t) = Ae^{st}$$

- ☆ 当 $\sigma=0$ ，即 s 为虚数，则正弦、余弦信号是等幅振荡；
- ☆ 当 $\omega=0$ ，即 s 为实数，则复指数信号成为一般的指数信号；
- ☆ 当 $\sigma=0$ 且 $\omega=0$ ，即 s 等于零，则复指数信号的实部与虚部都与时间无关，成为直流信号。

典型普通信号

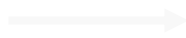
- Sa函数: $Sa(t) = \frac{\sin t}{t}$



特点:

- (1) Sa函数是偶函数
- (2) 过零区间宽度
- (3) Sa函数过零位置

$$\int_{-\infty}^{\infty} Sa(t) dt = \pi$$



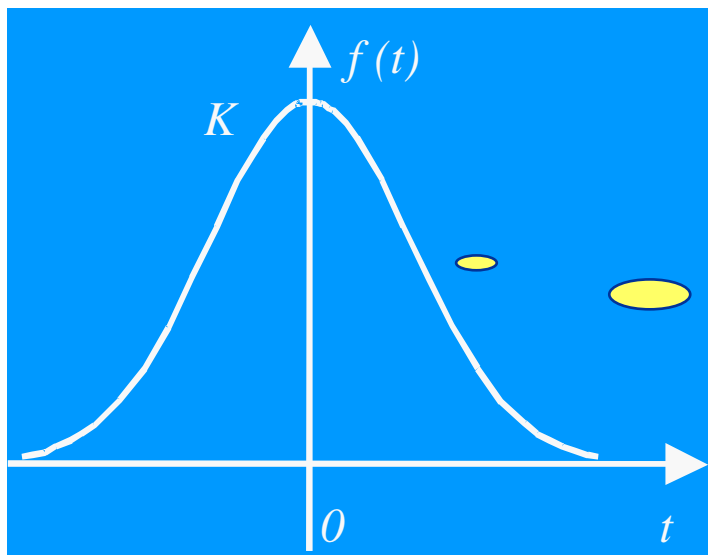
$$\int_{-\infty}^0 Sa(t) dt = \int_0^{\infty} Sa(t) dt = \frac{\pi}{2}$$

Sa(t)函数的注意事项

- 表达式 $Sa(t) = \sin(t)/t$
 - 要注意 $t=0$ 处函数值的求法
- 注意函数的图像特征：偶函数，过零点位置，形状象水母
- 名称：抽样函数
- 与其类似的是 $\text{sinc}(t) = \sin(\pi t)/\pi t$

典型普通信号

- 高斯信号:



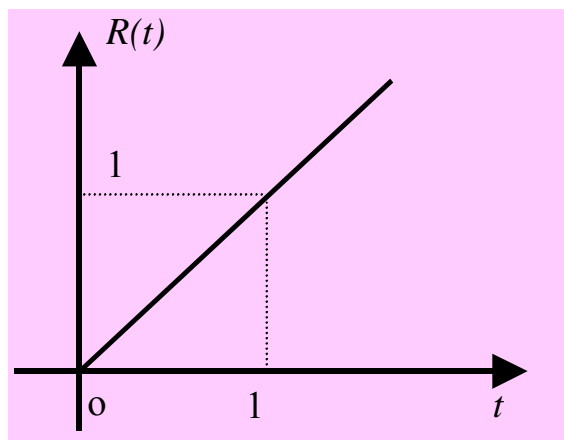
$$f(t) = Ae^{-(t/\tau)^2}$$

$$f\left(\frac{\tau}{2}\right) = Ae^{-\frac{1}{4}} \approx 0.78A$$

特点:

- (1) 形状象一口钟，故有时也称钟形脉冲信号
- (2) 在随机信号分析中有重要地位

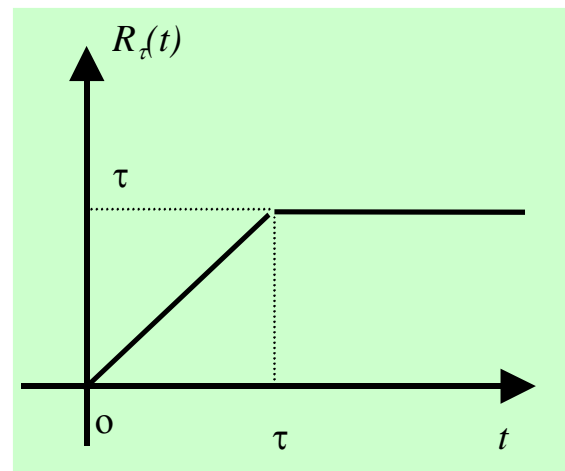
- 单位斜波信号 $R(t)$:



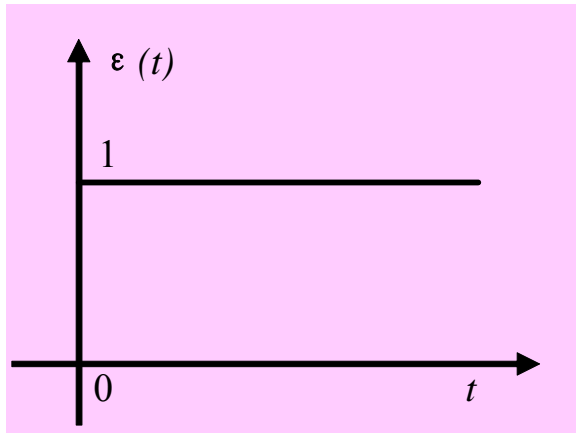
$$R(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ t, & t \geq 0 \end{cases}$$

截顶的单位斜变信号:

$$R(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ t, & 0 \leq t < \tau \\ \tau, & t \geq \tau \end{cases}$$



- 单位阶跃信号 $\varepsilon(t)$:



$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$$

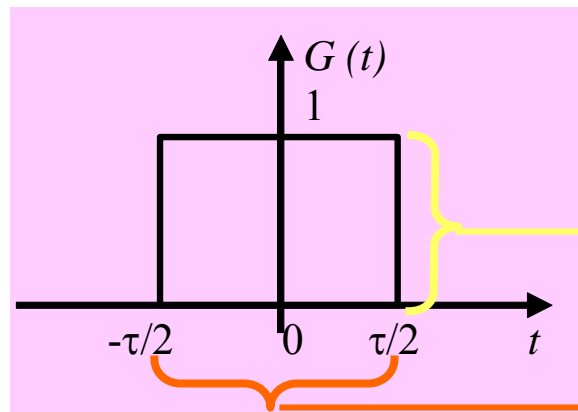
$$\frac{dR(t)}{dt} = \varepsilon(t)$$
$$R(t) = \int_{-\infty}^t \varepsilon(t) dt$$

特点：

- (1) 与单位斜变信号是积分/微分关系
- (2) 用于描述分段信号

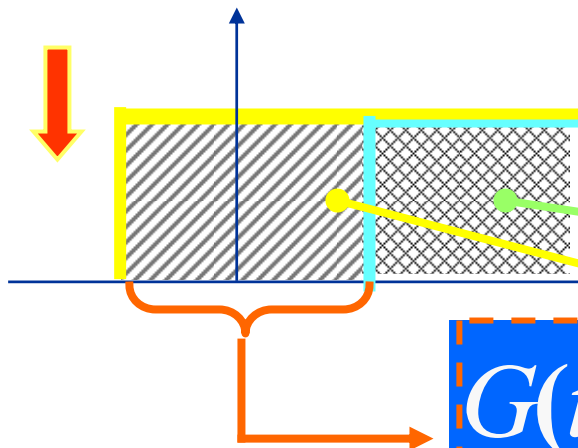
- 单位矩形脉冲信号 $G(t)$:

$$G(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq \tau/2 \\ 0, & |t| > \tau/2 \end{cases}$$



脉高: 矩形脉冲的高度

脉宽: 矩形脉冲的宽度



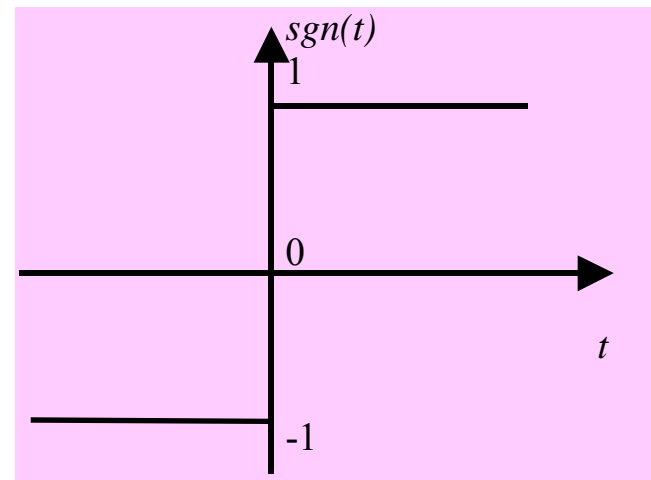
$$G(t) = \varepsilon\left(t + \tau/2\right) - \varepsilon\left(t - \tau/2\right)$$

$$G(t) = \varepsilon(t + \tau/2) - \varepsilon(t - \tau/2)$$

- 通过单位阶跃信号的运算结果，可以不必再用分段的形式表示信号了！
- 其他信号与矩形信号相乘时，只有在矩形信号对应的区间内，其他信号的信息才被保留下来，其余范围都是零
 - 用矩形信号和乘法运算，可以截取某信号的特定区间片段！

- 符号函数 $\text{sgn}(t)$: 用以表示自变量的符号特性

$$\text{sgn}(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ -1, & t < 0 \end{cases}$$



$$\text{sgn}(t) + 1 = 2\varepsilon(t)$$



$$\text{sgn}(t) = 2\varepsilon(t) - 1$$

- 单位冲激信号: $\delta(t)$

引入原因:

描述自然界中那些发生后持续时间很短的现象。

信号定义: \leftarrow 非常规的定义方法

设冲激信号有一个总的冲激强度, 它在整个时间域上的积分等于该强度值, 而在除冲激点之外的其他点的函数取值为零。

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \\ \delta(t) = 0 \quad (t \neq 0) \end{cases}$$

狄拉克定
义式

奇异信号

冲激函数的其他定义方法

- 普通函数取极限逼近
 - 矩形脉冲，三角脉冲，钟形脉冲， $\text{Sa}(t)$

$$\delta(t) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{G(t)}{\tau}$$

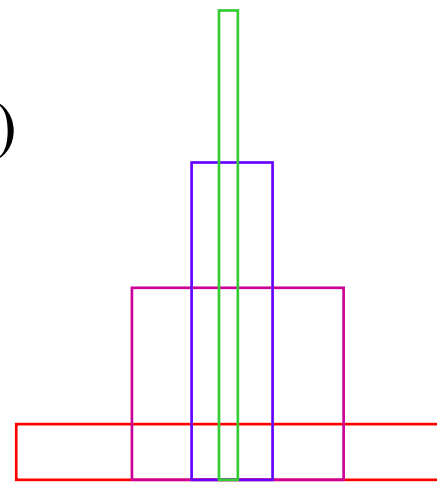
- （借助）卷积运算的定义
 - 卷积不变的函数称为冲激函数

$$f(t) * \delta(t) = f(t)$$

- （借助）分配函数或广义函数的概念
 - 广义函数：函数 \rightarrow 值 映射关系

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \varphi(t) dt = \varphi(0)$$

能从检验函数中筛选出零点处的函数值的广义函数就是冲激函数

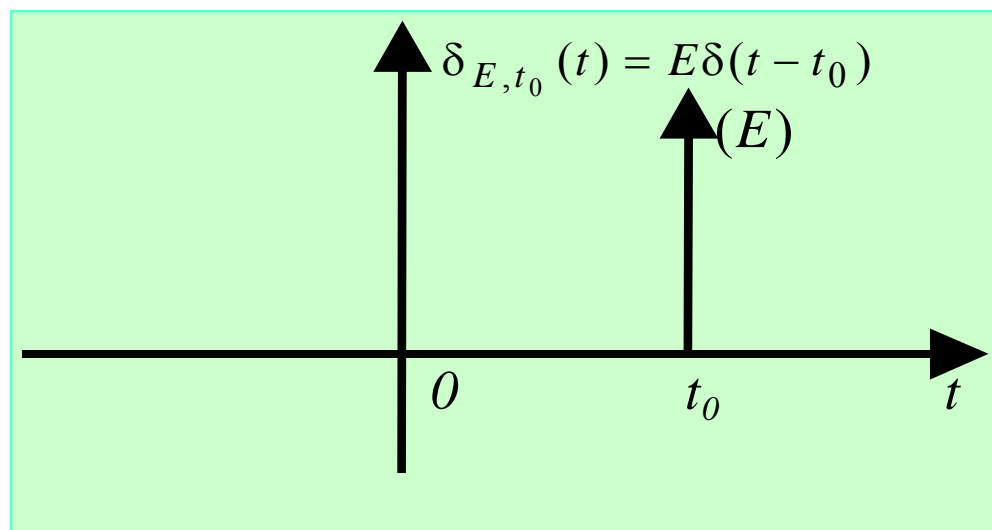


始终保持面积是1

波形表示:

在冲激点处画一条带箭头的线，线的方向和长度与冲激强度的符号和大小一致。

冲激点在 t_0 、强度为 E 的冲激信号



冲激函数的性质：

1 对称性： 冲激函数是偶函数

$$\delta(-t) = \delta(t)$$

2 尺度压扩性：
(时域)

$$\delta(at) = \frac{1}{|a|} \delta(t) \quad (a \neq 0)$$

3 积分：

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau &= 1 \quad (t > 0) \\ \int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau &= 0 \quad (t < 0) \end{aligned}$$

$$\int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau = \varepsilon(t)$$

4 抽样特性☆：

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - t_0) dt = f(t_0)$$

也称“筛选特性”

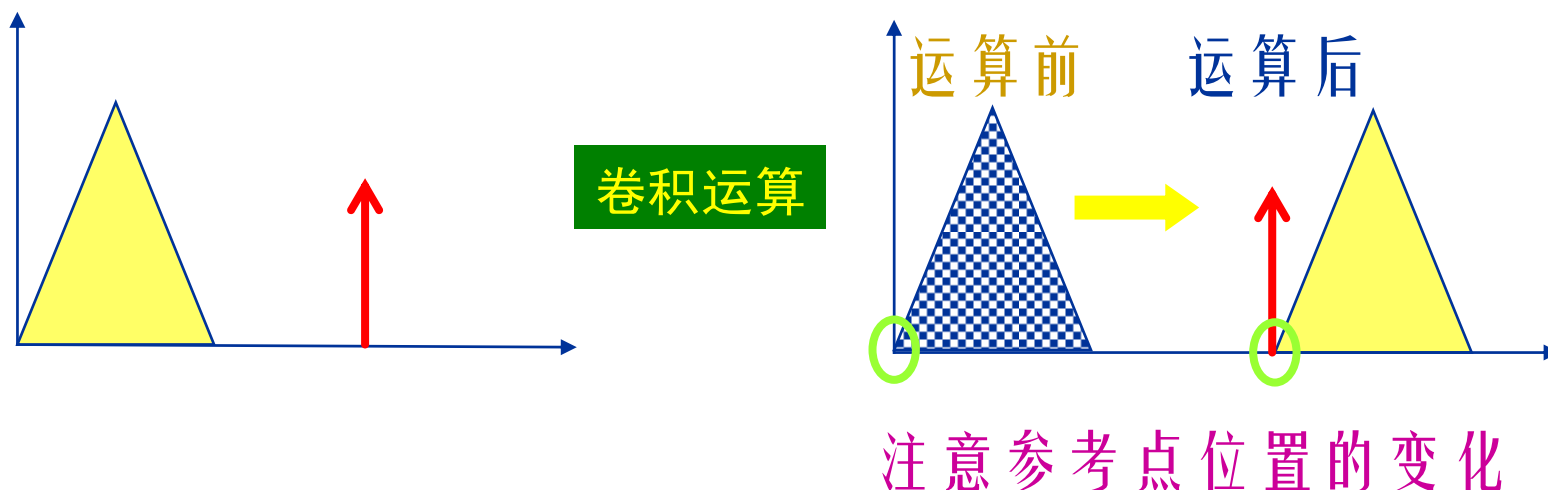
冲激信号的搬移特性

5 搬移特性☆:

函数与单位冲激函数的卷积

$$f(t) * \delta(t - t_0) = f(t - t_0)$$

一个函数与单位冲激函数的卷积，等价于把该函数
平移到单位冲激函数的冲激点位置。



冲激信号的搬移特性

证明:

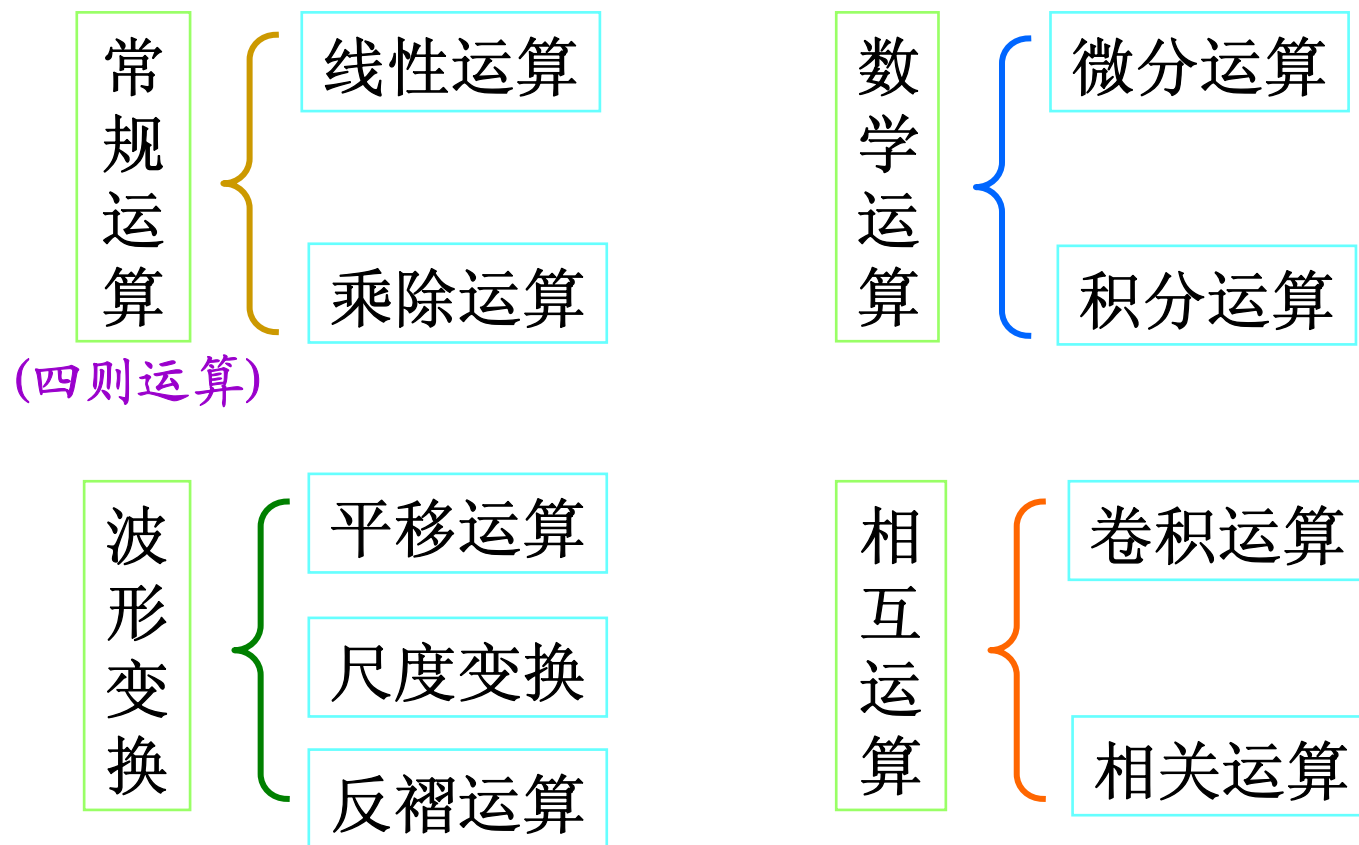
$$f(t) * \delta(t - t_0)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau - t_0) f(t - \tau) d\tau$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau - t_0) f(t - t_0) d\tau$$

$$= f(t - t_0) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau - t_0) d\tau$$

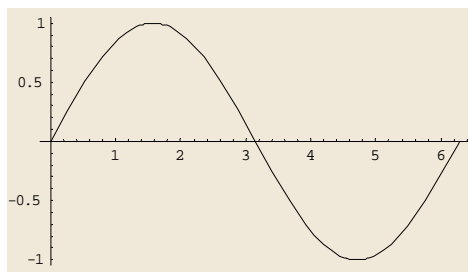
$$= f(t - t_0)$$



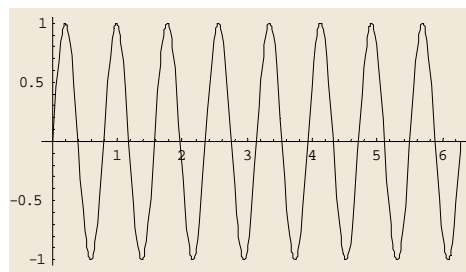
说明：以上分类并不严格，是为了帮助分类记忆而做的。

四则运算：四则运算后的信号在任意一点的取值定义为原信号在同一点处函数值作相同四则运算的结果

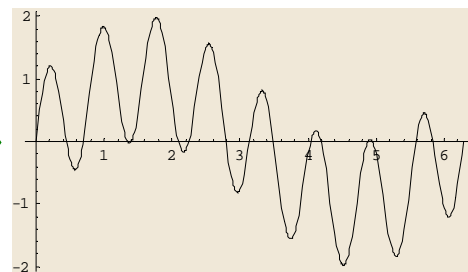
加法



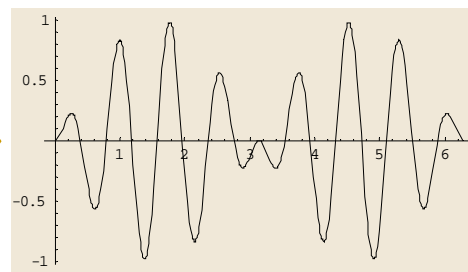
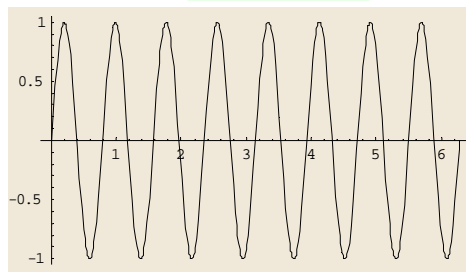
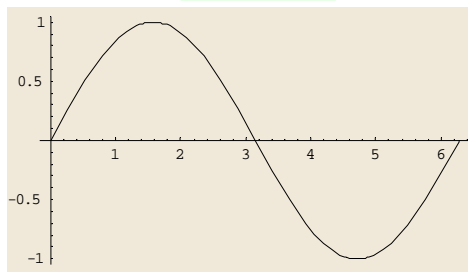
$\sin(t)$



$\sin(8t)$



乘法



注意：乘法不能用星号 $*$ 表示，因为 $*$ 表示卷积运算
信号处理专业的人尤其应注意这一区别！

信号四则运算的用途☆

冲激信号

加法



冲激串

连续信号

乘法

抽样信号

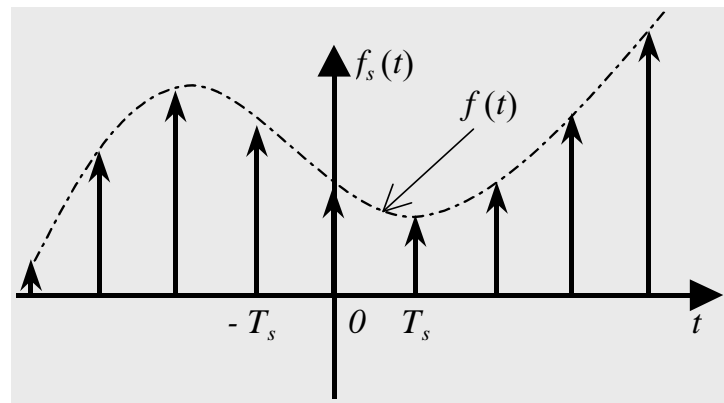
冲激串:

$$\Delta_{T_s}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s)$$

用途

产生抽样信号

抽样信号
波形表示



抽样信号的产生方法

$$f_s(t) = f(t) \cdot \Delta_{T_s}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT_s) \delta(t - nT_s)$$

波形变换

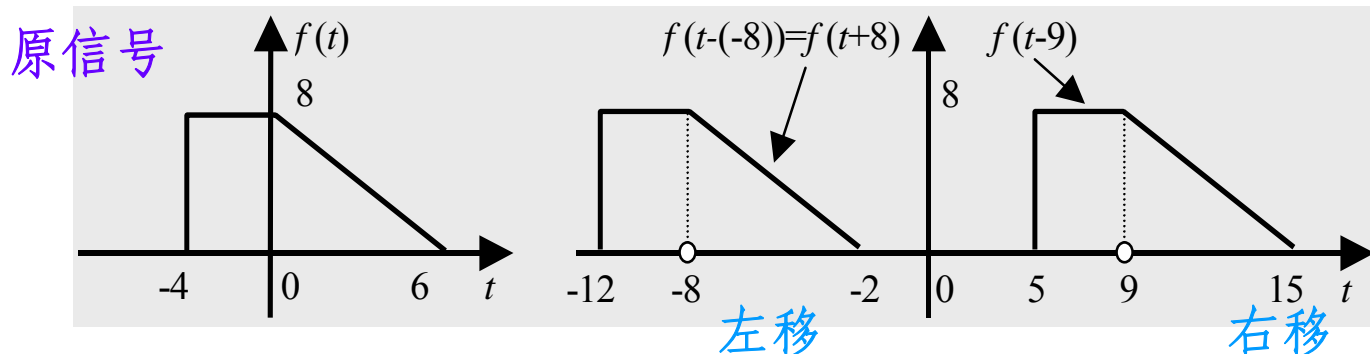
平移运算

$$f(t) \longrightarrow f(t-b)$$

参数 b 决定平移方向和位移量

$b > 0$: 右移

$b < 0$: 左移



将原信号 $f(t)$ 的波形 沿横轴平移 b 个单位。

加强对物理概念的形象思维-----波形被搬移

数学公式 \longleftrightarrow 物理概念

尺度变换 (也被称为压扩运算)

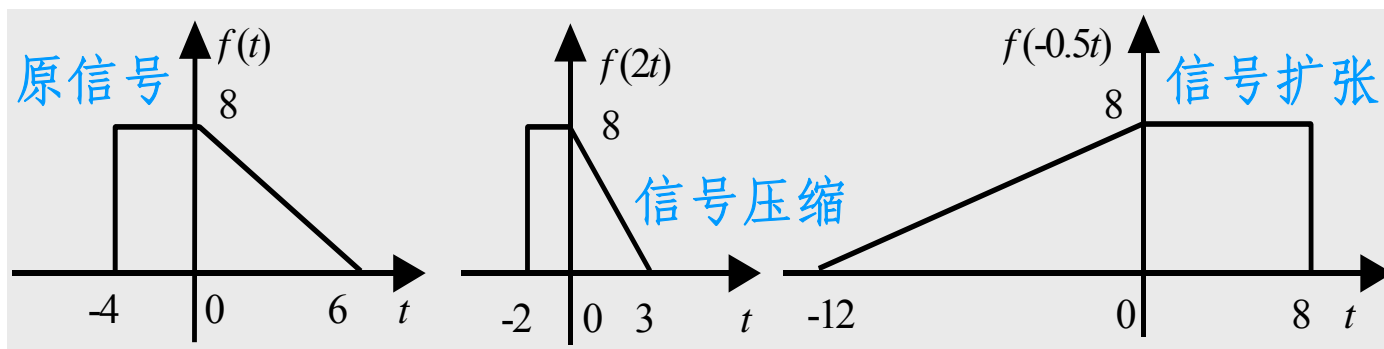
$$f(t) \longrightarrow f(at)$$

参数 a 的符号控制是否先要反褶☆?

>0: 不需反褶 <0: 需要反褶

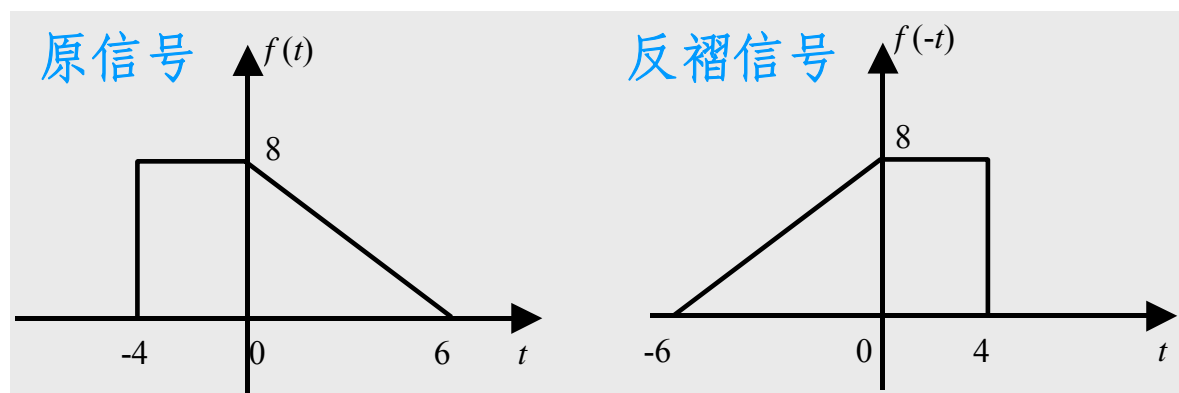
参数 a 的绝对值控制是压缩还是扩张?

>1: 压缩 <1: 扩张 ← 倍数为 $1/|a|$



反褶运算

$$f(t) \longrightarrow f(-t)$$



将原信号 $f(t)$ 的波形按 纵轴对称翻转 过来。

既有平移，又有压扩，还有反褶，如何对波形进行变换？

I 讲课次序：

先平移，再压扩，最后反褶

II 形象思维：

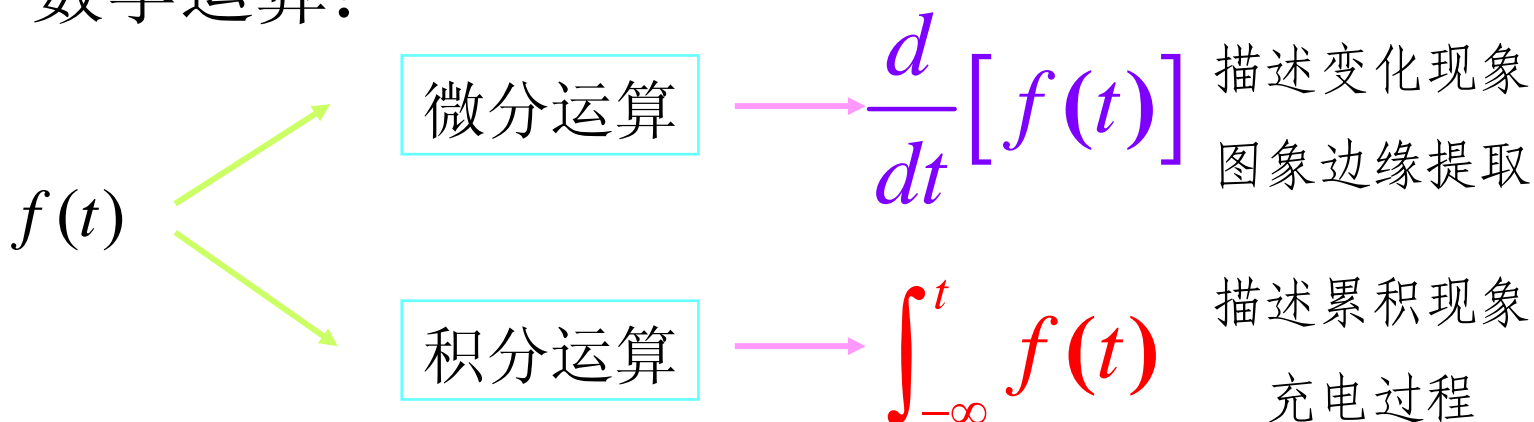
平移（推），压扩（压），反褶（翻）

越来越费劲！

$$f(-at - b) \quad a > 0$$

$$f(t) \Rightarrow f(t - b) \Rightarrow f(at - b) \Rightarrow f(-at - b)$$

数学运算:



连续进行 \rightarrow

连续 n 次微分

$$\left(\frac{d}{dt} \right)^n$$

连续 n 次积分

$$\left(\int_{-\infty}^t dt \right)^n$$

第一章小结

- 知识要点

- 信号的定义、分类
- 常见、常用的信号
- 信号运算

- 知识难点

- ◆ 单位冲激信号：
 - 对定义的理解
 - 性质与用途
- ◆ 信号运算
 - 尺度变换

数学符号 \longleftrightarrow 物理意义

如何进行信号分析和处理？



第二章