

---

# 统计信号处理基础

## —估计与检测理论

---

杨文      电子信息学院

测绘校区教学实验大楼十楼1008室

E-mail: [yw@eis.whu.edu.cn](mailto:yw@eis.whu.edu.cn)

---

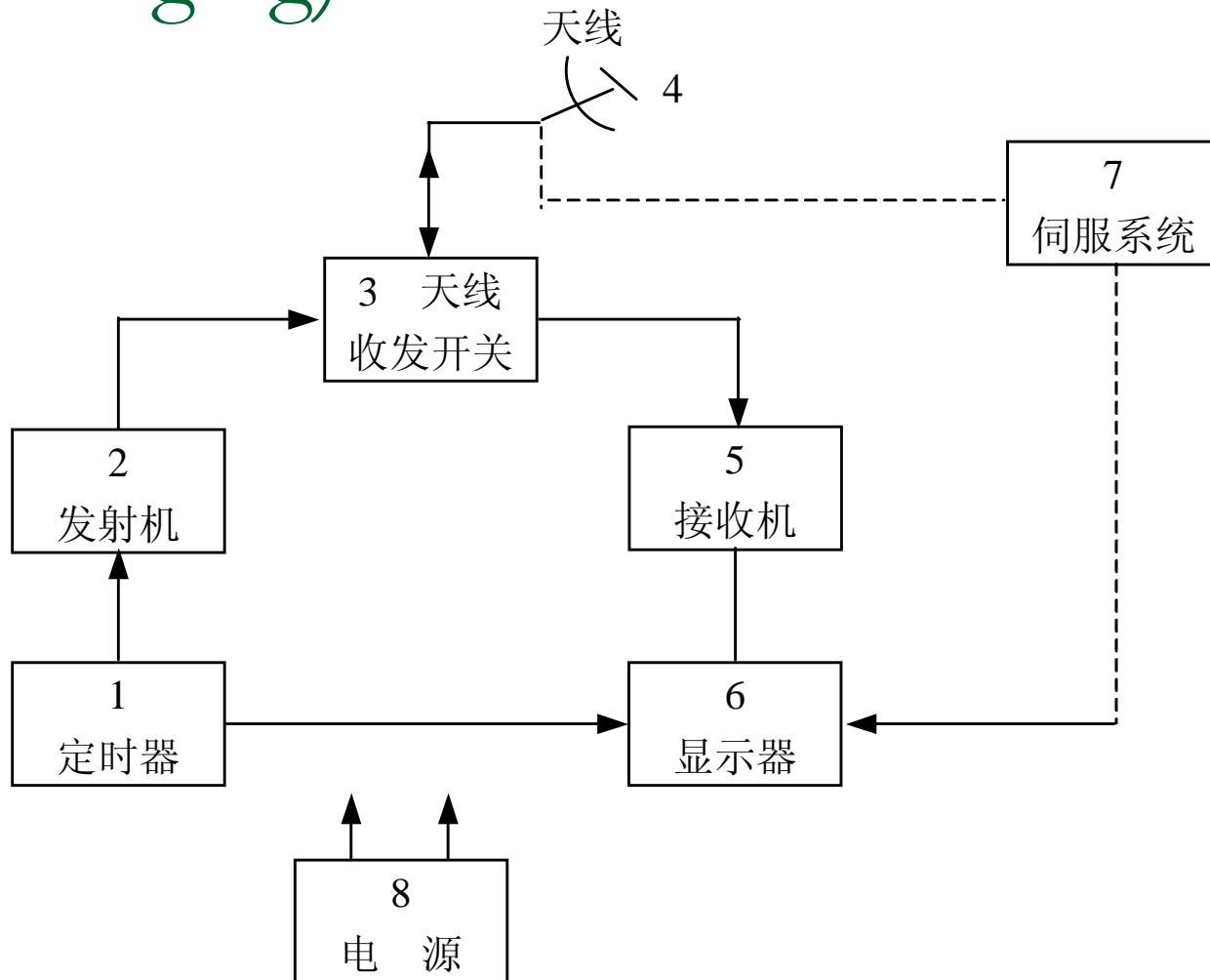
# 绪论

- 信号检测与估计理论的形成与发展
- 信号,噪声的随机性及其统计处理方法
- 信号检测与估计理论概述
- 本课程的性质、内容、基本要求、考试方式、主要参考书

# 一、信号检测与估计理论的形成

- 第二次世界大战期间，由于军事上的需要，促进了无线电技术的发展。科学家与工程师们发明了雷达、通信、声纳等电子设备，这些先进电子设备的出现和应用，又提出了**从噪声中检测与估计信号**的问题。经过许多科学家的努力，在广泛应用概率论与数理统计的基础上，逐步建立了“信号检测与估计理论”。
- 下面我们以雷达、声纳、通信等系统为例，说明什么是“信号检测与估计”问题，同时，通过这些系统的介绍来加深理解“信号检测与估计理论”的实际意义，同时也是后续课程的基本模型。

# 1、雷达Radar (Radio Detecting and Ranging)



雷达是一个无线电探测与测距的系统，其基本框图如左所示



# 1、雷达Radar

基本原理——利用物理学中金属对无线电波的反射作用

- ①、定时器——产生一视频周期脉冲序列
- ②、发射机——调制、功率放大  
 $f_c$ —300MHZ~40GHZ
- ③、天线收发开关——一付天线作发和收两用
- ④、天线——形成窄波束，最有效地把能量辐射到空中
- ⑤、接收机——解调、功放——视频脉冲信号
- ⑥、显示器——检测目标，测量目标的距离和方位

$$R = \frac{1}{2} C \tau \quad , \quad C = 3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$$

- ⑦、伺服系统——带动天线转动，搜索目标，实现测向任务
- ⑧、电源——供给能量

存在问题：

- 无线电波在空中传播有各种干扰：

- ①、大气层、电离层等电磁现象产生的噪声
- ②、各种电台，电气设备干扰
- ③、人为干扰

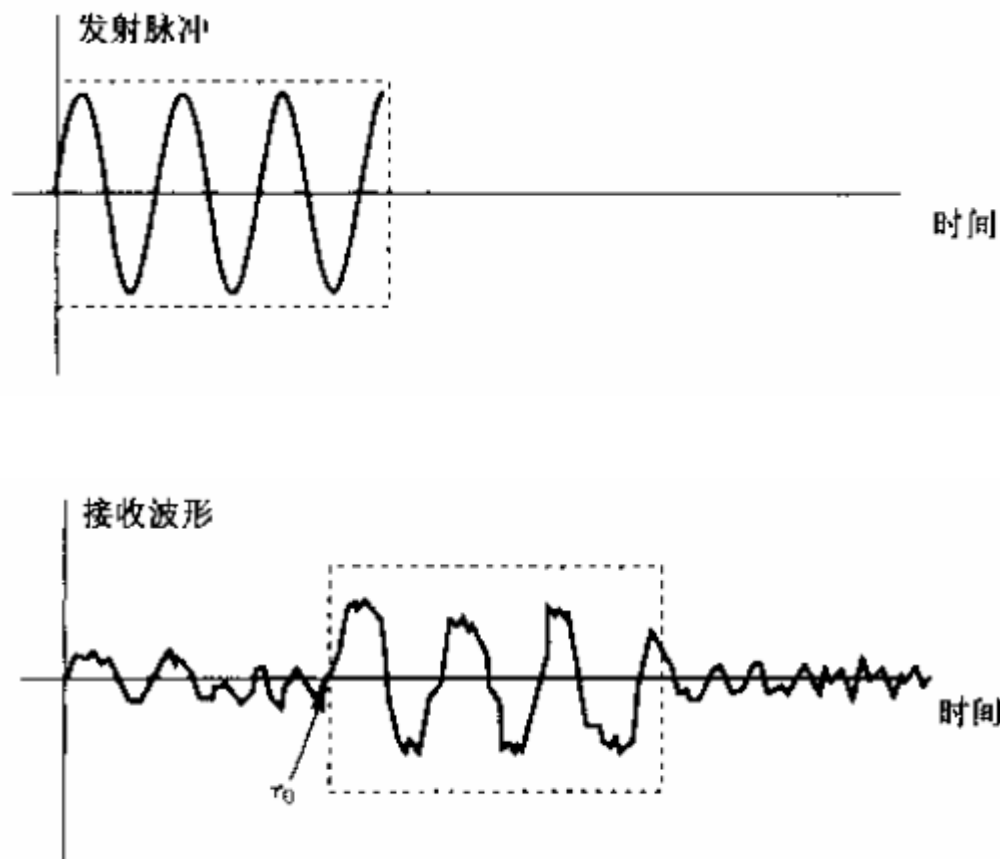
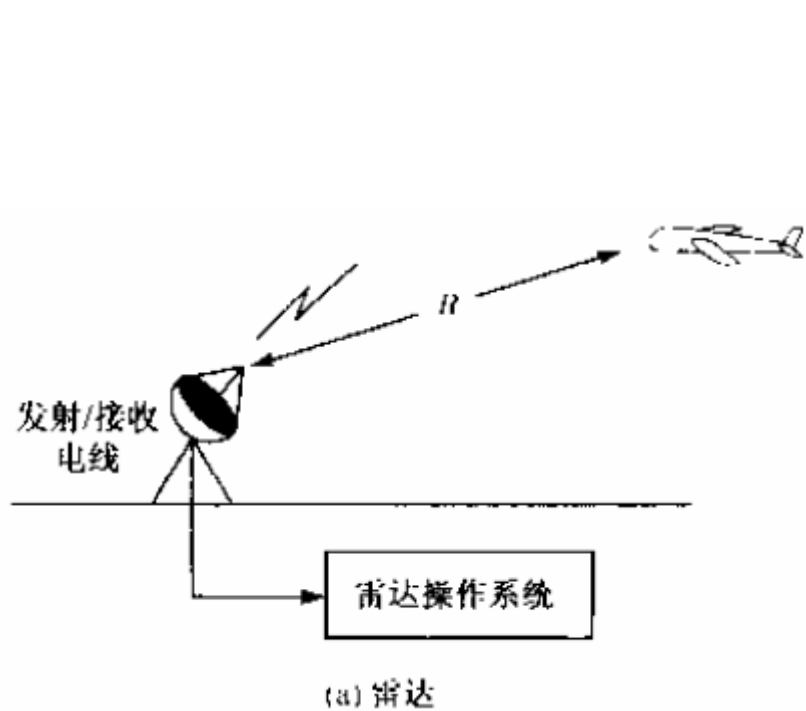
- 接收机本身产生的噪声

结论：对于雷达系统，信号检测与估计问题是一个十分重要的问题

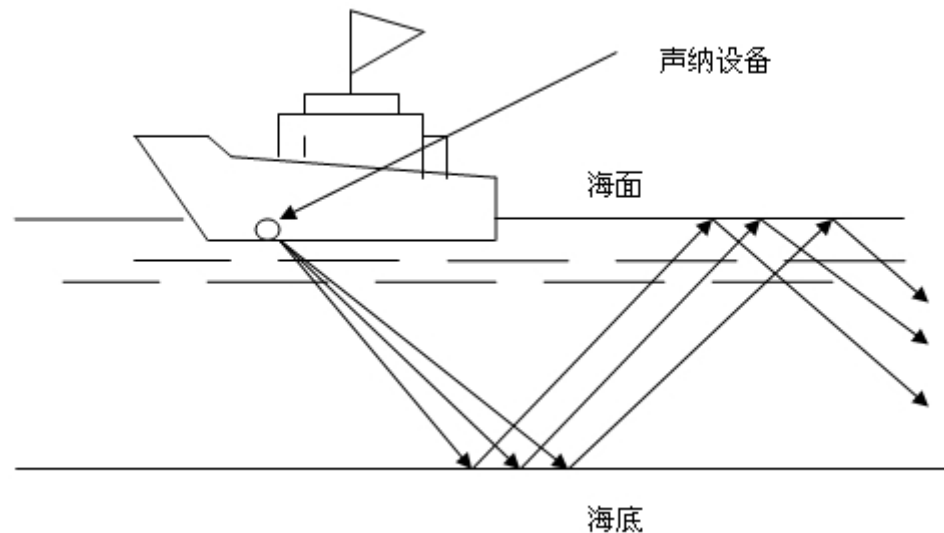
1937年英国东海岸的CH雷达站



# 1、雷达Radar

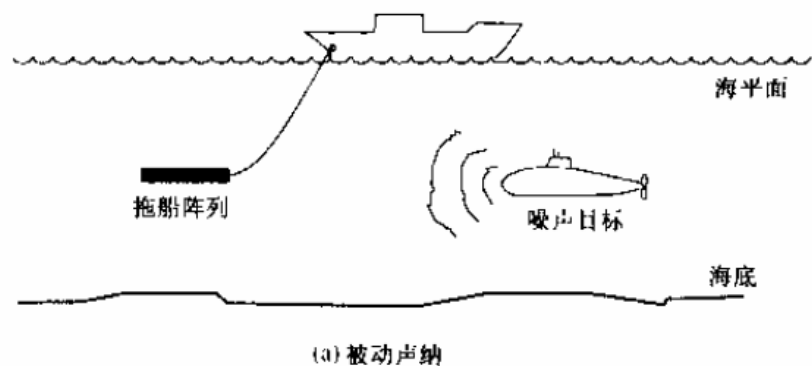


## 2、声纳 Sonar (Sound Navigation and Ranging)

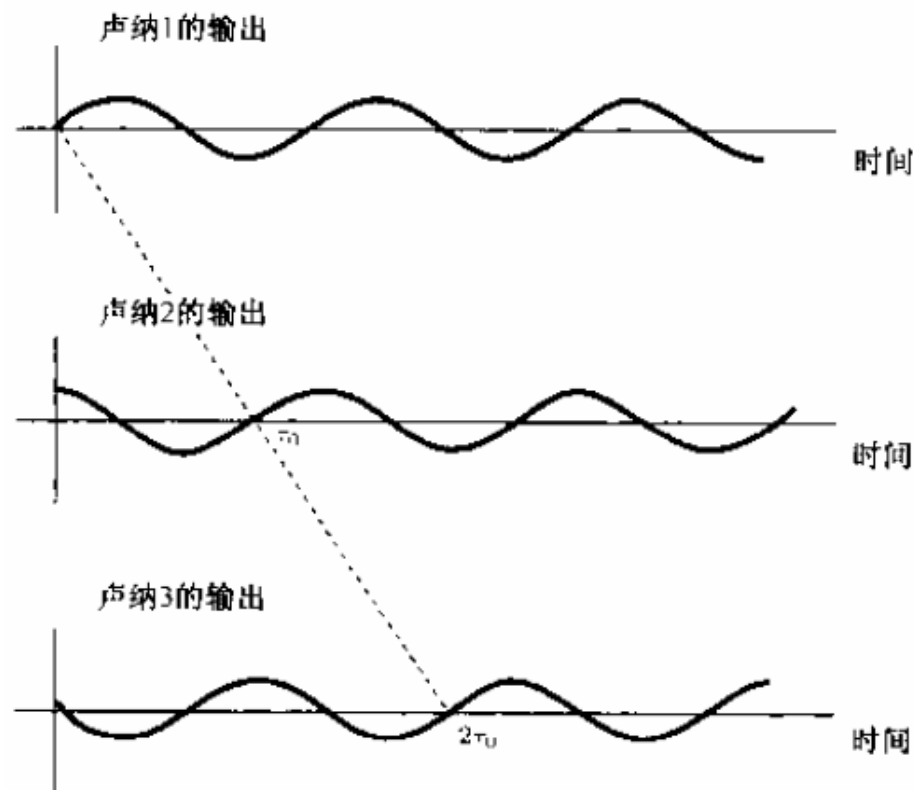


声纳(声导航和测距)是指利用水中声波进行探测、定位和通信的电子设备。其基本原理是捕捉、接收水声信息,将水声信号转换成电信号,经过放大处理后,由显示控制台显示定位。

## 2、声纳 Sonar



$$\beta = \arccos\left(\frac{cT_0}{d}\right)$$



(b) 阵列传感器接收到的信号



## 2、声纳 Sonar

声纳是利用声波反射作用探测水中物体的设备

### 声纳与雷达

- 共性：利用目标对波的反射作用，实现对目标的定位(原理相同)
- 个性：波传输的介质不同，因此工作频段不同，

## 2、声纳 Sonar

**Radar**工作于超短波段(300MHZ以上),  
其根据是:

①、无线电波反射规律

反射强度

$\propto \frac{A}{\lambda}$   $A$ —反射面积  
 $\lambda$ 小反射强, 易检测到

②、天线波束

$\propto \frac{B}{\lambda}$ ,  $B$ —天线口径

③、高空电离层 100-400km有几km  
电离层

**Sonar**工作于声频段(几十HZ—  
200KHZ)

声波在海水介质中传播性能最佳, 声波是在海水中载荷信息的有效形式。

● 声波在海水中传播有各种干扰:

①、海水流动声、波涛声

②、各种水生动物声、机器声

● 接收机本身产生的噪声

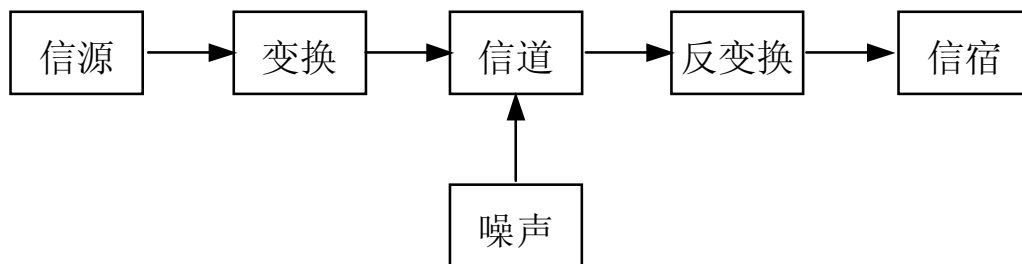
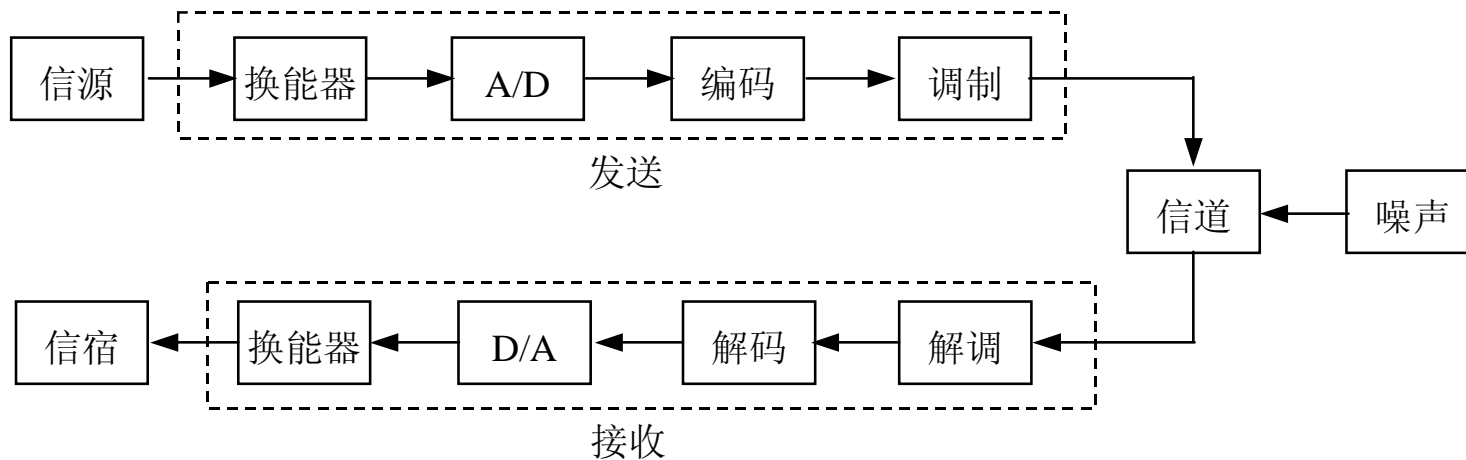
**Sonar**换能器接收到的目标回波实际上也是被噪声污染的信号, 因此存在信号检测与估计问题。

### 3、通信系统 (Communication Systems)

- 在人类社会中，人与人之间要互通情报、交换消息，通信就是互通信息，通信的目的就是传递信息。通信系统的模型(电话、电报、传真、电视、广播等)
  - 信源——发信者、发出信息(文字、语言、图片、图像、数据等)
  - 变换——使要传送的信息在信道中有效地传递，在发送端对信息进行必要的加工或处理
  - 信道——沟通信源与信宿的通道，即电信号传输的通道和媒介
  - 反变换——在接收端，为了还原信息，相应地进行反变换
  - 信宿——受信者、接收信息者



# 3、通信系统一框图



# 3、通信系统—关于变换与反变换

- 换能：现代通信中，传递信息有文字、语言、传真图片、图象、数据等；需要把这些非电量信息→电信号，然后利用电信号传送，实现通信目的，这就需要能量变换，完成这种能量变换的设备称为换能器。

发送端 话筒(声电变换) 摄像管(光电变换)

接收端 耳机、喇叭 显象管

- A/D 变换 模拟信号→数字信号  
D/A 变换 数字信号→模拟信号

- 编码：改善信息传输效率(有效性)  
提高信息传输的可靠性

解码 (反变换)

- 调制与解调

调制：使信号宜于在给定信道传输，是信号频谱搬移过程

解调：(反变换)

模拟信号  
调制方式 {  
调幅 AM (Amplitude Modulation)  
单边带调制 SSB (Single Sideband Modulation)  
调频 FM (Frequency Modulation)  
调相 PM (Phase Modulation)

数字信号  
调制方式 {  
幅移键控 ASK (Amplitude Shift Keying)  
频移键控 FSK (Frequency Shift Keying)  
相移键控 PSK (Phase Shift Keying)  
连续相位频移键控 CPFSK (Continuous Phase Frequency Shift Keying)  
最小键控 MSK (Minimum Shift Keying)

# 3、通信系统—关于信道

## ■ 按传输介质

(1) 有线信道：用导体传输电信号

{ 架空明线、电缆、波导、导光纤维  
电话、有线电视、光纤通信

(2) 无线信道：用电磁波传输电信号

{ 短波电离层反射信道  
对流层散射信道  
微波接力信道  
卫星中继信道

## ● 按信道特性：

(1) 恒参信道：其特性不随时间变化

— 有线信道，微波接力信道，卫星中继信道

(2) 变参信道：其特性随时间变化

— 短波电离层反射信道，对流层散射信道

## ● 按信道传送信号形式：

(1) 连续信道

(2) 离散信道

通信系统的任务是尽可能好地从接收信号中恢复被传送的信号，达到有效、可靠通信目的。但客观实际总存在外部噪声和接收机内部噪声，使接收机接收到的信号被噪声所污染，因此，在通信系统中必须解决从噪声中检测信号的问题。

# 信息传输系统

- 以上介绍的雷达、通信、声纳等系统都是**信息传输系统**。对于信息传输系统的要求，主要集中在两个方面：
  - 一是有效性，即要求系统高效率地传输信息
  - 二是可靠性，即要求系统可靠地传输信息，也就是系统的抗干扰性。
- 由于信息传输过程中，存在外部随机干扰和内部噪声，大大降低了信息传输的可靠性，为了保证可靠地传输信息，必须同干扰作斗争。

“信号检测与估计理论”正是人们在与干扰斗争中，寻求“最佳”的处理方法，以从噪声中提取有用信息，经过许多科学家们不懈努力，应用现代数学工具，把统计推断理论与信号处理技术相结合，建立起来的理论。
- “信号检测与估计理论”的建立，
  - 一方面，为**Radar, Sonar, Communication Systems**奠定了理论基础，有助于解决技术上的问题：
  - 另一方面，又为新技术的发展指出了新的途径，提供了科学依据，从而大大促进了技术的发展。

# 应用范围

- 现代的**Radar, Sonar, Communication Systems**比起二次大战时要先进得多，“信号检测与估计理论”起了十分重要的指导作用。“信号检测与估计理论”最早由**Radar, Communication**产生，但目前已成为许多学科的理论基础，不仅在自动控制、模式识别、系统识辨、图像处理、语音识别中广泛应用，而且在地震、天文、生物医学工程、化学、物理等学科得到应用。

地震——地震波在大地中传播是一个信息传输系统，在传输过程中，会受到各种干扰，如何寻求有效方法，尽量减小干扰的影响，以便从记录下来的地震信号中预测地震的位置和震级。

石油和天然气勘探——常用爆破法，产生地震波，是以地层为信道的信息传输系统。应用信号检测理论，可以研究出一套信息提取和分析方法。

天文学——天体辐射电磁波，利用接收到的电磁波，分析射电现象，研究太阳、月亮、各行星等天体内部物理、化学性质，由于天体离地面很遥远，因此接收到的信号极其微弱。

生物物理——人的感官是一个信息处理系统，需要处理极其微弱信号，通常把刺激变量看作信号，把刺激中的随机物理变化或感官信息处理中随机变化看作噪声。感官对刺激的分辨问题可等效为一个在噪声中检测信号的问题。

- “信号检测理论”加深了人们对感官系统的认识和理解。只要知道了噪声的统计特性，便可应用“信号检测理论”中有关结果。



# 微弱信号检测

- 目前，“微弱信号检测”在化学、物理等学科也越来越受到重视。随着科学技术的发展，人的认识已进入微观世界，人们越来越关心各种极端的物理现象、极其微弱的效应、这种效应接近本征限制和环境限制。
  - 本征限制——物体不是处于绝对零度，有热涨落、电、光等能量的量子化
  - 环境限制——市电干扰、温度涨落、电磁辐射等不可避免的干扰和影响
- 弱效应包括：三个基本物理量微弱变化；声、光、热、电磁等各种参数测量；微电导、微电容、微电流、微弱生物电流的检测。
- 这些都要求把信号从噪声中提取出来，且加以精确测量，采用微弱信号检测技术如**Lock in Amplifier, Boxcar Integrator**等后，发现了许多新的物理现象，开拓新材料，创造新器件。例如：
  - 在表面分析中：用**Lock in Amplifier**把深埋在噪声中的俄歇峰(二次电子)检测出来
  - 在测量温度上：用热敏电阻可达 $10^{-3}^{\circ}\text{C}$ 温度变化，用微弱信号检测技术达 $10^{-5}^{\circ}\text{C}$ ，提高二个数量级
  - 在光谱测量中：由于自吸收效应，使精度受到影响，而采用锁相放大器可排除自吸收影响
  - 在电化学中：常规测试灵敏度为 $10^{-5}$ 克分子，锁相放大器  $10^{-7}$ — $10^{-8}$ 克分子，提高2—3个数量级
  - 在引力波探测中：用检测信号检测技术研究物体之间引力是如何传播的
  - 此外在化学发光、荧光测量，激光光谱测量中弱信号检测技术得到广泛应用
- 随着现代科学技术的发展，微弱信号检测将得到更广泛的应用，它已成为现代科学技术重要理论基础。国内成立“微弱信号检测学会”已有二十多年历史，研究“信号检测理论”在其他各学科领域中的应用。

# “信号检测与估计理论”发展历史

- “信号检测与估计理论”形成有一个历史过程。关于信息传输理论的探讨，从二十世纪20年代末开始，二十世纪40年代第二次世界大战期间，逐步形成和发展起来，整个四十年代是这个理论的初创和奠基时期，其间  
    美国科学家 维纳(N. Wiener)  
    苏联科学家 柯尔莫哥洛夫(Kolmogorov)  
作出了杰出贡献，他们将随机过程和数理统计的观点引入通信(广义通信，包括 Radar, Sonar)和控制系统中来，揭示了信息传输和处理的统计本质，建立了“最佳线性滤波理论——维纳滤波理论”。这对当时认为“信号是一个确定性的过程”的传统观念，是一次突破。
- 同一时期，在Radar技术发展推动下，诺思 (D.O. North)于1943年，提出了以“输出信噪比最大为准则”的“匹配滤波理论”。随后在Radar, communication Systems中获得广泛的应用。
- 之后，在雷达、通信、声纳、自动控制等无线电技术系统中，为了解决在噪声干扰下可靠地传输信息，采用了种种方法，“相关接收法”是其中重要的方法之一，人们发现，利用周期信号和噪声自相关函数特性不同，用“相关接收方法”检测雷达信号特别有效。人们进一步研究发现，“相关接收”与“匹配滤波”存在等效的一面。

人们在同噪声干扰斗争中，总结出来的种种方法，其实质上，都是利用信号与噪声不同的统计特性，尽可能地抑制噪声，从而提取信号。

# “信号检测与估计理论”发展历史

关于“信息传输理论”的基础研究工作，是

- **1946-1948年**美国Bell Lab. **C. E. Shannon**建立的“基础信息论”  
苏联**B.A.柯切尼可夫**建立了“潜在抗干扰理论”
- “**Shannon**信息论”解决信息传输的有效性问题
- “柯切尼可夫潜在抗干扰理论”用概率论方法，研究在高斯白噪声中接收信号的“理想接收机”问题，建立了“理想接收机”的概念，从而可以将实际接收机与理想接收机进行比较，进而找出可挖掘的潜力。
- **1950年**以后，人们开始把“信息量”概念用于雷达信号的检测中，提出了一系列最佳雷达的新概念。
- **1953年**起，人们从统计学观点看，可以把从噪声中接收信号的过程，看作为一个统计判断过程，也就是说，根据接收到的信号的混合波形，用统计判断方法，来判断“信号存在与否”以及“测量信号中含有的未知参量”。人们把“假设检验”、“参量估计”、“统计判决”等数学工具用于“信号检测”问题，建立起一套“信号检测的统计理论”。

# “信号检测与估计理论”发展历史

- 二十世纪**50**年代中后期，随着空间技术的发展，要求对卫星轨道精确测量，从而要求对卫星位置、速度进行联合观测，并将地面跟踪站接收到的大量数据进行实时处理。而“**Wiener**滤波理论”要求对所观测到的数据追溯到无限的过去，因而满足不了空间技术的实时精密跟踪、测量、控制要求。随着计算机技术的飞速发展，人们将滤波问题用微分方程表示，提出许多适应空间技术的简练算法，六十年代初，形成了著名的“**卡尔曼滤波理论**”(Kalman Filtering)。
- 二十世纪**60-70**年代，先后发展了“非参量检测与估计理论”，它适用于噪声特性基本上未知的情况，其数学基础是**J.Capon**于**1959**年提出的“非参量统计推断”。
- **P.J.Huber**于二十世纪**60**年代中期提出“**Robust**统计学”，**70**年代被逐步应用于检测与估计领域，形成“**稳健(Robust)检测与估计理论**”，它适用于噪声统计特性部分确知的场合，目前尚处在研究开发阶段。二十世纪**80**年代，由于“**光纤通信**”、“**激光雷达**”的发展，逐步建立“**量子检测与估计理论**”，目前处在发展时期。

## 二、信号，噪声的随机性及其统计处理方法

- 信息系统的主要工作是信号的产生、发射、传输、接收和处理，以实现信息传输的目的——电子信息系统。对于电子信息系统，最主要的要求是**高速率和高准确性**。
  - 前者要求系统传输信息的效率尽可能高，即单位时间内传输尽可能多的信息，这主要决定于信号的波形设计和频率选择；
  - 后者则要求系统在传输信息的过程中，尽可能地少出差错，减小信号波形的失真度，这就是系统的抗干扰能力问题。
- 在电子信息系统中，影响准确性的原因可归纳为如下三个主要因素：
  - 信号本身的不理想性；
  - 信号在传输过程中发生畸变（失真）；
  - 信号受到各种各样不可避免的外界干扰和内部干扰等。

# 1、信号的随机性

- 电子信息系统中信号所受到的各种干扰均具有随机特性，一般将其统称为噪声，用 $n(t)$ 表示，它是一个随机过程。
  - 加性噪声—它们与信号混迭，对信号产生“污染”；
  - 乘性噪声—它们对信号进行调制。
- 在电子信息系统中，信号一般可分为两类：确知信号和参量信号。
  - 确知信号—如果信号中所含的所有参量都确知，则信号仅为时间的函数，这类信号一般称为确知信号。确知信号的有或无，可以告诉我们信号是否存在。不同形式的确知信号可以代表信号的不同状态；
  - 参量信号—是指信号中含有一个或一个以上的参量是未知的或随机的。参量随机的参量信号称为随机参量信号，而参量未知的参量信号称为未知参量信号。

## 2、信号的统计处理方法

- 将统计学的理论和方法应用于随机信号的处理，主要体现在如下三个方面：
  - 对信号的随机特性进行统计描述，即用PDF、各阶矩、相关函数、协方差函数、PSD等来描述随机信号的统计特性；
  - 基于随机信号统计特性所进行的各种处理和选择的相应准则均是在统计意义上进行的，并且是最佳的，如信号状态的统计判决、信号参数的最佳估计、均方误差最小准则下信号的线性滤波等。
  - 处理结果的评价，即性能用相应的统计平均量来度量，如判决概率、平均代价、平均错误概率、均值、方差、均方误差等。

### 3、高斯噪声、白噪声和有色噪声

- 随机信号  $x(t) = s(t) + n(t)$  ( $0 \leq t \leq T$ ) ，  
或  $x(t) = s(t; \theta) + n(t)$  ( $0 \leq t \leq T$ ) ，其统计特性在很大程度上取决于噪声干扰 $n(t)$ 的统计特性。噪声 $n(t)$ 是一个随机过程，根据实际问题和环境，它可以取不同的数学模型。
- 在电子信息系统中，描述噪声统计特性的数学模型有多种，最常用的是时域的高斯噪声和频域的白色噪声。



# ①、高斯噪声

- 中心极限定理：高斯噪声的数学模型来源于统计学中的中心极限定理—电子信息系统受到各种杂波干扰，经杂波抑制处理后的杂波剩余分量，以及来自系统外部和内部的其他干扰分量，可以被认为是无限多的、相互统计独立的和各自作用有限的分量，并在系统中叠加形成噪声干扰。根据中心极限定理，我们认为，噪声服从高斯分布在许多情况下是合理的。
- 高斯噪声的统计描述：如果一个噪声过程 $n(t)$ ，对于任意的 $N \geq 1$ 和所有的时刻 $t_k$  ( $k=1, 2, \dots, N$ )，随机变量 $n(t)$ 服从高斯分布，则过程 $n(t)$ 就是一个高斯噪声随机变量过程，简称高斯噪声过程或高斯噪声。
- 高斯噪声的 $N$ 维联合概率密度函数从时域上描述了高斯噪声过程的统计特性。

## ②、白噪声

- 噪声过程的频域描述是其功率谱密度 $P_n(\omega)$ 。在理论分析和实际应用中具有重要意义的是经过理想化了的白噪声。
- 白噪声是功率谱密度均匀分布在整个频率轴上的一种噪声过程。通常认为白噪声过程的均值为0，因此白噪声也可以定义为均值为零，自相关函数为 $\delta$ 函数的噪声随机过程。

$$P_n(\omega) = \frac{N_0}{2}$$

$$r_n(\tau) = IFT[P_n(\omega)] = IFT\left[\frac{N_0}{2}\right] = \frac{N_0}{2} \delta(\tau)$$

## ②、白噪声

- 由于白噪声在频域上其功率谱密度是均匀分布的，而在时域上其自相关函数是  $\delta$  函数，因此它的任意两个不同时刻的随机变量是不相关的。这是白噪声的重要特性之一。
- 白噪声过程是一种理想化的数学模型，由于其功率谱密度在整个频率轴上均匀分布，所以其能量是无限的，但实际上这种理想白噪声并不存在。
- 理想化的白噪声过程意义在于：由于我们所采用的系统相对于整个频率轴来说是窄带系统，这样只要在系统的有效频带附近的一定范围内噪声过程的功率谱密度是均匀分布的，我们就可以把它作为白噪声过程来对待，这并不影响处理结果，而且带来数学上的很大方便。

### ③、高斯白噪声和有色噪声

- 如果一个噪声过程时域的随机变量的概率密度函数是高斯分布的，频域功率谱密度是均匀分布的，则称这样的噪声过程为**高斯白噪声**。高斯白噪声的重要特性是：任意两个或两个以上不同时刻的随机变量不仅是互不相关的，而且是相互统计独立的。
- 如果噪声过程 $n(t)$ 的功率谱密度在频域上的分布是不均匀的，则称其为有色噪声。在有色噪声中，通常采用具有高斯功率谱密度的模型，即

$$P_n(f) = P_0 \exp\left[-\frac{(f - f_0)^2}{2\sigma_f^2}\right]$$

- 均值 $f_0$ 代表噪声的谱中心频率，方差 $\sigma_f^2$ 反映噪声的谱宽度。

$$\omega = 2\pi f$$

# 4、统计信号处理发展概况

表 1.1 统计信号处理发展概况简表

信号处理类别 比较项	统计信号处理基础	现代信号处理
时域背景特性	平稳随机过程、高斯分布	平稳、非平稳随机过程, 高斯、非高斯分布
频域背景特性	均匀功率谱、高斯功率谱	均匀、非均匀功率谱, 高斯、非高斯功率谱
信号特性	简单信号、编码信号	编码信号, 扩频信号, 线性、非线性调频信号
系统特性	线性时不变最小相位系统	线性时不变、时变系统, 非线性时变、非最小相位系统
数学工具	随机过程、傅里叶变换	随机过程、傅里叶变换、高阶累积量、时频分析、小波变换
实现技术	采用现代模拟器件为主的模拟处理技术, 采用 DSP 为核心器件的数字处理技术	

### 三、“信号检测与估计理论”解决什么问题？包括哪些内容？

- “信号检测与估计理论”是研究“信息传输系统”中接收部分如何从噪声中把所需信号及其所需信息检测出来的理论。由以上的简介中，我们可以看到，“信号检测与估计理论”最早从雷达、通信、声纳等系统产生发展起来，现在它的应用已涉及到几乎所有科学技术领域。
- 研究方法：
  - 1、“信号检测与估计理论”是把所要处理的问题，归纳为一定的“数学模型”→运用“概率论”、“随机过程”、“数理统计”等数学工具→以普遍化的形式提出，以寻求普遍化的答案和结论。
  - 2、理论与工程实践相结合，以雷达系统、声纳系统、通信系统为主要对象。

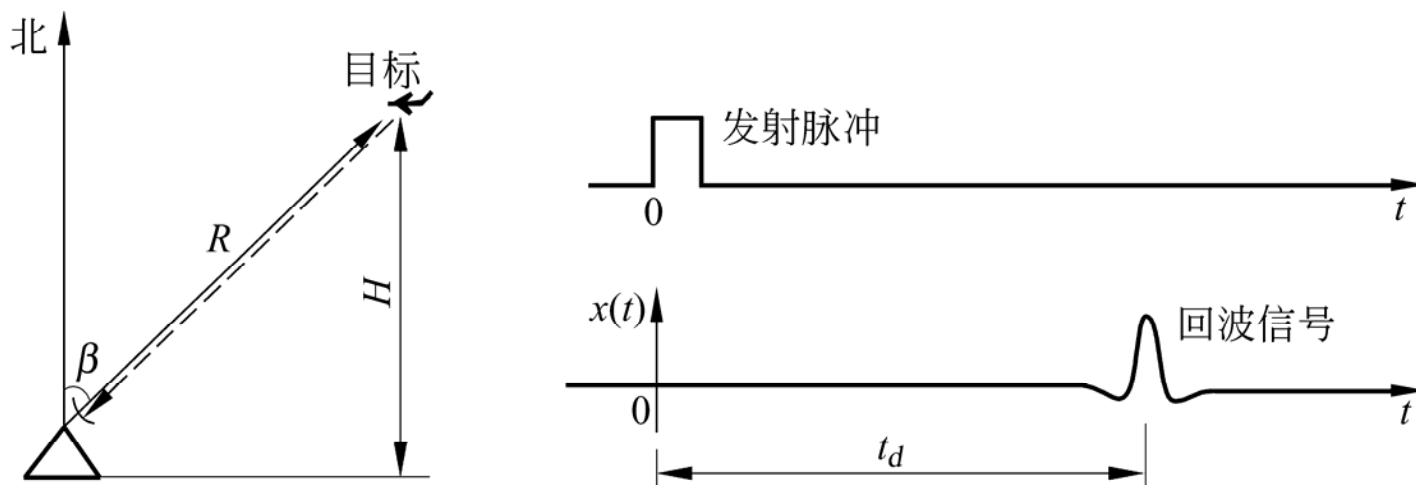
# “信号检测与估计”包括内容

“信号检测与估计”理论是现代信息科学的一个重要组成部分，主要内容包括：

- 1、**随机信号与噪声理论(The Theory of Random Signals and Noise)**——分析随机信号与噪声的数学工具
- 2、**统计判决（检测）理论(Statistical Decision Theory)**——研究在噪声干扰背景中，所关心的信号是属于哪种状态的最佳判决问题  
**(Detection of Signals in Noise)**
- 3、**参量估计理论(Estimation Theory of Signal Parameters)**——研究在噪声干扰背景中，通过对信号的观测，如何构造待估计参数的最佳估计量问题  
**(Estimation of Signal Parameters)**
- 4、**滤波理论(Filtering Theory)**——为了改善信号质量，研究在噪声干扰中所感兴趣信号波形的最佳恢复问题，或离散状态下表征信号在各离散时刻状态的最佳动态估计问题  
**(Estimation of Signal Waveform)**

# 雷达系统

雷达系统面临的任务之一就是从小可能非常恶劣的干扰环境中提取出人们感兴趣的目标信号，这就要求雷达系统根据目标信号和干扰信号的统计特性，采用统计信号处理的方法，按照某种设定的最佳准则，检测出目标信号，估计目标的有关参量（斜距 $R$ 、方位 $\beta$ 、高度 $H$ 和速度 $v$ ），建立目标的运动航迹，预测未来的目标运动状态等—雷达信号的**检测**、**参量估计**和**状态滤波**。



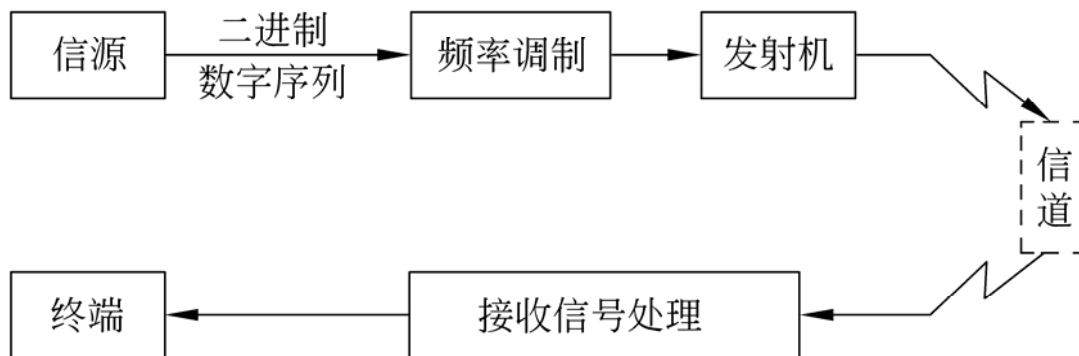
雷达系统工作示意图



# 通信系统

考虑如下图所示的二元数字通信系统，信源每隔 $T(\text{s})$ 产生一个二进制码0或1。为了使数字信息能够在信道中远距离传输，应将二进制数字码进行调制。比如，在调频体制下，用两种不同频率的正弦信号分别对数码0和1进行调制：

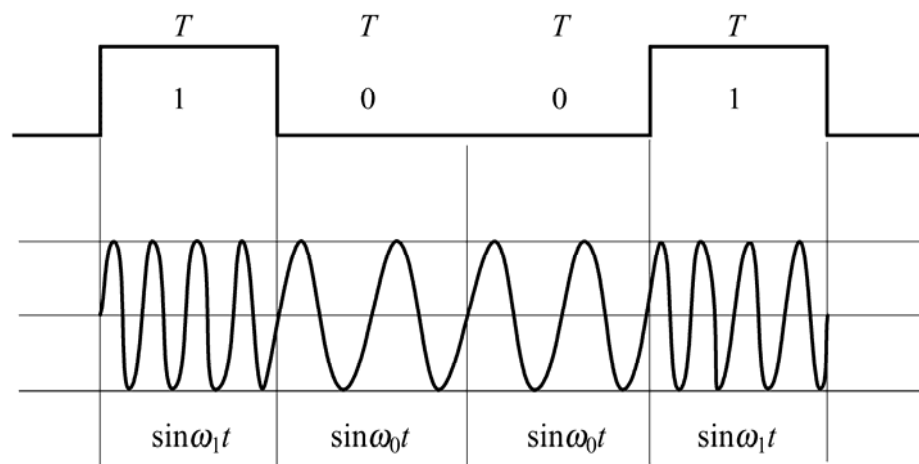
- 数码0:  $s_0(t) = \sin \omega_0 t, 0 \leq t \leq T$
- 数码1:  $s_1(t) = \sin \omega_1 t, 0 \leq t \leq T$



二进制数字通信系统原理框图

# 通信系统

- 例如该信号为下图所示的连续相位频移键控信号,信号 $s_0(t)$ 或 $s_1(t)$ 通过天线发射出去,由于噪声的影响,在接收到 $x(t)$ 后,并不知道在 $[0,T]$ 内发送的是 $s_0(t)$ 还是 $s_1(t)$ ?
- 要完成这种判断,需要根据在 $s_0(t)$ 下和 $s_1(t)$ 下接收信号在统计特性上的差异,并选择合理的最佳检测准则,才能得到在某种意义上的最佳判断结果。这就是信号的统计检测理论要研究和解决的问题。对于 $M(M>2)$ 元通信系统,同样存在需要最佳的判断,即在 $[0,T]$ 内究竟发送的是 $M$ 个可能信号中的哪一个的问题。这就是 $M$ 元信号的检测。



连续相位频移键控 (CPFSK) 信号

# 通信系统

- 在对信号的状态作出判断后，通常还需要获得信号有关参数的信息，如信号振幅，相位和频率等。这就是在对信号观测的基础上构造最佳估计量。这就是信号的统计估计理论问题。
- 如果还要求把收到噪声污染的信号波形恢复出来，这就是信号的波形估计。信号的波形估计一般是在线性最小均方误差准则下的一种最佳估计。波形估计可以是当前的，也可以是未来的或过去的，这就是所谓的滤波，预测和平滑。在离散时刻的波形估计又称为信号的状态估计。信号的波形估计或状态估计是信号的滤波理论研究的内容。
- 总的来说，信号的统计检测，估计和滤波三者相互之间是密切相关的。

# 四、课程性质和要求

一级学科

二级学科

信息与通信工程 { 通信与电子系统  
信号与信息处理

## 1、课程属性：

“信号检测与估计”是一级学科“信息与通信工程”的学科基础课

## 2、预备知识：“概率论”、“数理统计”

“信息论基础”、“随机过程”

## 3、教学目的和要求：

“信号检测与估计”理论是现代信息理论的一个重要分支，其理论基础是信息论。它是以概率论与数理统计为工具，以通信、雷达、声纳等为应用实例，综合系统理论与通信工程的一门科学，通过本课程学习，应掌握信号检测与估计的基本概念、理论和方法。

## 4、教学方式：

课堂讲授，讨论，配合一定数量的习题。

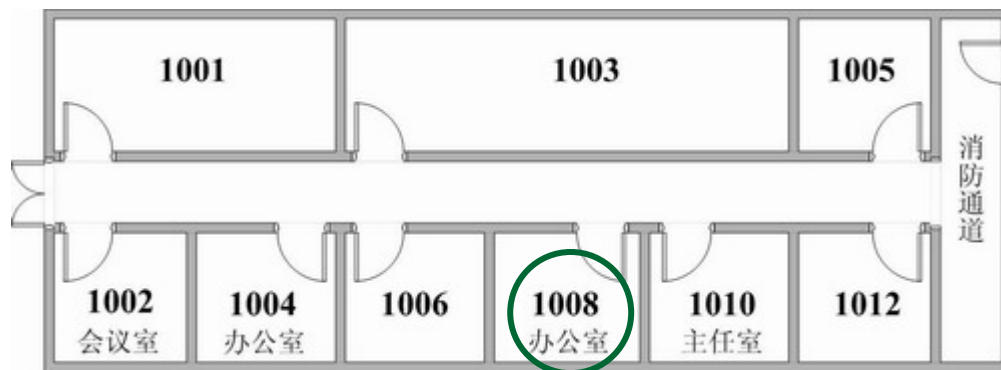
## 5、考核方式：课程论文（30%）+考试（70%）

## 上课地点、时间:

- 星期三, 第12-14节 (19:30-21:55 PM), 测绘校区, I-319M (Every week, 2-18)

## 答疑地点、时间:

- 地点: 教学实验大楼十楼信号处理实验室 - 1008;
- 时间: 星期四, 2:30-5:00, PM
- 其它答疑方式:
  - 电子邮件: [yw@eis.whu.edu.cn](mailto:yw@eis.whu.edu.cn);
  - 办公电话: 027-68778181



Here you  
can find me!

E-mail: [yw@eis.whu.edu.cn](mailto:yw@eis.whu.edu.cn)  
Tel(O): 027-68778181

# 讲课提纲

- 第一章 概论
  - 第一节 信号处理中的估计与检测
  - 第二节 估计和检测问题的数学描述
  - 第三节 估计和检测问题的内容体系
  - 重点讲授 估计和检测的基本概念以及历史发展，数学模型与描述。
- 第二章 经典估计理论
  - 第一节 最小方差无偏估计(MVU)
  - 第二节 最佳线性无偏估计(BLUE)
  - 第三节 最大似然估计(MLE)
  - 第四节 最小二乘估计(LSE)
  - 第五节 矩估计(ME)以及经典估计小结与应用实例
  - 重点讲授: **CRLB, RBLS, Neyman-Pearson**因子分解定理，经典的一般线性模型，各经典估计算法(MVU, BLUE, MLE, LSE, ME)的数据模型/假设，最佳准则以及性能评估。

# 讲课提纲

## ■ 第三章 贝叶斯估计理论

- 第一节 最小均方误差估计(MMSE)

- 第二节 最大后验估计(MAP)

- 第三节 线性最小均方误差估计(LMMSE)

- 第四节 小结与应用实例

- 重点讲授: 贝叶斯估值理论与方法, 贝叶斯线性模型, 各贝叶斯估计方法 (MMSE, MAP, LMMSE) 的数据模型/假设, 最佳准则以及性能评估。

## ■ 第四章 简单假设检验

- 第一节 统计判决理论I

- 第二节 确定信号

- 第三节 随机信号

- 第四节 小结与应用实例

- 重点讲授: 简单假设检验 (二元和多元) 的数据模型/假设, 最佳准则和性能评估。



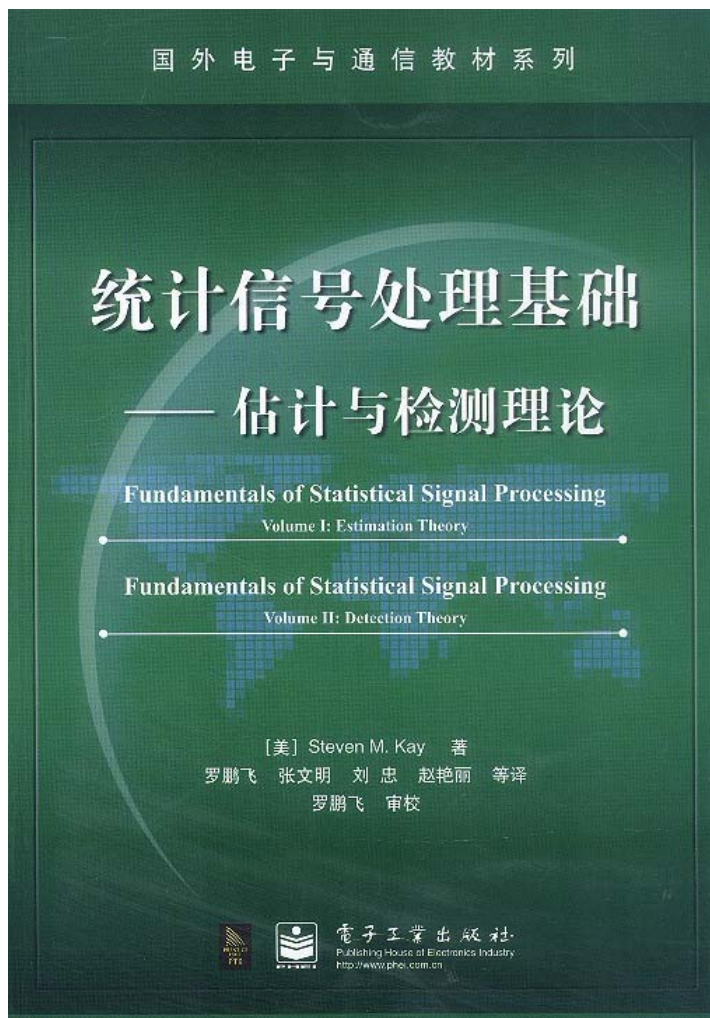
# 讲课提纲

- 第五章 复合假设检验
  - 第一节 统计判决理论II
  - 第二节 具有未知参数的确定性信号
  - 第三节 具有未知参数的随机性信号
  - 第四节 未知噪声参数
  - 第五节 非高斯噪声
  - 第六节 小结与应用实例
  - 重点讲授: 复合假设检验 (二元和多元) 的数据模型/假设, 最佳准则和性能评估。
- 第六章 信号的恒虚警率检测
  - 第一节 信号的恒虚警率检测概论
  - 第二节 信号的非参量检测
  - 第三节 信号的稳健性检测
  - 重点讲授: 恒虚警检测

# 对学习者的四点建议

- 建立随机信号应采用统计信号处理方法的概念；对于统计信号处理的含义，即信号的统计描述，统计意义上的最佳处理，性能的统计评估等概念要清楚，思路要清晰。
- 掌握扎实的统计信号处理的理论基础，包括信号的统计检测理论，估计理论和滤波理论的基本概念，分析研究问题的基本方法和基本运算。
- 研究随机信号的统计处理理论，数学分析是必不可少的内容，建议能从物理的意义上而不仅限于数学公式上加以理解，以提高分析，解决问题的能力。
- 选做一定量的习题，以巩固，加深和扩展对所讨论问题的基本概念，基本方法和基本运算的掌握及熟练程度。

# 参考教材



# 参考教材

- **Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume I: Estimation Theory/Volume II: Detection Theory**, Steven M. Kay

中文译本：《统计信号处理基础——估计与检测理论》，2003.8

本书是一部经典的有关统计信号处理的权威著作。全书分为两卷，分别讲解了统计信号处理基础的估计理论和检测理论。

第一卷详细介绍了经典估计理论和贝叶斯估计，总结了各种估计方法，考虑了维纳滤波和卡尔曼滤波，并介绍了对复数据和参数的估计方法。本卷给出了大量的应用实例，范围包括高分辨率谱分析、系统辨识、自适应噪声对消、跟踪和定位等；并且设计了大量的习题以加深读者对基本概念的理解。

第二卷全面介绍了计算机上实现的最佳检测算法，并且重点介绍了现实中的信号处理应用，包括现代语音、通信技术以及传统的声纳/雷达系统。本卷从检测的基础理论开始，回顾了高斯、 $\chi^2$ 、F、瑞利及莱斯概率密度；讲解了高斯随机变量的二次型，以及渐近高斯概率密度和蒙特卡洛性能评估；介绍了基于简单假设检验的检测理论基础；最后详细分析了适合于未知信号和未知噪声参数的复合假设检验。

# 参考教材

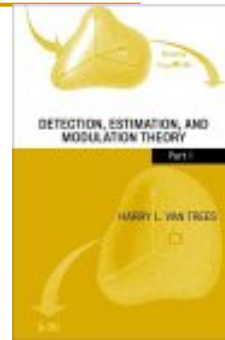
- 《信号检测与估计理论》 赵树杰， 赵建勋， 丛书: 高等院校信息与通信工程系列教材， 北京： 清华大学出版社， **2005.11**

本书在扼要复习信号检测与估计理论基础知识后，首先论述信号的统计检测理论和信号波形的检测，介绍了基于简单假设检验的确知信号最佳检测的概念、理论、技术和性能以及基于复合假设检验的随机参量信号的最佳检测问题；然后论述信号参量的统计估计理论和信号波形的滤波理论，讨论了在贝叶斯估计等各种估计准则下估计量的构造和性质，介绍了维纳滤波器的设计方法，导出了卡尔曼滤波的递推算法，并研究了它们的性质；最后介绍噪声或杂波干扰环境中的恒虚警率检测技术和性能，简要讨论了信号的非参量检测和稳健性检测的理论和方法。

# 其他书籍

- 沈凤麟，叶中付，钱玉美，信号统计分析与管理，中国科学技术大学出版社，**2001**。
- 李道本，信号的统计检测与估计理论（第二版），科学出版社，**2004**
- 陆根源，陈孝楨，信号检测与参数估计，科学出版社，**2004**
- 景占荣，信号检测与估计，化学工业出版社，**2004**
- 张明友等编著，信号检测与估计（第2版），电子工业出版社，**2005**

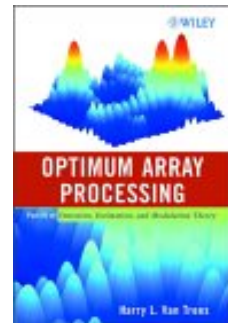
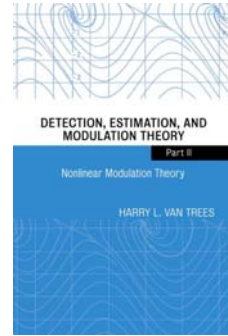
# “Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I”, Harry L. Van Trees, 1968



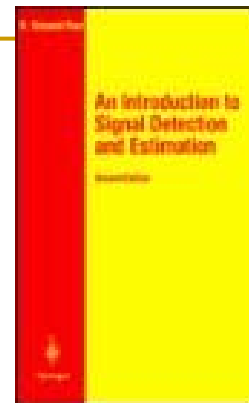
- First “engineering” textbook on the topic
- Will be republished periodically for all eternity
- Some homework problems are masters thesis topics!!!
- Every EE should have a copy
- Unfortunately, showing its age
  - All emphasis on continuous time problems, as might be implemented with analog computers
  - Ex: Discrete-time Kalman filtering relegated to a homework problem!!!
- Really wish Van Trees would write a 2<sup>nd</sup> edition

# Rest of Van Trees' Masterpiece

- “DEM Theory, Part II: Nonlinear Modulation Theory,” 1971
  - Not as popular as the others in the series
  - Recently republished
- “DEM Theory, Part III: Radar-Sonar Processing and Gaussian Signals in Noise,” 1971
  - Much material not readily available elsewhere
  - Often republished
- “DEM Theory, Part IV: Optimum Array Processing,” 2003
  - 30 years in the making
  - Worth the wait!



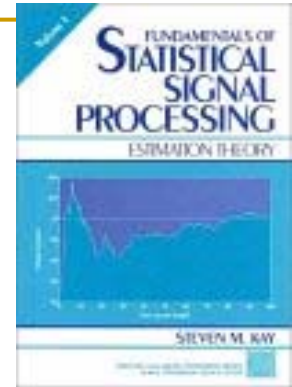




# “An Introduction to Signal Detection and Estimation,” 2<sup>nd</sup> Edition, H. Vincent Poor (1988, 1994)

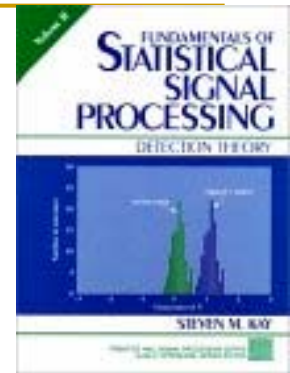
- “If you have some familiarity with the topic you will undoubtedly enjoy this book, but if you are a student tackling with this for the first time it will be demanding reading. You will need considerable fluency in random variable calculus to get the most out of the book, as the author presents many results and derivations as ‘straightforward.’”  
– Amazon Review
  - Excellent emphasis on general structure of det. & est. problems
  - Most mathematically rigorous of all the engineering texts
  - Alas, writing style is often dense and difficult to penetrate
-

# “Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume 1: Estimation Theory”, Steven Kay, 1993



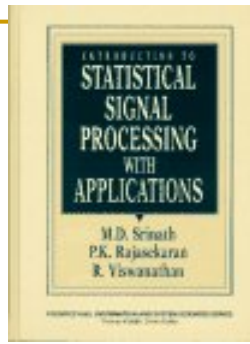
- “...excellent tutorial and research reference book on estimation theory. The theory is illustrated with very concrete examples; the examples give an ‘under-the-hood’ insight into the solution of some common estimation problems in signal processing. *If you're a statistician, you might not like this book. If you're an engineer, you will like it.*”  
– Amazon review
- “The theory is explained well and motivated, but what makes the book great are the examples. There are many worked examples and they are chosen to make things very clear.”  
– Amazon review

# “Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume 2: Detection Theory,” Steven Kay, 1998



- ❑ “This is an excellent book and is very easy to follow, unlike Poor's which is too mathematical and hard to read. However, this book does make many references to Vol. 1, the Estimation Theory, so you almost have to get both books to get a full understanding.” - Amazon review
  - ❑ Friendly and easy to read, like J.R.R. Tolkien
  - ❑ Sprawling and epic, like J.R.R. Tolkien  
(two book sequence is a bit unwieldy for a single course)
  - ❑ Seems to view the world as a series individual problems that come up one at a time and are addressed one at a time, like J.R.R. Tolkien (less emphasis on abstract, general structure found in Poor's book)
-

# “Introduction to Statistical Signal Processing,” M.D. Srinath, P.K. Rajasek, and R. Viswanthan, 1996



- “The book is well-organized in terms of content and layout, but the mathematics is very poorly presented. Some things just fall out of mid-air. It could use some rigorous presentation.” – Amazon Review
  - “For a mathematical text this book lacks a lot of details. Things often fall out of nowhere and it is very hard for students to follow how equations are derived.” – Amazon Review
  - Special topics: Digital Communications, Radar, Target Tracking Pattern Classification, System Identification
-

---

# Some Other Books

- “Elements of Signal Detection and Estimation,” Carl Helstrom, 1995
    - Out of print, unfortunately
    - A little bit wordy
    - Covers some interesting (although somewhat obscure) techniques not covered elsewhere: optical communications, saddle point integration, etc.
  - “Statistical Signal Processing: Detection, Estimation, and Time Series Analysis,” Louis Scharf, 1991
    - Heavy emphasis on matrix analysis; unique viewpoint
    - No continuous time results
    - Not recommended for ECE7251 in particular, but a good reference on the topics it covers; a good book to have close by when doing research
-

---

# Thank you!

Quiz Time!

