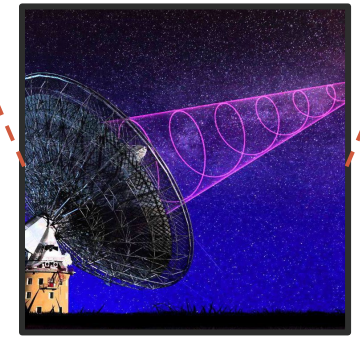
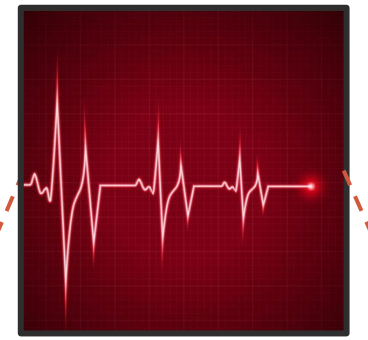
NJUAI 南京大学 人工智能学院
SCHOOL OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE, NANJING UNIVERSITY

00 导论

课程概览，信号、系统的基本概念

信号

消息(message)：常常把来自外界的各种报道统称为消息。
信息(information)：通常把消息中有意义的内容称为信息。

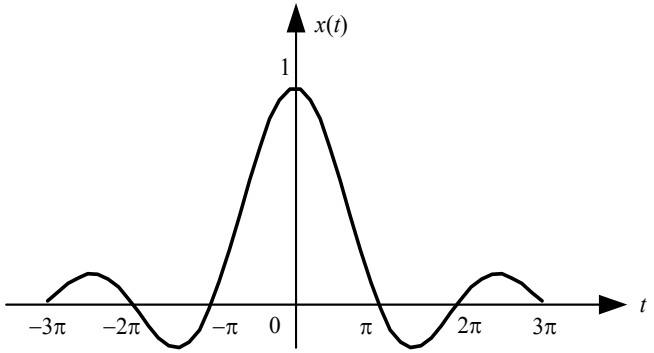



信号 (signal)：信号是**反映信息**的各种物理量，是系统直接进行加工、变换以**实现通信**的对象。信号一般是随时间变化的**有限的实值函数**。

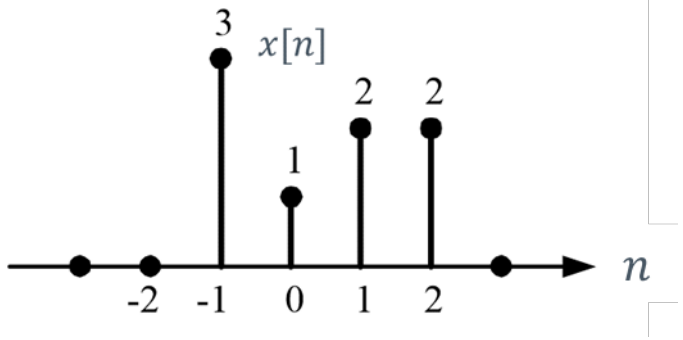
信号是信息（消息）的**表现形式**，信息（消息）是信号的具体内容。信号是**传递信息的载体**，是反映信息的物理量；如：电压、电流、电磁场、声音、烽火、信鸽

信号的分类（从信号输入角度）

- **连续信号**：在观测过程的连续时间范围内信号有确定的值。允许在其时间定义域上存在有限个间断点。通常以$x(t)$表示。
  - 真实世界的信号大多为连续信号



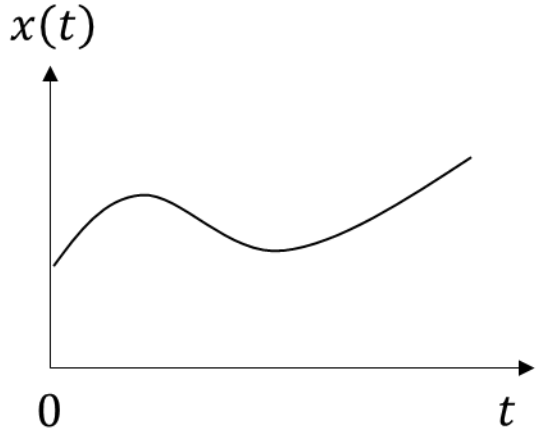
- **离散信号**：信号仅在规定的**离散时刻**有定义。通常以$x[n]$表示。
  - 信号本身具有离散特性（如GDP数据）
  - 对连续信号抽样
  - 计算机内的信号表示



信号的分类（从信号输出角度）

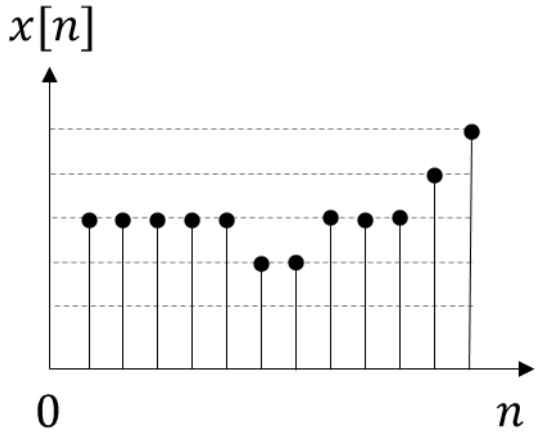
连续信号：在观测过程的连续时间范围内信号有确定的值。

模拟信号：在任意时刻的**取值**是连续的**连续**信号。

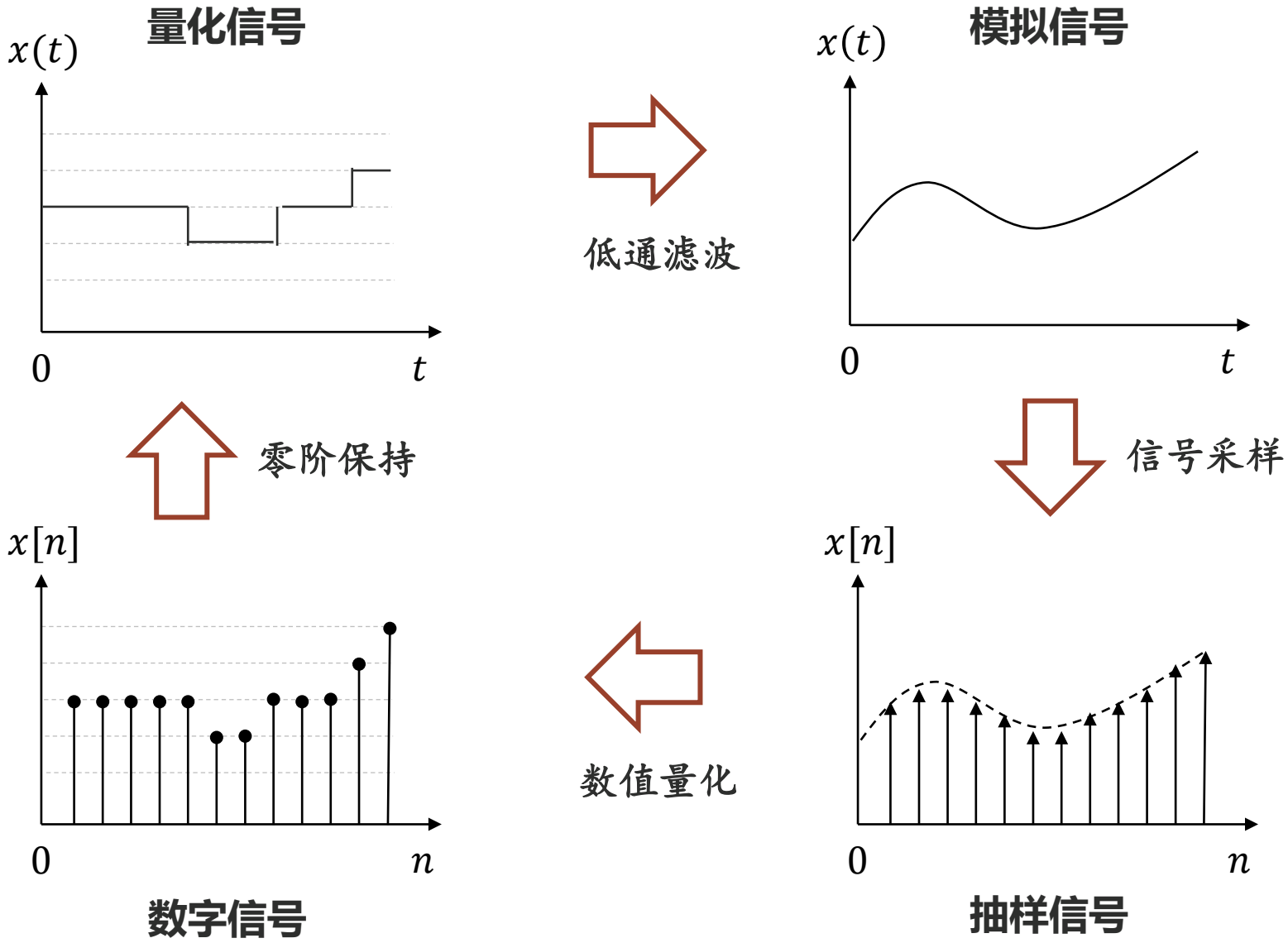


离散信号：信号仅在规定的离散时刻有定义。

数字信号：**取值**为离散的**离散**信号。



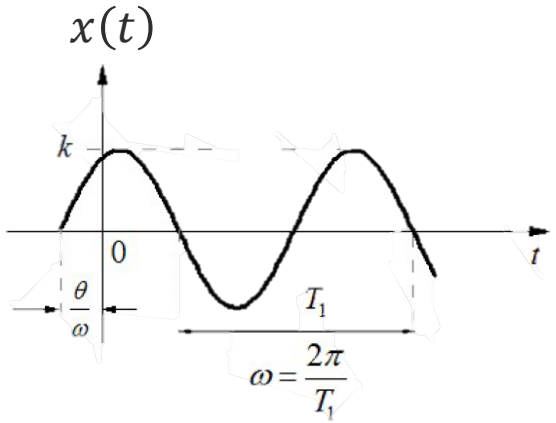
几类信号之间的关系



信号的描述

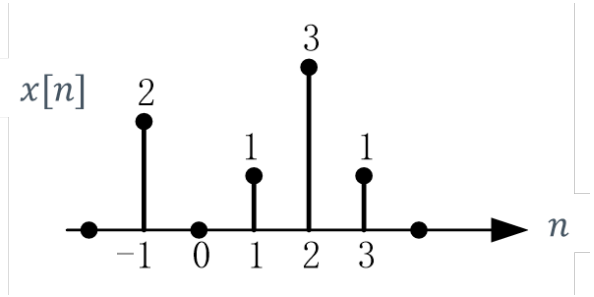
连续信号

- 函数描述：使用数学表达式，把信号描述为一个或若干个自变量的函数或序列的形式。
  - $x(t) = \sin(t)$
  - 一般以**时间**作为自变量
  - 一维信号和多维信号
- 波形描述：按照函数自变量的变化关系，画出信号波形。



离散信号

- 函数表示
  - $x[n] = ke^{-2n}, n = 0,1,2,3,\cdots$
- 波形表示



- 列表表示
  - ↓表示$n = 0$的位置

$$x[n] = [0, 2, 0, 1, 3, 1, 0]$$

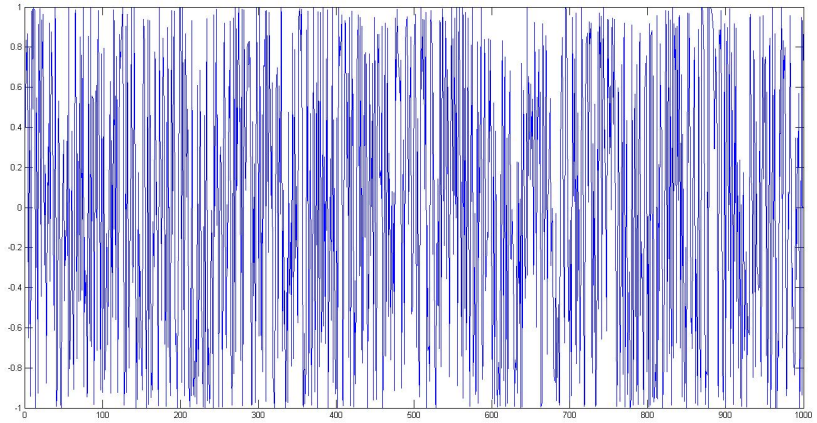
- 序列的表格表示

n	-1	0	1	2	3	4	⋯
$x[n]$	0	1	2	3	4	5	⋯

信号的分类

确定信号：信号随时间变化服从确定的规律，能够以确定的时间函数表示的信号，一般是人工设计的信号

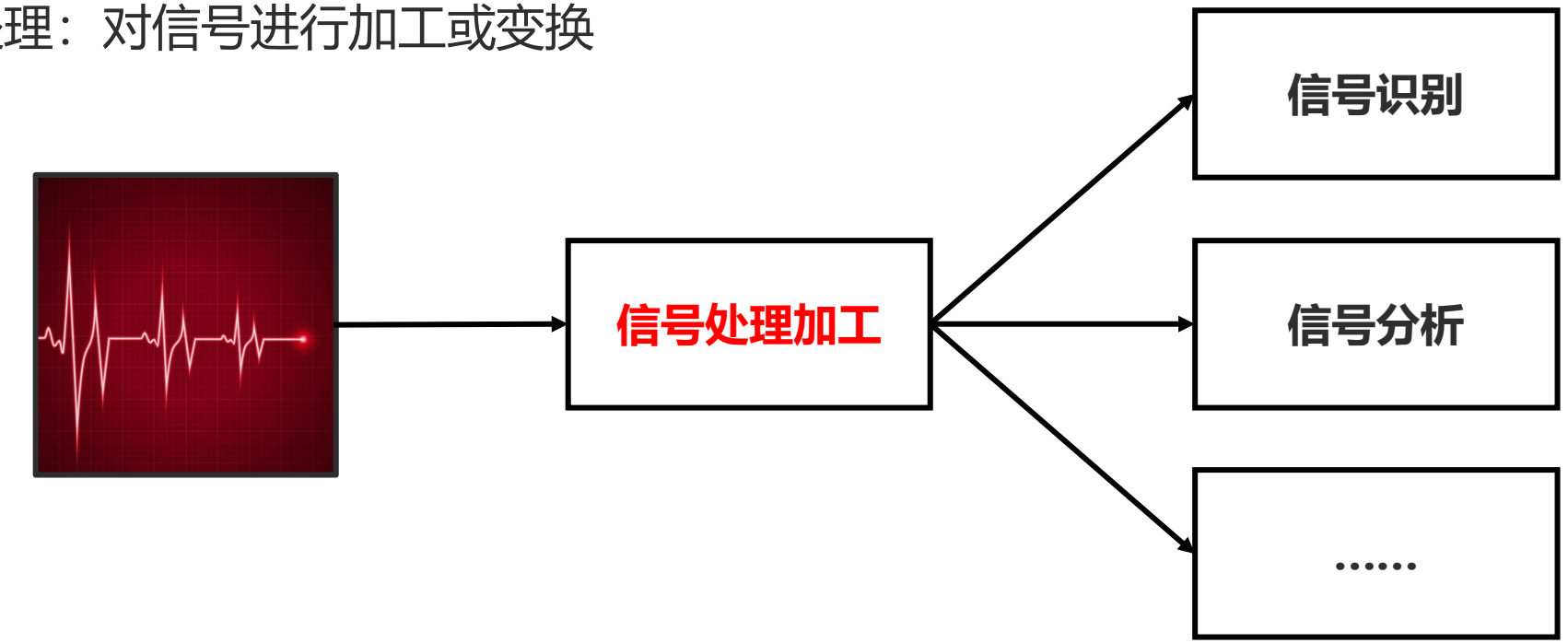
随机信号：不能预知信号随时间变化的规律，信号的幅度、相位一般使用**概率分布/统计特性**描述，一般是自然界产生的信号



时间序列分析：针对**离散随机信号**进行分析、建模、预测

信号的处理、分析和解释

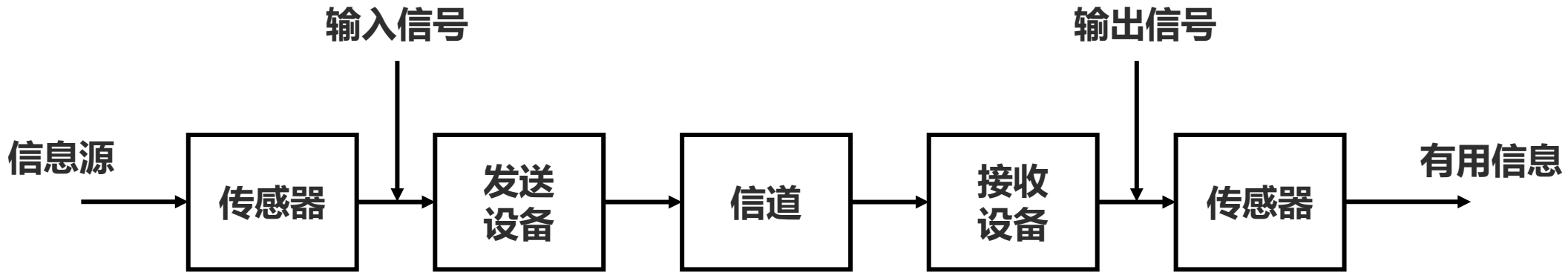
- 信号的处理：对信号进行加工或变换



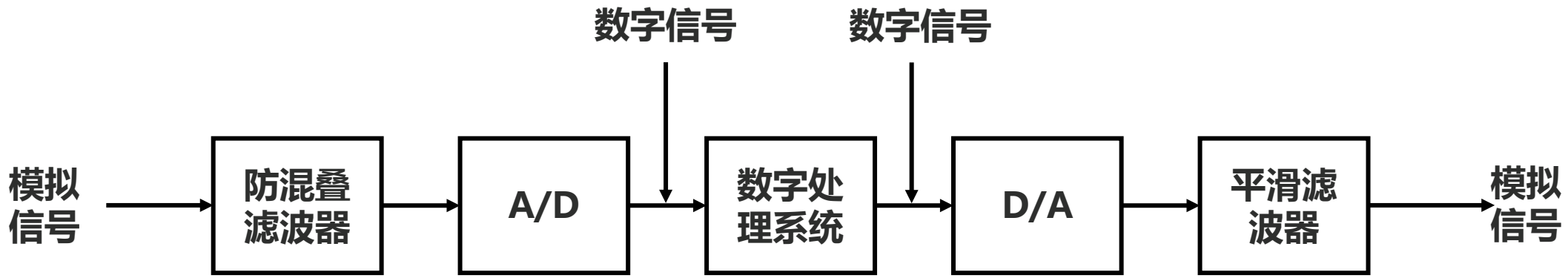
- 信号**传输、交换、处理**相互密切联系，又各自组成独立的学科体系。它们共同的理论基础之一是要研究信号的**基本性能**，包括信号的描述、分解、变换、检测、特征提取等

信号处理与分析的典型过程

- 从信息源到有用信息（电视广播通信系统）



- 数字信号的处理（**A:Analog, D:Digital**）



系统

- 系统 (system) 是指若干相互关联的事物组合而成**具有特定功能的整体**，如电路系统、通讯系统、电力系统、机械系统、政治结构、经济组织、计算机网络，交通网络、神经元系统等等。

信号与系统是相互依存的整体。

信号必定是由系统产生、发送、传输与接收，离开系统没有孤立存在的信号；

系统的重要功能就是对信号进行加工、变换与处理，没有信号的系统就没有存在的意义

数字信号处理的发展历程

Joseph-Louis Lagrange

Jakob I. Bernoulli

Leonhard Paul Euler

1805

Johann Carl Friedrich Gauss

1822

Joseph Fourier

1928

Harry Nyquist

1948

Claude Shannon

1965

James Cooley

John Tukey

数字信号的优点

灵活性高：数字信号处理系统能够在**不改变硬件下，实现不同的系统功能**

可重复性好：数字系统本身具有较好的可重复性

性能优良：数字系统能够对数字信号进行存储运算，获得高性能指标

稳定性好：时间环境改变时，数字信号处理系统不易改变

抗干扰：用0-1表示的数字信号不易受到噪声干扰

易集成：建立在超大规模集成电路基础上的数字信号处理系统体积小、质量轻、成本低、可靠性强

数字信号的缺点

处理带宽小：数字信号能够处理的带宽相对较小，而实际信号的带宽可能很大

动态范围窄：动态范围是系统能够通过**最大信号与系统内在噪声之比**。模拟系统的动态范围远大于数字系统

处理速度慢：数字信号有些场景无法做到实时性，数字信号无法及时处理可能会导致拥塞

数字信号处理技术的应用

声学和语音

- 激光唱片
- 数字音频
- 语音识别

无线电通信

- 回升对消
- 自适应均衡
- 视频会议

军事应用

- 雷达
- 声呐
- 保密通信

生物医学

- 助听器
- 心电图分析
- 脑电图分析

本课程中的一些基本概念

时间

时域：以时间为自变量描述信号和系统

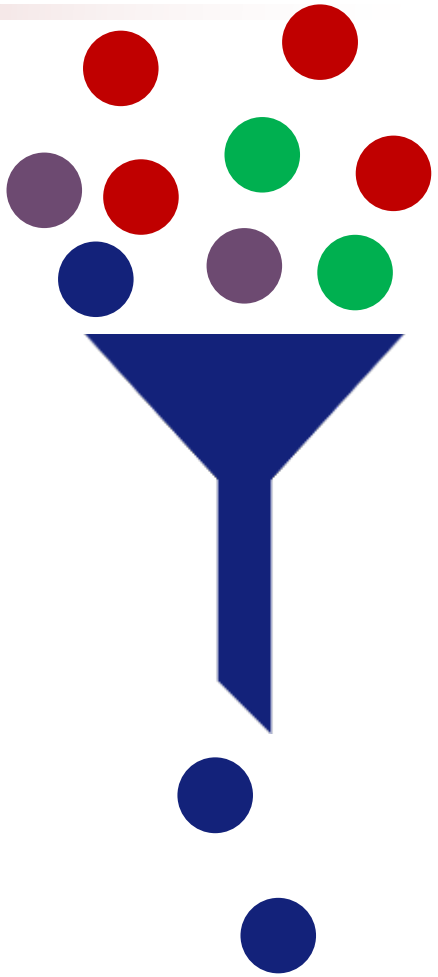
频率：信号每单位时间变化的次数（Hz），是描述信号周期性的物理量。类比“时间”，是**描述信号的另一个维度**

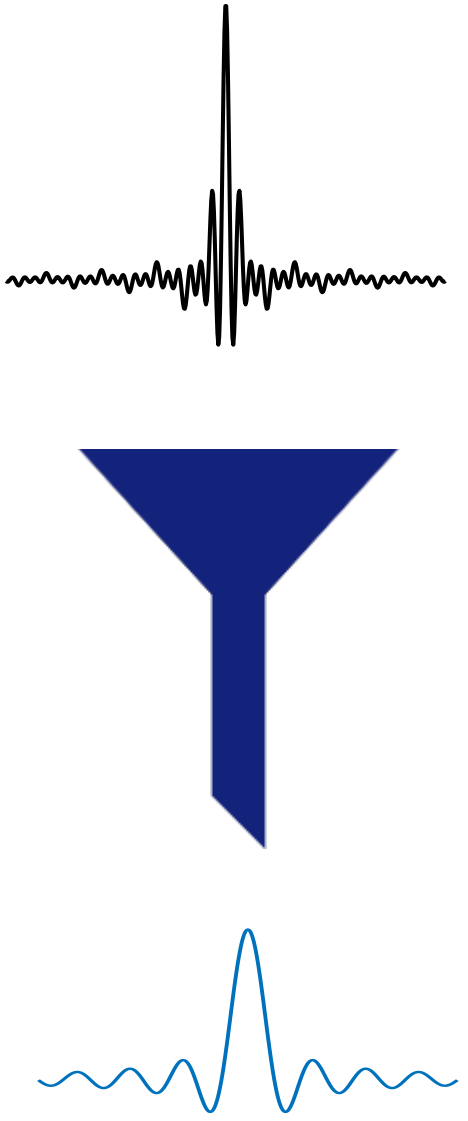
频域：以频率为自变量描述信号和系统。如果不以频率为基本单位，也称为“变换域”

频谱：信号的频域表示，描述信号各个频率分量的**幅度和相位**

本课程中的一些基本概念

滤波器：一种信号处理系统，实现按照一定目的对信号的变换（过滤）





本课程中的一些基本概念

信号特征提取

信号分析/识别

时域：以时间为自变量描述信号和系统

傅里叶变换

频域：以频率为自变量描述信号和系统。

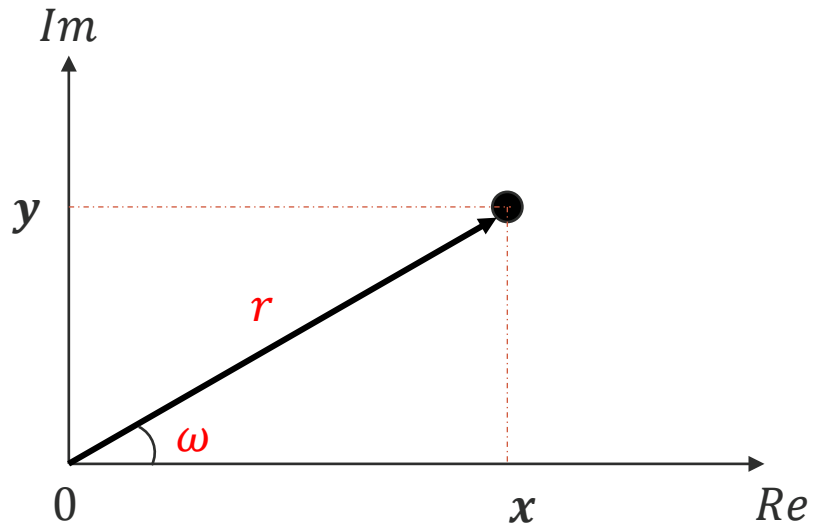
类似于从频率角度一种提取特征的方式

本课程中的一些基本概念（频段，谱）

波段	超长波	长波	中波	短波	超短波	分米波	厘米波	毫米波
频段	甚低频	低频	中频	高频	甚高频	特高频	超高频	极高频
符号	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF
波长范围	100000-10000m	10000-1000m	1000-100m	100-10m	10-1m	1-0.1m	10-1cm	10-1mm
频率范围	3-30kHz	30-300kHz	300kHz-3MHz	3-30MHz	30-300MHz	300-3000MHz	3-30GHz	30-300GHz
应用	海岸—潜艇通信；海上导航	大气层内中等距离通信；地下岩层通信；海上导航	广播；海上导航	远距离短波通信；短波广播	对大气层内、外空间飞行体（飞机、导弹、卫星）的通信；电视、雷达、导航、移动通信	对流层工散射通信（700-1000MHz）	数字通信；卫星通信；波导通信	穿入大气层时的通信

本课程中的一些基本概念（复数）

- 基本单位：$j = i = \sqrt{-1}$
- **直角坐标**表示：$z = x + jy$
  - 实部：$x = Re\{z\}$，虚部$y = Im\{z\}$
- **极坐标**表示：$z = re^{j\omega}$
  - $x = r\cos\omega, y = r\sin\omega$

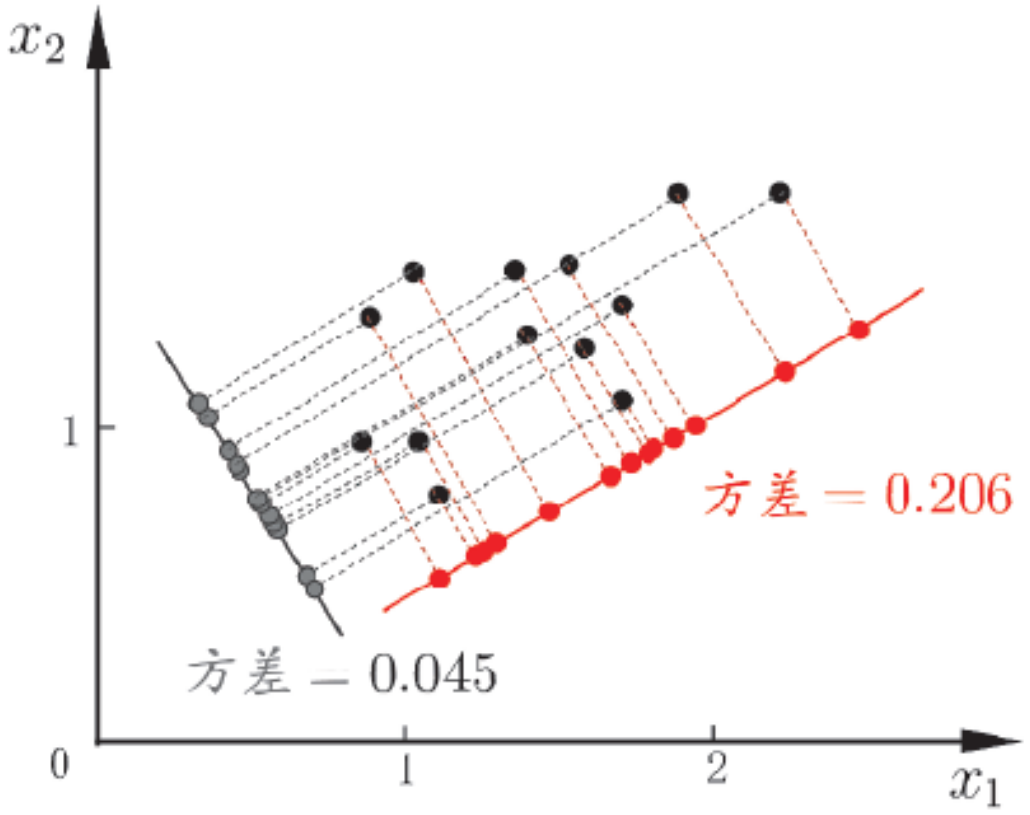


- 共轭复数：$z^* = x - jy = re^{-j\omega}$
- $zz^* = |z|^2 = r^2; \frac{z}{z^*} = e^{j2\omega}$
- $(z_1 + z_2)^* = z_1^* + z_2^*; (z_1 z_2)^* = z_1^* z_2^*; \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^* = \frac{z_1^*}{z_2^*}$
- $|z| = |z^*|, |z_1 z_2| = |z_1||z_2|$

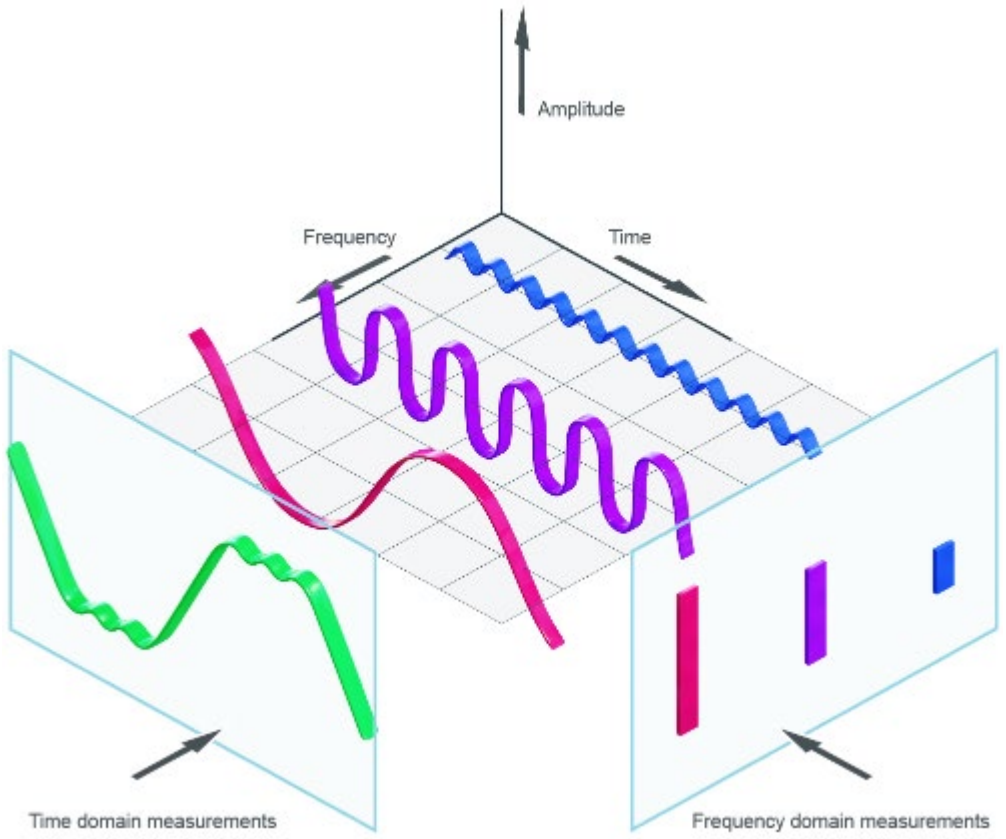
- 欧拉（Euler）公式
  - $e^{j\omega t} = \cos\omega t + j\sin\omega t$
  - $e^{-j\omega t} = \cos\omega t - j\sin\omega t$
  - $\cos\omega t = \frac{1}{2}\left(e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}\right)$
  - $\sin\omega t = \frac{1}{2j}\left(e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}\right)$

本课程中的一些基本概念（变换）

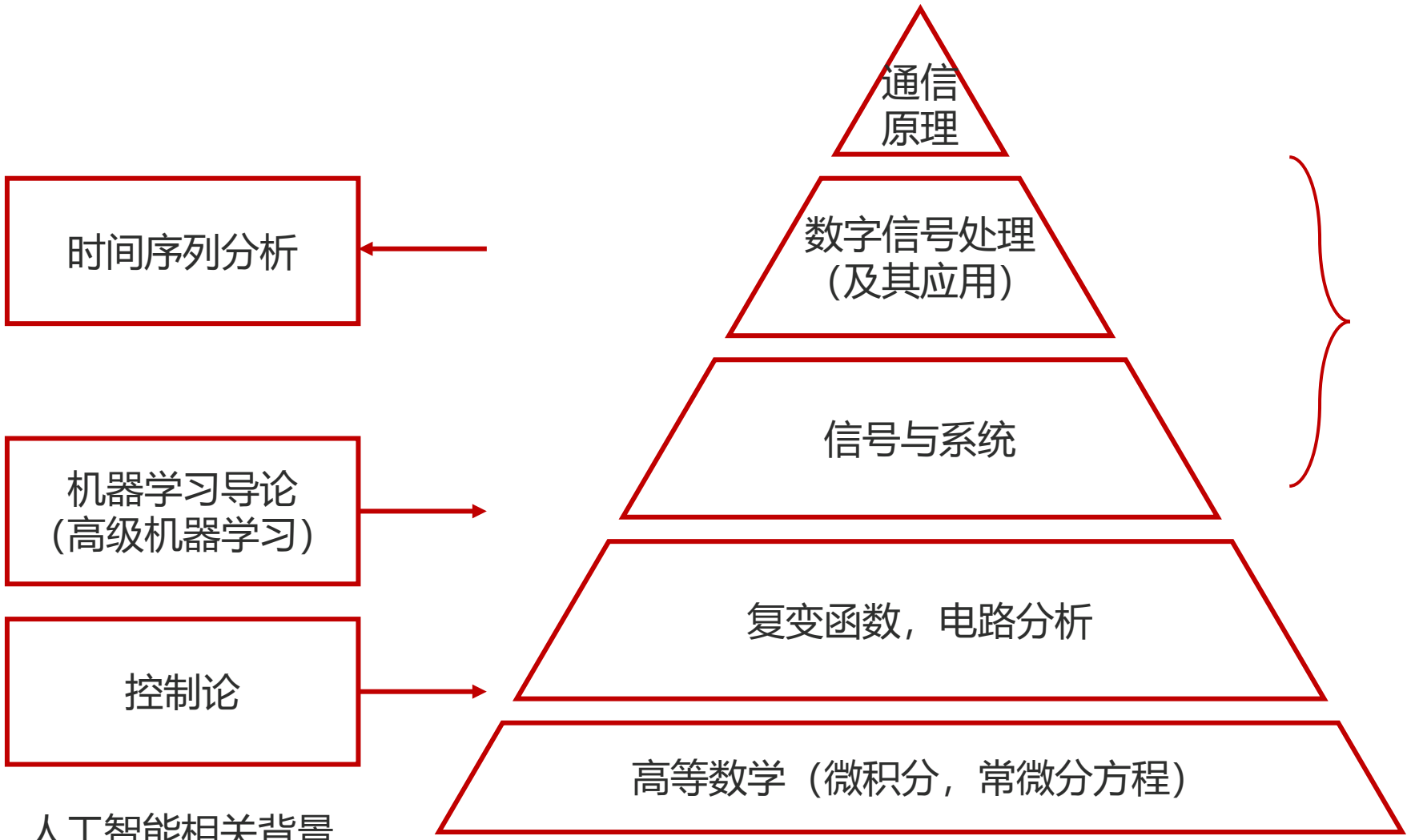
PCA变换



傅里叶变换



先后课程关系



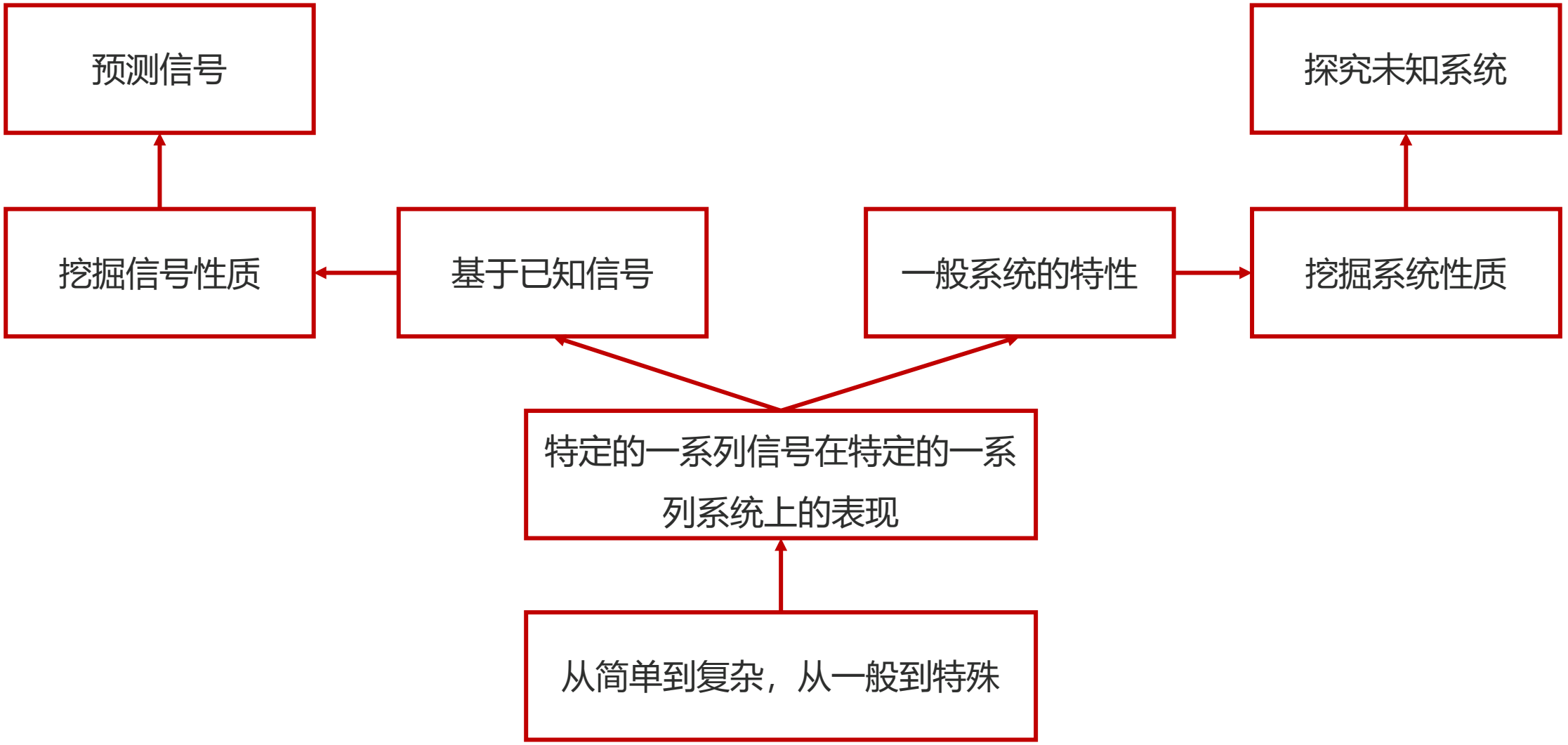
内容具有对称性

(知识的串联、并联)

一学期课程

理论、应用合二为一

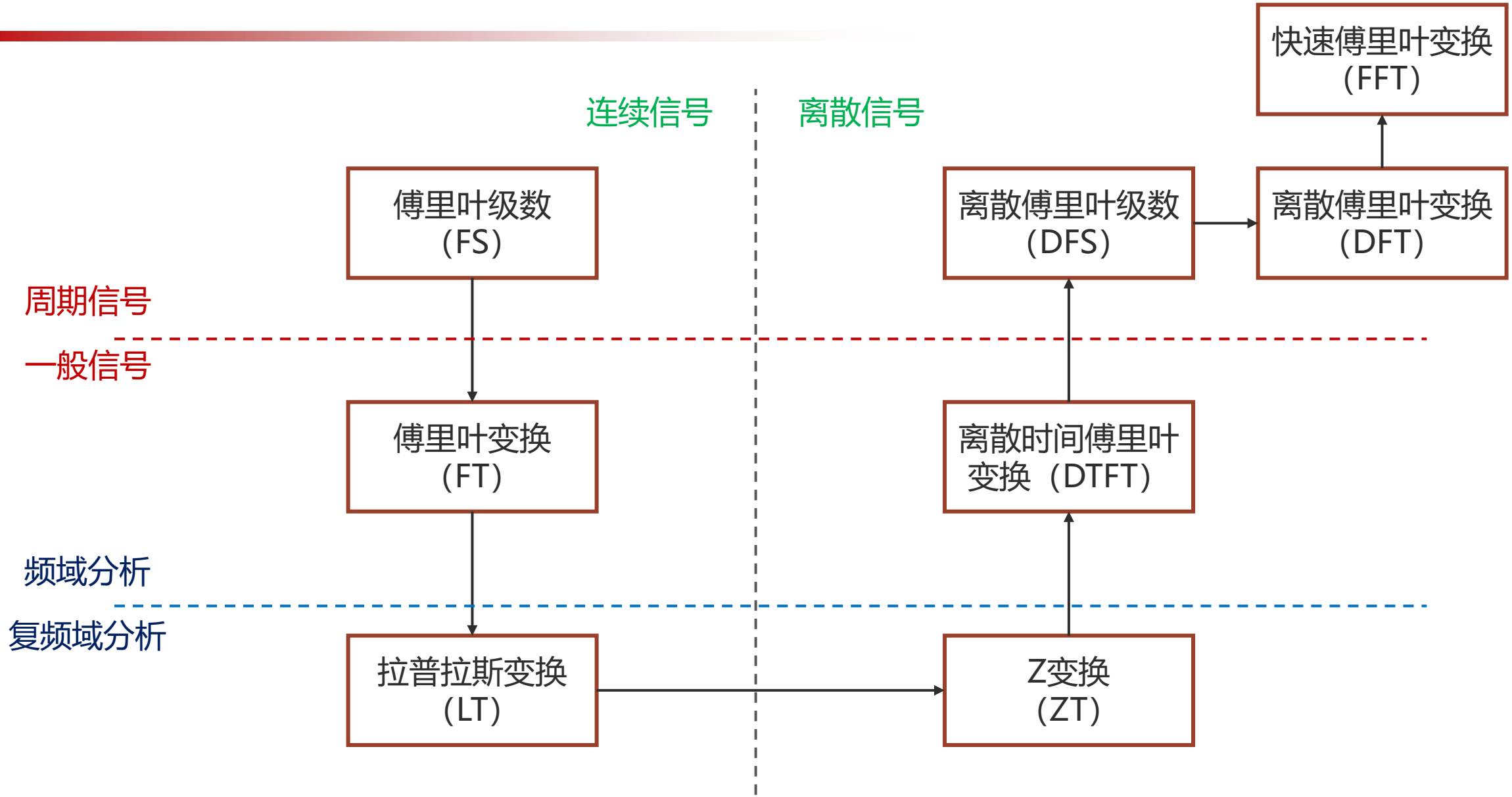
分析信号和系统


预测信号
探究未知系统
挖掘信号性质
基于已知信号
一般系统的特性
挖掘系统性质
特定的一系列信号在特定的一系列系统上的表现
从简单到复杂，从一般到特殊

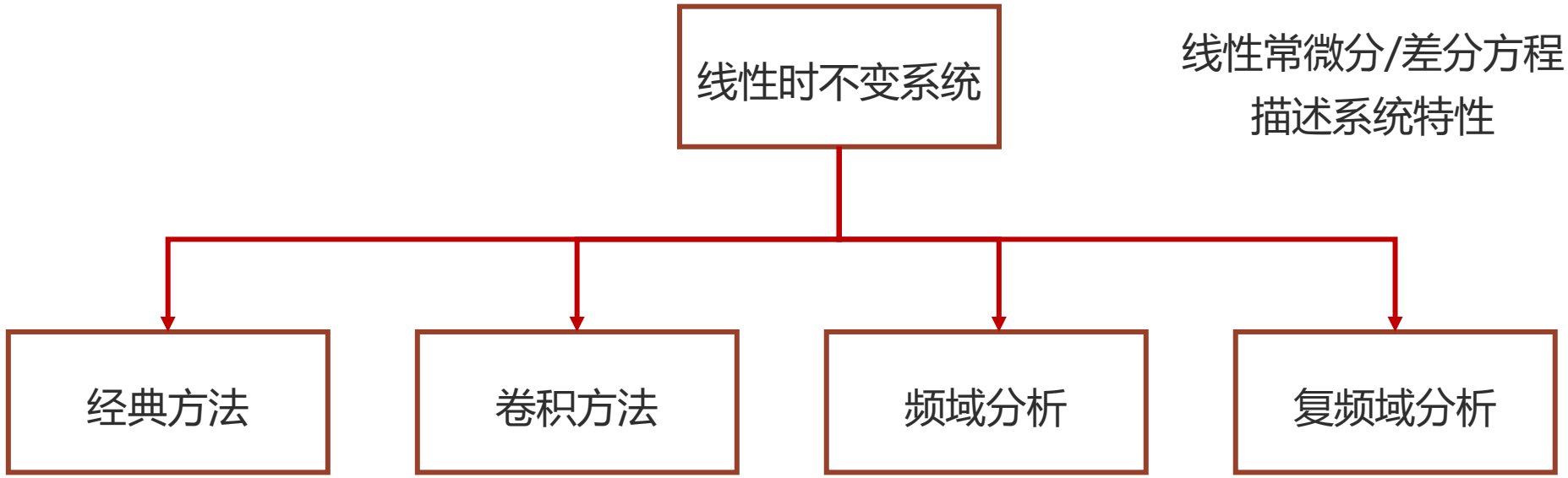
课程内容框架

	时域	频域	复频域
信号	信号的变换 信号的分解	傅里叶变换 离散傅里叶变换 快速傅里叶变换	拉普拉斯变换 Z变换
系统	信号的卷积 系统差分方程的求解	信号的抽样和恢复 调制和解调	系统函数

课程内容框架（信号变换角度）



课程内容框架（系统分析角度）



课程目标-1

- 掌握信号与系统理论的**基本概念**和**基本分析**方法；
  - 认识如何建立信号与系统数学模型，通过数学分析求解，并对结果给与物理解释；
  - 为独立地分析与解决信息领域内的实际问题打下理论基础

- 信号和系统的分析、**类比能力**：
  - 信号描述与特性分析，系统建模与特性分析，解释信号和系统的特性

- 信号和系统设计能力：
  - 设计满足需要的信号，设计满足信号处理能力的系统

生活中的现象

车轮倒转

声调变化

数字信号的应用

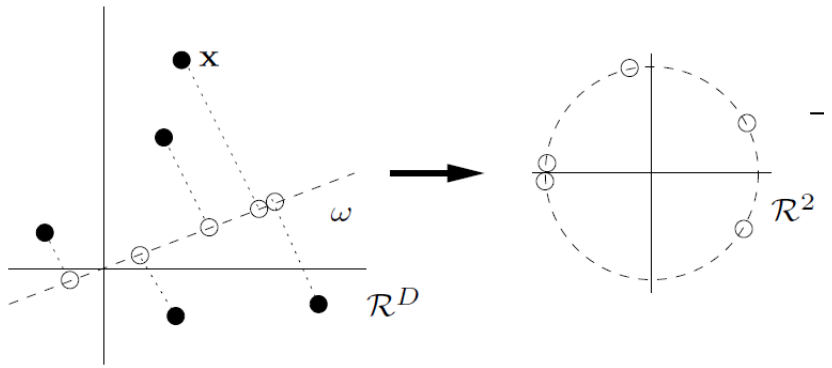
高速率

低延迟

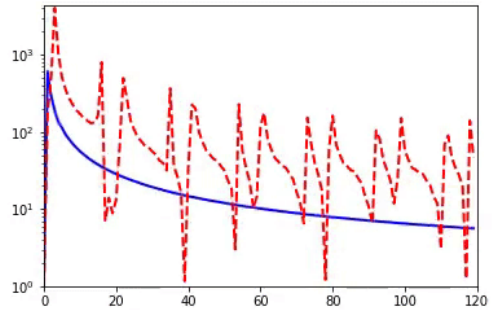
大容量

信号处理与人工智能

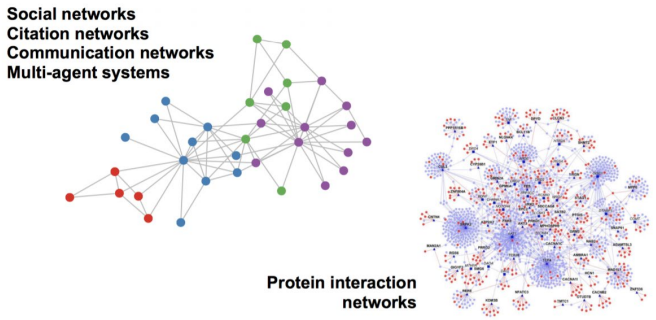
- 利用人工智能技术，解决信号处理问题
- 借鉴信号处理思路、技术解决AI问题



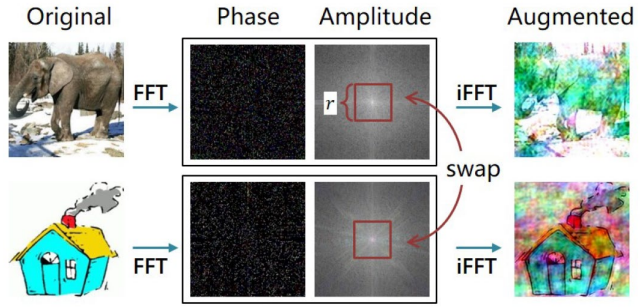
随机傅里叶级数计算大规模核函数



从频域角度分析模型训练过程



从滤波角度解释图神经网络



基于频域的数据增广

课程目标-2

- 借鉴信号处理思路、技术解决AI问题
  - 通过频域手段分析模型的泛化能力
  - 直接从频域角度训练分类模型
  - ……

- 在学习过程中，将信号处理的概念技术和AI的概念技术进行**类比**：
  - 信号的卷积和卷积神经网络
  - 信号的表示和主成分分析
  - ……

课程信息

- 课程主页：http://www.lamda.nju.edu.cn/yehj/dsp2021/

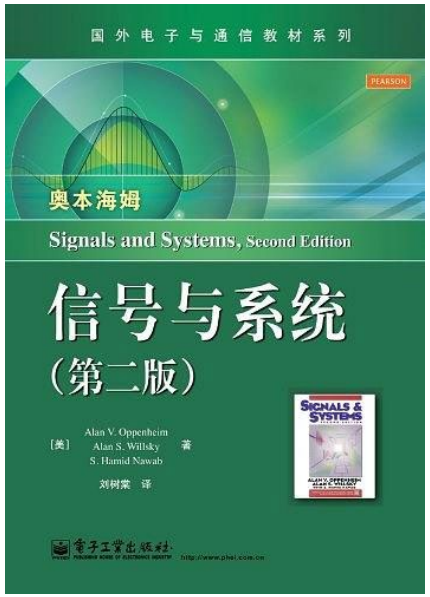
课程安排

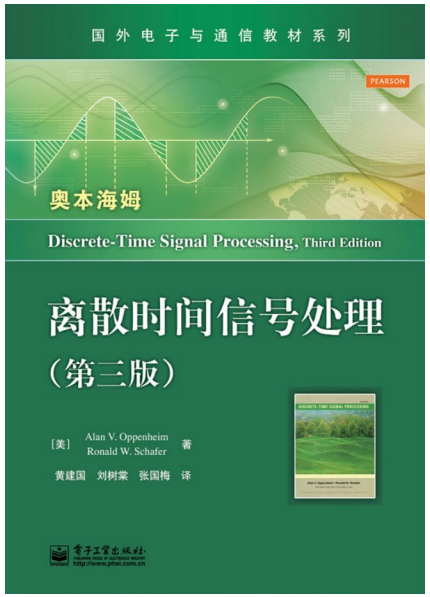
主题		上课时间		知识点	阅读材料	备注
导论	课程介绍，导论	01	8月30日	➢ 课程概况 ➢ 知识点的衔接	✧ [1] 绪论 ✧ [2] 绪论 ✧ [3] 1.1	
时域分析	信号的时域分析			➢ 信号分类	✧ [1] 1.1.1; 1.1.2 ✧ [3] 1.2	
		02	9月6日	➢ 信号的运算	✧ [1] 1.2 ✧ [3] 1.3	
				➢ 特殊信号	✧ [1] 1.3, 1.4 ✧ [3] 1.2, 1.4, 7.2	
				➢ 信号的分解	✧ [3] 1.5, 6.1-6.4	
	系统的时域分析	03	9月13日	➢ 系统的分类	✧ [1] 1.5, 1.6 ✧ [3] 1.6	
			9月20日	➢ 卷积、卷积和	✧ [1] 2.1-2.3 ✧ [3] 2.7, 7.5, 7.6	
		04	9月27日	➢ 微分、差分方程	✧ [1] 2.4 ✧ [3] 2.2, 2.3, 7.3, 7.4	

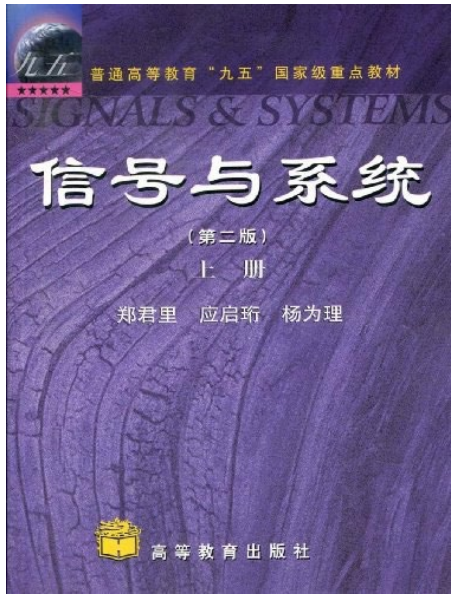
课程信息

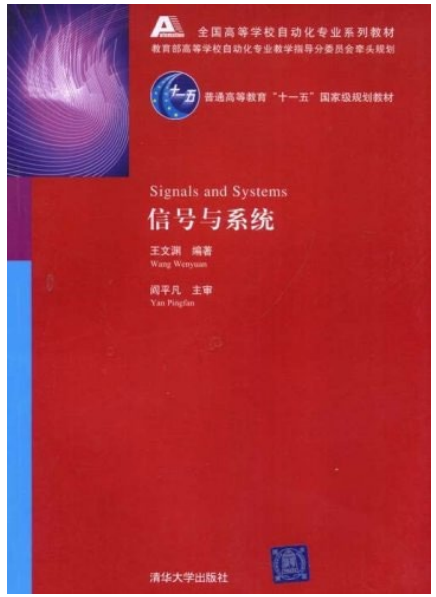
- 课程主页
  - http://www.lamda.nju.edu.cn/yehj/dsp2021/
- 教学立方课程邀请码：TYDN2YED
- 考评
  - 平时成绩 50%: 3-4次作业，部分作业可能包括编程题
  - 期末成绩 50%：笔试

参考书目


国外电子与通信教材系列
PEARSON
奥本海姆
Signals and Systems, Second Edition
信号与系统
(第二版)
[美] Alan V. Oppenheim Alan S. Willsky S. Hamid Nawab 著
刘树棠 译
電子工業出版社


国外电子与通信教材系列
PEARSON
奥本海姆
Discrete-Time Signal Processing, Third Edition
离散时间信号处理
(第三版)
[美] Alan V. Oppenheim Ronald W. Schafer 著
黄建国 刘树棠 张国梅 译
電子工業出版社


九五
普通高等教育"九五"国家级重点教材
SIGNALS & SYSTEMS
信号与系统
(第二版)
上 册
郑君里 应启珩 杨为理
高等教育出版社


全国高等学校自动化专业系列教材
普通高等教育"十一五"国家级规划教材
Signals and Systems
信号与系统
王文渊 编著
Wang Wenyuan
阎平凡 主审
Yan Pingfan
清华大学出版社

学以致用
深入浅出
数字信号处理
江志红 编著
北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

致谢

- 前期课件制作过程中部分参考了
  - 奥本海姆教授《信号与系统》、《离散时间信号处理》教材中的相关内容
  - 卓晴教授《信号与系统》课程和课件的相关内容
  - 郑君里教授、王文渊教授《信号与系统》教材中的相关内容
  - 陈后金教授《数字信号处理》课程和课件的相关内容
  - 江志红《深入浅出数字信号处理》书本中的相关内容