

信号检测与估值理论

Signal Detection and Estimation Theory

段江涛

jtduan@mail.xidian.edu.cn



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

教材

赵树杰，赵建勋

信号检测与估计理论

清华大学出版社



课程内容

- 相关课程：概率论与数理统计、随机过程、信号与系统
- 课程基本内容：信号统计检测理论、估计理论的基础理论
- 考核形式：平时成绩(20%)+随堂作业(20%)+大作业(60%)

信号检测与估计的概念、理论和方法是随机信号统计处理的理论基础。



课程内容及安排

- 数理统计与随机过程基础知识（6课时）
- 信号的统计与检测（10课时）
- 信号波形的检测（10课时）
- 信号参量的估值（10课时）
- 信号波形的估计（10课时）



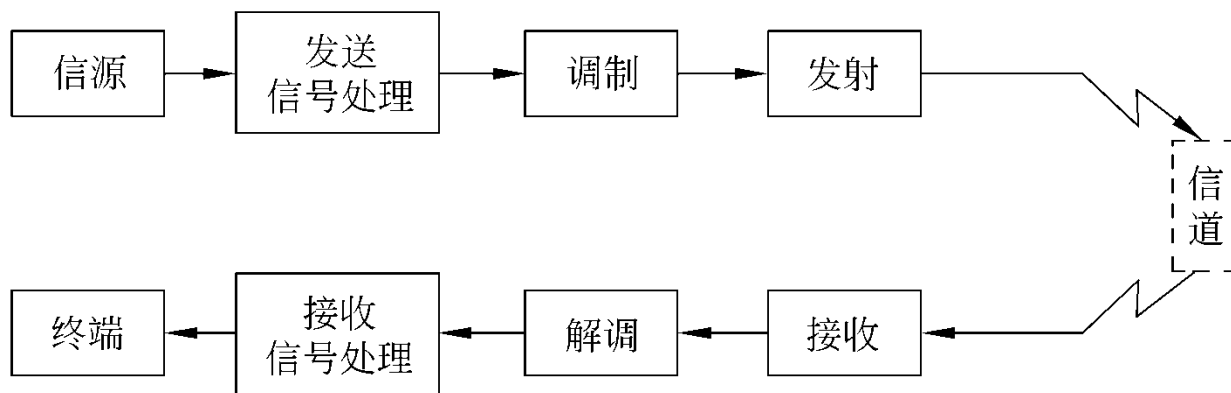
第一章 信号检测与估值概论

- 信号检测与估计：(1) 随机信号统计处理的理论基础
(2) 信息论的一个分支
- 信号检测与估计的基本任务：用**概率与数理统计**为工具，解决接收端信号与数据处理中的信息恢复与获取问题，即从被**噪声**及其它干扰污染的信号中提取、恢复所需的信息。
- 研究方法：信号的统计处理方法，了解收发信号和噪声的**统计特性**，按照一定准则设计相应的检测或估计算法，并进行性能评估。
- 应用：在通信, 雷达, 声纳, 自控, 辨识, 射电天文, 地震学, 医学等.
- 通信系统中的应用：解调、信道估计、MIMO检测、多用户检测



1.1 信号的随机性

➤ 无线通信系统



发送信号的随机性：按一定概率从某个符号集中选取接收的信号受到两部分噪声的污染：加性噪声和乘性噪声

接收信号，即要处理的信号：随机信号或随机过程

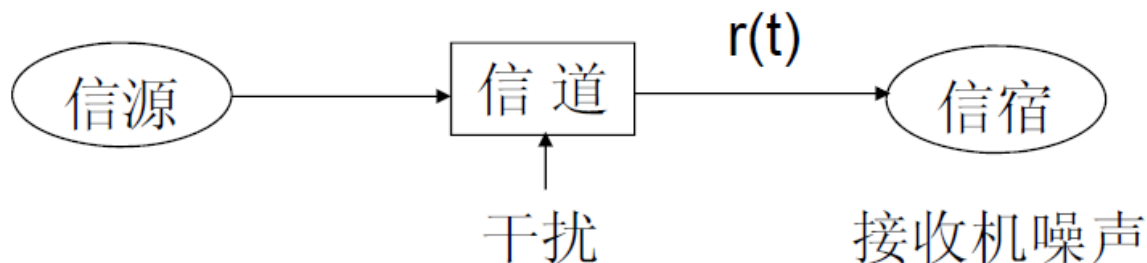
处理方法：统计信号处理或随机信号处理

信号处理目的：检测(判断具体发送的信号)、估计(估计信号参数)

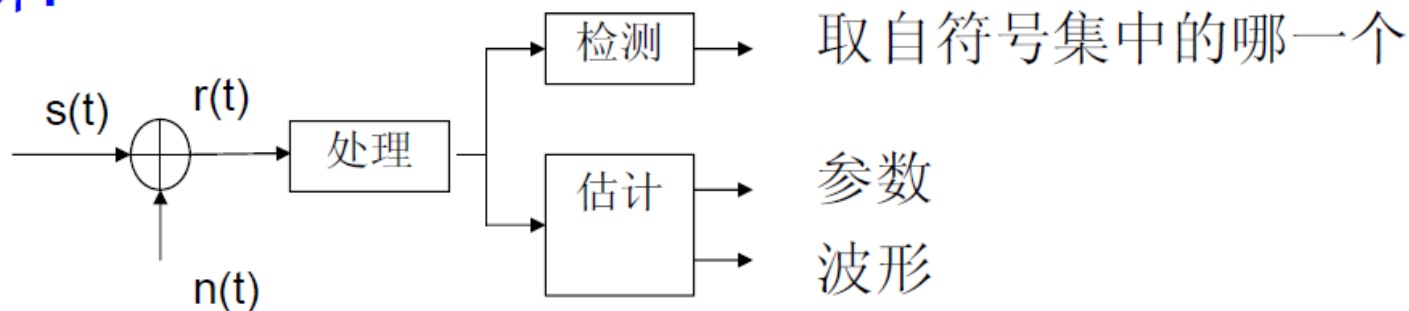


1.2 信号检测与估值示例

例1.通信系统



检测估计:



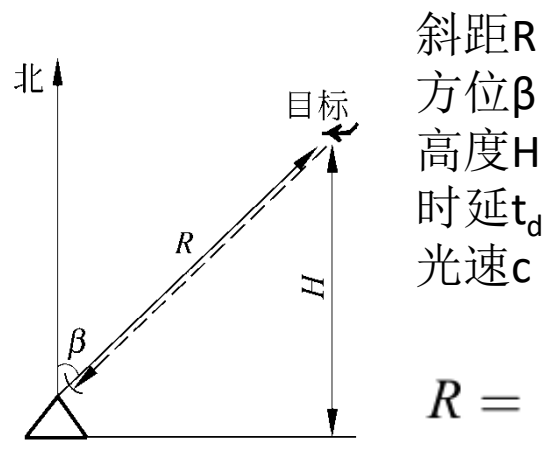
噪声 $n(t)$ 是具有随机特性的随机过程。



1.2 信号检测与估值示例

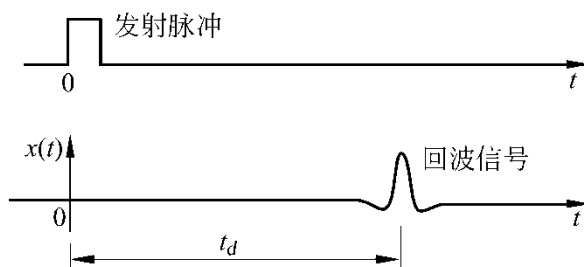
例2. 雷达系统

雷达系统 → 有无敌机？



一类问题 → **检测** → 判断信号有无

敌机的位置？高度、方位、距离等



另一类问题 → $\begin{cases} \text{估计} \rightarrow \text{信号包含的参数} \\ \text{信号的波形} \rightarrow \text{调制理论} \end{cases}$

提取
滤波



1.2 信号检测与估值示例

检测与估计比较：

月黑风高的晚上，灯光灰暗（噪声）

- 路上是否有一人 （雷达检测问题）
- 这个人是男还是女（二进制数字通信问题）
- 如果有人，身高、体重如何？（参数估计）

1.3 信号的统计处理方法

- 信号随机特性的描述：用概率密度函数、均值、相关函数、方差函数、功率谱密度函数等来描述随机信号的统计特性。
- 统计意义上的最佳处理：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统计意义上的。
- 性能的统计评估：处理结果的评价，需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



1.4 信号的描述

● 信号分类

- 确知信号: 可以用一个确定的时间函数来表示的信号。 $s(t)(0 \leq t \leq T)$
- 随机未知参量信号: 也表示为时间的函数, 但信号中含有一个或一个以上的参量是随机 (未知) 的。 $s(t; \theta)(0 \leq t \leq T)$, 其中 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M)^T$, 表示信号中含有 M 个随机 (未知) 参量。

● 考虑加性噪声 $n(t)$ 下的待处理信号 (称作接收信号或观测信号) $x(t)$

$$\text{确知信号:} \quad x(t) = s(t) + n(t), \quad (0 \leq t \leq T)$$

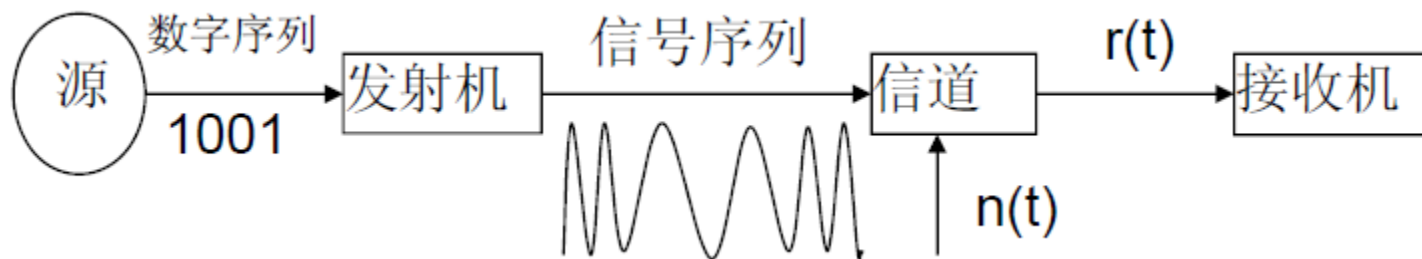
$$\text{随机 (未知) 参量信号:} \quad x(t) = s(t; \theta) + n(t), \quad (0 \leq t \leq T)$$

● 信号的随机性

由于噪声 $n(t)$ 是具有随机特性的随机过程, 即使信号是确知信号 $s(t)$, 其接收信号 $x(t)$ 也具有随机特性的信号。对于随机 (未知) 参量信号 $s(t; \theta)$, 其接收信号 $x(t)$ 更是一随机信号。



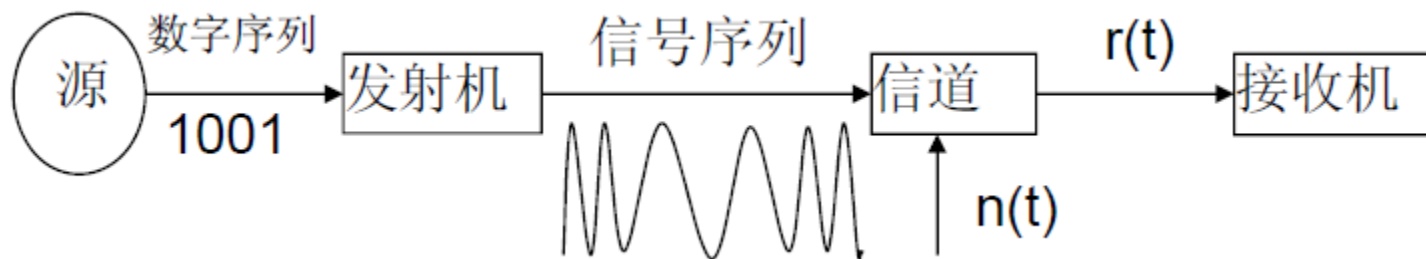
1.4 信号的描述



- **发射机**：对数码1和0进行调制分别发生两种信号 $s_1(t)$ 或 $s_0(t)$
- **接收机或处理器**：根据在 $[0, T]$ 内观测到的信号 $r(t)$ 的统计特性，判断信源发送的是 $s_1(t)$ 或 $s_0(t)$ ，使错误概率最小（使风险最小）。
- 设计和计算这种处理器问题——称为检测问题
- 噪声和干扰是造成错误的来源



1.4 信号的描述



(1) 确知信号的检测问题

发送端: FSK调制

信息比特为 1	$\sin(\omega_1 t)$	$[0, T]$	假设 H_1
信息比特为 0	$\sin(\omega_0 t)$	$[0, T]$	假设 H_0

接收端 $r(t)$

若 1	$\sin(\omega_1 t) + n(t)$: 假设 H_1	$0 < t < T$
若 0	$\sin(\omega_0 t) + n(t)$: 假设 H_0	$0 < t < T$



1.4 信号的描述

(2) 未知参量信号的检测问题

发送端:

$$\text{当 } 1 \quad \sin(\omega_1 t + \theta_1) \quad [0, T]$$

$$\text{当 } 0 \quad \sin(\omega_0 t + \theta_0) \quad [0, T]$$

接收端 $r(t)$

$$\text{当 } 1 \quad \sin(\omega_1 t + \theta_1) + n(t) \quad : \text{假设 } H_1 \quad 0 < t < T$$

$$\text{当 } 0 \quad \sin(\omega_0 t + \theta_0) + n(t) \quad : \text{假设 } H_0 \quad 0 < t < T$$

每个信号都有相应的相移 θ_1, θ_0 在 $[0, T]$ 中不变,但事先不知道,这时即使没有噪声,在测量之前,输入是未知的,不能完全知道.

噪声中具有未知参数信号(信号形式已知)的检测问题.



1.4 信号的描述

(3) 随机信号的检测问题

不仅参数未知,信号本身也不确定,它是随机过程的一个样本函数.如水下声纳:敌舰噪声,敌舰发动机,推进器及其它噪声.

只有通过统计特性的差异来判决——噪声中随机信号的检测问题.



1.5 信号检测与估值理论发展史

- 四十年代：初创与奠基性时期。Wiener和Kolmogoroff首先把统计方法用于最佳线性滤波问题，创立了**最佳线性滤波器理论**。随后，人们采用最大SNR(信噪比)为准则，建立了匹配滤波器理论。1947年，Kotelnikov用概率方法建立了**潜在抗干扰理论**，提出了高斯信道中的理想接收机为**最大后验概率接收机**。1948年，Shannon创立了信息理论。
- 五十年代：发展时期。人们将经典的统计判决理论应用于信号检测问题，建立起一套**统计的信号检测理论**。60年代初，人们将状态变量法引入到滤波理论，创立了**Kalman滤波理论**。
- 七十年代后：理论完善与广泛应用。MLSD、Robust检测、量子检测、多用户检测。



1.5 信号检测与估值理论发展史

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	



内容编排

- 第二章 基础知识（6学时）：随机变量、随机过程的基本概念、统计描述和主要统计特性，高斯噪声、高斯白噪声的概念和统计描述，线性系统对随机信号的响应，随机参量信号。
- 第三章 信号的统计与检测（10学时）：信号统计检测的基本概念，二元信号的贝叶斯准则，派生贝叶斯准则，统计检测的性能，多元信号检测，参量信号检测。
- 第四章 信号波形的检测（10学时）：匹配滤波器理论，随机过程正交级数展开，高斯白噪声中确知信号波形的检测，高斯白噪声中随机参量信号的检测。
- 第五章 信号参量的估值（10学时）：参量估值的基本概念和构造方法，贝叶斯估计和最大似然估计，估计量的性质，矢量估计，线性最小方差估计，最小二乘估计。
- 第六章 信号波形的估计（10学时）：基本概念，连续维纳滤波，离散维纳滤波，离散卡尔曼滤波。



学习建议

- 建立随机信号应采用**统计处理方法**的概念，包括信号的统计描述、统计意义上的最佳处理、性能的统计评估。
- 数学分析的基础上，从物理意义上加以理解。
- 做一定量的习题，巩固所学内容。
- 课程学习过程中，和实际通信系统联系起来，学会应用。