

# 随机信号分析

## 第四章 随机信号通过线性系统的分析

主讲：赵国亮

内蒙古大学电子信息工程学院

November 16, 2020

# 目录 I

- 1 信号与系统概述
  - 系统及其分类
  - 线性时不变系统
- 2 随机信号过线性时不变系统
  - 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数
  - 线性时不变系统输入输出的宽各态历经
- 3 随机序列过线性时不变系统
  - 系统输出的自相关函数和功率谱密度函数
  - 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数
- 4 白噪声过线性时不变系统
  - 色噪声白化的方法
  - 白噪声通过理想带通系统
- 5 平稳序列的参数模型
  - 自回归模型
  - 随机信号通过线性时变系统 \*

## Github 下载



## 第4章 随机信号通过线性系统的分析

## 随机信号

通过线性系统 (Linear Systems) 的分析是信号进行统计处理的基础。由于随机信号不能像确定信号 (Deterministic Signals) 那样用明确的数学表达式来描述, 只能用概率统计的方法进行描述, 因此, 研究随机信号通过线性系统的输出, 也只能从分析系统输出的统计特性入手。

直接获取系统输出的概率分布一般比较困难, 但在许多实际应用中, 如果知道了系统输出的一些统计特性 (如均值相关函数、功率谱密度函数等) 往往就能解决问题。

1) 首先介绍信号与系统的基本概念、分类和特点；

2) 然后分别从连续系统、离散系统两方面分析随机信号通过线性时不变系统的统计特性，重点介绍系统输出的一阶和二阶统计特性；

3) 在此基础上，介绍平稳随机序列的另一种分析方法及随机序列参数模型的概念；介绍随机信号通过线性时变系统的一阶和二阶输出统计特性；

4) 最后给出随机信号通过非线性系统的几种常用分析方法。

# 目录

- 1 信号与系统概述
  - 系统及其分类
  - 线性时不变系统
- 2 随机信号过线性时不变系统
  - 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数
  - 线性时不变系统输入输出的宽各态历经
- 3 随机序列过线性时不变系统
  - 系统输出的自相关函数和功率谱密度函数
  - 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数
- 4 白噪声过线性时不变系统
  - 色噪声白化的方法
  - 白噪声通过理想带通系统
- 5 平稳序列的参数模型
  - 自回归模型
  - 随机信号通过线性时变系统 \*







根据信号的函数特点及其频谱分布特性，一般对信号进行如下分类。

## 确定信号与随机信号

根据信号变化规律是否可预知，可以将信号分为确定信号和随机信号。能够用确定的数学表达式来描述变化规律的信号称为确定信号。

## 确定信号

熟知的正弦信号、指数信号等。对于这类信号，给定一个时刻，就有一个确定的值与之对应。



## 严格平稳随机信号

更进一步，如果由随机信号所确定的任意维概率密度函数都满足时延不变性，该随机信号又称为严格平稳随机信号；

## 广义平稳随机信号

如果仅有一阶和二阶统计量满足时延不变性，则称之为广义平稳随机信号；不具有上述特性的随机信号则称为非平稳随机信号。

## 分布特性分类

随机信号还可以根据分布特性分为高斯信号与非高斯信号等由于信号在传输过程中一般会受到周围环境的各种干扰及系统内部热噪声的影响，实际系统输出的信号多为随机信号，或者是确定信号与随机信号的叠加。

## 连续信号

根据函数自变量的取值是否连续，可以将信号分为连续信号和离散信号。除了若干个不连续点外，在自变量范围内的任何时刻都能连续取值的信号称为连续信号，如正弦信号、单位阶跃信号等。

连续信号的函数值既可以是连续的也可以是离散的，函数值连续取值的信号称为模拟信号，而只能取特定离散值的称为量化信号。离散信号的自变量只能在一些规定的离散时刻才能取值，而在其他时刻则没有定义。离散信号可以由连续信号经过抽样后得到。

也有些信号本身就是离散信号，如国家按年度统计的国民生产总值、股票交易数据、公司按月统计的销售额等。如果离散信号的函数值可连续取值，则称为抽样信号，若只能取离散值，则称为数字信号或时间序列。

## 周期信号

根据信号按一定间隔是否周期重复，可以将信号分为周期信号与非周期信号。如果信号  $s(t)$  按一定的时间间隔  $T$ ，周而复始的变化，即  $s(t) = s(t + kT), k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots$ 。则称信号  $s(t)$  为周期信号， $T$  为信号的周期，如正弦信号  $s(t) = A \cos(\omega t + \phi)$  就是一个周期为  $2\pi/\omega$  的周期信号。

## 非周期信号

如指数信号，则不具有这种周而复始变化的特性。

# 能量信号和功率信号——根据时域特性进行分类。

## 能量或功率是否为有限

根据信号的能量或功率是否为有限值，将信号分为能量信号与功率信号。信号的能量和平均功率：

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t)dt. \quad (1)$$

$$P = \lim_{T \rightarrow +\infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s^2(t)dt. \quad (2)$$

能量  $E < +\infty$  的信号称为能量信号；不满足能量有限，但满足  $P < +\infty$  的信号称为功率信号，根据定义可知，能量信号的平均功率为零，周期信号一般都是功率信号，而非周期信号则可能是能量信号，也可能是功率信号。以上是从信号的时间域对信号进行分类。

# 基带信号与高频带通信号

## 按信号频谱分类

根据信号频谱的分布特性，也可以将信号分为基带信号与高频带通信号。

## 基带信号

① 频谱主要集中在零值附近的信号称为基带信号。

## 高频带通信号

② 如果信号的频谱主要集中在以  $\pm\omega_0$  为中心频率、带宽为  $\Delta\omega$  的范围内，则该信号称为高频带通信号。

## 高频带通信号的细分

根据带宽  $\Delta\omega$  相对载波  $\omega_0$  的比例关系，又可进一步将信号进行划分。

① 一般将该比例在 1% 以内的信号称为窄带信号，常规的通信、雷达等系统中涉及的信号大多为窄带信号；

② 该比例在 1% 20% 之间的信号称为宽带信号；超过 20% 的称为超宽带信号。窄带信号通常可表示为如下形式：

$$s(t) = a(t) \cos[\omega_0 t + \theta(t)]. \quad (3)$$

式中  $a(t)$  和  $\theta(t)$  相对于载波变化缓慢，均为基带慢变信号。



为了便于分析和处理，通常又将上式表示成复信号的形式：

$$\tilde{s}(t) = a(t)e^{j[\omega_0 t + \theta(t)]} = \tilde{a}(t)e^{j\omega_0 t}. \quad (4)$$

其中

$$\tilde{a}(t) = a(t)e^{j\theta(t)} = a(t) \cos \theta(t) + ja(t) \sin \theta(t) = s_I(t) + js_Q(t) \quad (5)$$

称为信号  $s(t)$  的复包络， $s_I(t)$  和  $s_Q(t)$  称为信号  $s(t)$  的两个正交分量。

对于任意实信号  $s(t)$ ,  $-\infty < t < +\infty$ , 其复表示为

$$\tilde{s}(t) = s(t) + j\hat{s}(t), \quad -\infty < t < +\infty, \quad (6)$$

其中  $\hat{s}(t) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t-\tau} d\tau$ ，如为  $s(t)$  的希尔伯特变换。 $\tilde{s}(t)$  也称为  $s(t)$  的解析信号或信号预包络。

## 系统的定义

由若干个相互联系的事物组成的具有特定功能的整体，它是个应用非常广泛的概念。在信号处理领域，系统可以看作是能够导致任何一种信号变换的过程。

对于任何一个系统，不管其内部结构如何，都存在一个输入信号和一个经过系统变换而与输入信号相关联的输出信号，或者是多个输入信号和多个与之相关联的输出信号，前者称为单输入单输出系统，后者则称为多输入多输出系统，如图 1 所示。

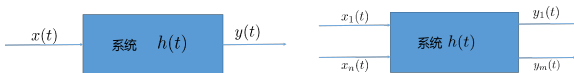


图 1: SISO 和 MIMO 系统

# 系统处理的信号形式的不同及性质

## 连续系统

如果系统的输入和输出均为连续的信号，称这样的系统为连续系统。

## 离散系统

输入和输出均为离散信号的系统称为离散系统。

## 混合系统

由连续系统和离散系统两者混合组成的系统则称为混合系统。

## 记忆系统与无记忆系统

若某一时刻系统的输出只与该时刻系统的输入有关，称这样的系统为无记忆系统；反之，若某一时刻系统的输出还与其他时刻的输入有关，则称为记忆系统。

### 常见的无记忆系统

电阻器、检波器、限幅器等，记忆系统有积分器、累积器、平滑器等。

### 3. 线性系统与非线性系统

能同时满足齐次性和叠加性的系统称为线性系统。

线性系统的齐次性是指，当输入被扩大  $k$  倍后，系统的输出也相应地被扩大  $k$  倍；

叠加性是指，当有多个输入同时作用于系统时，系统的输出等于各个输入单独作用后系统的输出之和。也就是说，对于线性系统，如果输入  $X_1(t)$  对应的系统输出为  $Y_1(t)$ ，输入  $X_2(t)$  对应的系统输出为  $Y_2(t)$ ，则输入  $k_1x_1(t) + k_2x_2(t)$  对应的输出为  $k_1y_1(t) + k_2y_2(t)$ 。

## 非线性系统

不满足齐次性和叠加性的系统就称为非线性系统。

## 4. 时变系统与时不变系统

如果系统的输出与输入的起始作用时间无关，当输入被延时，系统的输出仅作相应的延时而波形不变，这样的系统称为时不变系统。

即对于时不变系统，如果输入  $X(t)$  延时到  $x(t-l)$ ，输出则从  $y(t)$  延时到  $y(t-\tau)$ 。系统的输出波形与输入的起始作用时间有关的系统就称为时变系统。

## 5. 系统与不稳定系统

如果对有界的输入，系统的输出也有界，这样的系统为稳定系统。

如果系统对有界输入的输出是无限值，则为不稳定系统。显然，只有稳定系统才具有实际应用价值。

目录	信号与系统概述	随机信号过线性时不变系统	随机序列过线性时不变系统	白噪声过线性时不变系统	平稳序列的参数模型
○○○○	○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○●○○○○○ ○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○ ○○○○ ○○○○○	○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○	○○○○○○ ○○○○○○○○ ○○○

## 6. 考虑因果关系时的系统分类

系统的输出与输入是相关的，如果系统在任一时刻的输出只与该时刻及该时刻以前的输入有关，而与该时刻以后的输入无关，称这样的系统为因果系统。

如果输出还跟当前时刻以后的输入有关，则这样的系统称为非因果系统。根据定义，所有的无记忆系统都是因果系统。

记忆系统则可能是因果系统，如积分器、累积器等；也可能是非因果系统，如平滑器、一些事后分析系统等。

## 7. 可逆系统与不可逆系统

如果对不同的输入系统能产生不同的输出，即根据系统的输出能唯一确定输入，称这样的系统为可逆系统。根据输出不能唯一确定输入的系统称为不可逆系统。

对于任何可逆系统，均存在一个该系统的逆系统，将它与原系统级联后，能恢复出原系统的输入。

可逆系统在实际中有着很多非常重要的应用，其中最典型的就是通信系统中的一些处理器件，如发送端的编码器、调制器等都是可逆系统，其对应的逆系统为接收端的解码器、解调器。



# 系统频域特性的分类结果

## 8. 最小相移系统

如果从系统的复频域上看，一个因果稳定的线性时不变系统，则要求连续系统的所有极点必须位于  $S$  平面的虚轴左侧，或者离散系统的所有极点必须位于  $Z$  平面的单位圆内，而对系统的零点没有限制在此基础上，

根据系统零点的分布情况，如果系统的所有零点也都位于  $S$  平面的虚轴左侧或者  $Z$  平面的单位圆内，则称该因果稳定的线性时不变系统为最小相移系统。

## 非最小相移系统

如果只要有一个零点位于  $S$  平面的虚轴右侧或者  $Z$  平面的单位圆外，就称为非最小相移系统。

可见，最小相移系统一定存在逆系统，而且该逆系统既是因果稳定系统，也是最小相移系统。

## 滤波

此外，根据输入信号、系统和输出信号之间的关系，如果已知一个输入信号，将其通过一个已知的系统来寻求输出信号，一般称之为滤波；

## 系统辨识

如果已知一个输入信号，根据其通过一个系统的输出信号来寻

目录	信号与系统概述	随机信号过线性时不变系统	随机序列过线性时不变系统	白噪声过线性时不变系统	平稳序列的参数模型
○○○○	○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○●○○ ○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○ ○○○○ ○○○○○	○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○	○○○○○○ ○○○○○○○○ ○○○

## 逆滤波

如果根据一个已知系统的输出信号来恢复出系统的输入信号，则称之为逆滤波；

## 盲均衡和盲分离

如果根据一个系统的部分特性和系统输出信号来确定系统传输函数，并恢复出输入信号，则称之为盲均衡。

盲均衡不借助训练序列, 仅仅利用所接收到的信号序列对信道进行自适应均衡。

## 盲分离

盲信号分离最早由 Herault 和 Jutten 在 1985 年提出,指的是从多个观测到的混合信号中分析出没有观测的原始信号。

混合信号通常来自多个传感器的输出 (传感器的输出信号独立性 (线性不相关))。

## “盲”的内涵

“盲”强调对信号盲

1) 原始信号并不知道; 2) 对于信号混合的方法也不知道。

# (1) 线性时不变冲激响应

根据冲激函数  $\delta(t)$  的性质

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \delta(t - \tau) d\tau, \quad (7)$$

带入式  $y(t) = L[x(t)]$ , 运用线性算子  $L[\cdot]$ , 对时间  $t$  进行运算, 故有

$$\begin{aligned} y(t) &= L(x(t)) \\ &= L\left[\int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \delta(t - \tau) d\tau\right] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) L[\delta(t - \tau)] d\tau, \end{aligned} \quad (8)$$

# 线性系统的冲激响应

## 3. 线性系统与非线性系统

定义函数  $h(t) = L[\delta(t)]$ , 函数  $h(t)$  是线性系统在输入冲激  $\delta(t)$  情况下的输出, 所有通常称  $h(t)$  为线性系统的冲激响应,

冲激响应是反映系统时域特性的一个构造函数, 是一个理想模型。

线性系统的输出为

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t, \tau)d\tau \quad (9)$$

## (2) 线性时不变系统

### 线性时不变系统

若输入信号  $x(t)$  有时移，使系统输出  $y(t)$  有一个相同的时间移动，即

$$y(t - \tau) = L[\delta(t - \tau)], \quad (10)$$

则这个系统的算子  $L(\cdot)$  就称为线性时不变系统。

因此，线性时不变系统的冲激响应  $\delta(t)$  也应满足下式

$$h(t - \tau) = L[\delta(t - \tau)], \quad (11)$$

# 一个线性时不变系统的输出响应

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau, \quad (12)$$

置换变量，也可写成

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau)h(\tau)d\tau; \quad (13)$$

经常记作

$$y(t) = x(t) * h(t), \quad (14)$$

上式表明：线性时不变系统的响应完全由系统的输入  $x(t)$  与系统的冲激响应  $h(t)$  所确定。



## 输入输出信号和冲激响应在频域中的关系

对式  $y(t) = x(t) * h(t)$  作傅氏变换, 则三者之间在频域中的关系为

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega), \quad (15)$$

式中  $H(\omega)$  称系统的传递函数.

传递函数与系统的冲激响应构成一对傅里叶变换, 即

$$h(t) \xrightleftharpoons[F^{-1}]{F} H(\omega). \quad (16)$$

### (3) 系统的稳定性和物理可实现

#### 线性时不变系统的稳定性定义

若一个线性时不变系统, 对任意有界输入, 其输出均有界, 则称此系统是稳定的。

根据定义寻找稳定系统的条件。若输入信号有界, 则必有正常数  $A$  存在, 使得对于所有的  $t$ , 有  $|x(t)| \leq A < \infty$  成立。

由式 (17) 可知, 即

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau)h(\tau)d\tau, \quad (17)$$

对所有的  $t$  显然有下式成立。

$$\begin{aligned} |y(t)| &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau \right| \leq \int_{-\infty}^{\infty} |h(\tau)||x(t - \tau)|d\tau \\ &\leq \int_{-\infty}^{\infty} |h(\tau)|d\tau. \end{aligned} \quad (18)$$

如果要求系统稳定, 即要求输出有界,  $|y(t)| \leq B < \infty$ , 则稳定系统的冲激应满足

$$\int_{-\infty}^{\infty} |h(\tau)|d\tau < \infty, \quad (19)$$

即冲激响应  $h(t)$  绝对可积。

## (2) 物理可实现性 (因果性)

### 线性时不变系统的因果性

工程上为使系统在物理上有可实现性, 必须要求系统在考察 ( $t = 0$ ) 以前不产生响应, 即系统具有因果性。

也就是说系统的冲激响应函数应满足

$$h(t) = 0, \quad t < 0. \quad (20)$$

所有实际运行的物理可实现系统都是因果的, 都满足上式。

于是, 对于物理可实现系统来说, 有

$$\begin{aligned}
 y(t) &= \int_0^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau \\
 &= \int_{-\infty}^t x(\tau)h(t-\tau)d\tau.
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

物理可实现系统的传递函数为

$$H(\omega) = \int_0^{\infty} h(t)e^{-j\omega t}dt,
 \tag{22}$$

上式也可以用复频率 ( $s = \sigma + j\omega$ ) 表示, 若以  $s$  代替  $H(\omega)$  中含  $\omega$  的复数, 则有

$$\mathcal{L}(s) = H(s) = \int_0^{\infty} h(t)e^{-st}dt.
 \tag{23}$$

### (3) 稳定的物理可实现系统

#### 稳定的物理可实现系统

若物理可实现系统的传递函数  $H(s)$  的所有极点都位于  $S$  平面的左半平 (不含虚轴), 则称此系统为“稳定的物理可实现系统”。

#### 例 1

某系统的传递函数用拉氏变换形式表示, 讨论其稳定性。

$$(1) H_1(s) = \frac{1}{a+s}, \quad a > 0;$$

$$(2) H_2(s) = \frac{1}{a-s}, \quad a > 0.$$



# 解

## $H_1(s)$ 的稳定性

①  $H_1(s)$  的极点  $s_1 = -a < 0$  在左半平面, 冲激响应为  $h_1(t) = e^{-at}(t > 0)$ , 此系统的冲激响应绝对可积, 所以此系统是稳定的。

## $H_2(s)$ 的稳定性

②  $H_2(s)$  的极点  $s_2 = a > 0$  在右半平面, 相应的冲激响应  $h_2(t) = e^{at}(t > 0)$ , 此系统的冲激响应非绝对可积, 所以此系统是不稳定的。

目录	信号与系统概述	随机信号过线性时不变系统	随机序列过线性时不变系统	白噪声过线性时不变系统	平稳序列的参数模型
○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	●○○○○○○○○	○○○○○	○○○○○○○○○○○	○○○○○○
	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○	○○○○○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○
	○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○	○○○○○○○	○○○

# 目录

- 1 信号与系统概述
  - 系统及其分类
  - 线性时不变系统
- 2 随机信号过线性时不变系统
  - 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数
  - 线性时不变系统输入输出的宽各态历经
- 3 随机序列过线性时不变系统
  - 系统输出的自相关函数和功率谱密度函数
  - 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数
- 4 白噪声过线性时不变系统
  - 色噪声白化的方法
  - 白噪声通过理想带通系统
- 5 平稳序列的参数模型
  - 自回归模型
  - 随机信号通过线性时变系统 \*



上节中我们讨论了信号与系统的一些概念、分类和特点，有关确定信号通过线性系统的分析已经在信号与系统的相关课程中作了介绍。

## 考虑随机性

而实际应用中的信号大多是随机信号，这里我们利用信号与系统、随机过程等课程中的相关知识，分析随机信号通过线性时不变系统的统计特性。

重点介绍系统输出的一阶、二阶统计特性。

考虑随机信号  $\{x(t)\}$  通过一个连续线性时不变系统，系统的冲激响应为  $h^*(t)$  输出为随机信号  $\{y(t)\}$ ，如图 2 所示。

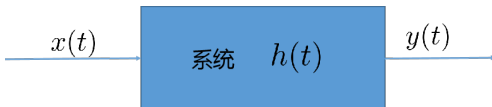


图 2: 随机信号通过线性时不变系统示意图

由于随机信号  $\{x(t)\}$  可以看作是大量样本函数的集合，一个样本函数  $x(t)$  对应一次试验的结果，均为确定的时间函数。当样本函数  $x_k(t) = x(t)$  通过线性时不变系统时，其输出  $y(t)$  与输入  $x(t)$  之间存在如下卷积关系：

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau. \quad (24)$$

如果  $x(t), h(t)$  绝对可积, 即系统是稳定的, 且傅里叶变换分别为  $X(\omega), H(\omega)$ , 则  $y(t)$  的傅里叶变换  $Y(\omega)$  满足如下等式:

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega), \quad (25)$$

其中,  $H(\omega)$  又称为线性时不变线性系统的传递函数, 传递函数与系统的冲激响应  $h(t)$  构成傅里叶变换对, 关系如下:

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-j\omega t} dt \quad (26)$$

$$H(-\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{j\omega t} dt \Rightarrow H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)dt. \quad (27)$$

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (28)$$

这样, 对于  $\{x(t)\}$  的一系列样本函数  $X(t)$ , 系统输出端就会得到一系列新的样本函数  $y(t)$ , 这些样本函数就构成随机信号集  $\{Y(t)\}$ .

# 系统输出的均值

根据 (24) 式, 输出  $\{y(t)\}$  的均值可表示为

$$\begin{aligned}
 m_Y(t) &= E\{Y(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) E\{X(t - \tau)\} d\tau \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) m_X(t - \tau) d\tau.
 \end{aligned} \tag{29}$$

当输入  $\{x(t)\}$  广义平稳时,  $m_X(t) = m_X$ , 则

$$\begin{aligned}
 m_Y(t) &= m_X \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) d\tau = m_X H(0) \\
 &= m_Y.
 \end{aligned} \tag{30}$$

可见, 此时输出均值也与时间无关。

# 系统输出的自相关函数和功率谱密度函数

根据 (24) 式, 输出  $\{Y(t)\}$  的自相关函数可表示成

$$\begin{aligned} R_Y(t_1, t_2) &= E\{Y(t_1)Y(t_2)\} \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1)h(\tau_2)E\{X(t_1 - \tau_1)X(t_2 - \tau_2)\}d\tau_1d\tau_2 \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1)h(\tau_2)R_X(t_1 - \tau_1, t_2 - \tau_2)d\tau_1d\tau_2. \quad (31) \end{aligned}$$

当输入  $\{X(t)\}$  广义平稳,  $R_X(t_1, t_2) = R_X(t_1 - t_2) = R_X(\tau)$ , 则

$$\begin{aligned} R_Y(t_1, t_2) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1)h(\tau_2)R_X(\tau - \tau_1 + \tau_2)d\tau_1d\tau_2 \\ &= R_Y(\tau). \end{aligned} \quad (32)$$

此时输出  $\{Y(t)\}$  的均方值，即平均功率为

$$\begin{aligned}
 E\{Y^2(t)\} &= R_Y(0) \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1) h(\tau_2) R_X(-\tau_1 + \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \\
 &\leq \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |h(\tau_1) h(\tau_2) R_X(-\tau_1 + \tau_2)| d\tau_1 d\tau_2 \\
 &\leq R_X(0) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |h(\tau_1) h(\tau_2)| d\tau_1 d\tau_2 \\
 &= R_X(0) \left( \int_{-\infty}^{+\infty} |h(\tau)| d\tau \right)^2 < +\infty.
 \end{aligned} \tag{33}$$

## 输出随机信号的平稳性

(30) 式、(32) 式以及上式表明：如果广义平稳随机信号  $\{x(t)\}$  通过线性时不变系统，则输出随机信号也广义平稳。

进一步，根据维纳—辛钦定理，即功率谱密度函数与自相关函数是一组傅里叶变换对，对 (32) 式两边进行傅里叶变换，可得到输出  $\{Y(t)\}$  的功率谱密度函数：

$$\begin{aligned}
 G_Y(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} R_Y(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \\
 &\stackrel{\text{式(32)}}{=} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1) h(\tau_2) R_X(\tau - \tau_1 + \tau_2) e^{-j\omega\tau} d\tau_1 d\tau_2 d\tau. \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_2) e^{-j\omega\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1) R_X(\tau + \tau_2 - \tau_1) d\tau_1 d\tau d\tau_2.
 \end{aligned}
 \tag{34}$$

定义  $R_1(t) = R_X(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_X(t - \tau_1) h(\tau_1) d\tau_1$ , 则  $R_1(t)$  的傅里叶变换为  $H(\omega)G_X(\omega)$ , 上式可进一步表示为

$$\begin{aligned}
 G_Y(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_2) \int_{-\infty}^{+\infty} R_1(\tau + \tau_2) e^{-j\omega\tau} d\tau d\tau_2 \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_2) H(\omega) G_X(\omega) e^{j\omega\tau_2} d\tau_2 \\
 &= H(-\omega)H(\omega)G_X(\omega) = |H(\omega)|^2 G_X(\omega).
 \end{aligned} \tag{35}$$

其中,  $G_X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_X(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$  为广义平稳输入  $\{x(t)\}$  的功率谱密度函数。

### 说明

广义平稳随机信号通过线性时不变系统, 输出功率谱密度等于输入功率谱密度乘以系统传递函数模的平方。可见, 输出功率谱密度只与系统的幅频特性有关, 与系统的相频特性无关。



根据 (24) 式, 输入  $\{X(t)\}$  与输出  $\{Y(t)\}$  之间的互相关函数  $R_{XY}(t_1, t_2)$  和  $R_{YX}(t_1, t_2)$  可表示为

### $R_{XY}$ 和 $R_{YX}$ 的互相关函数

$$\begin{aligned}
 R_{XY}(t_1, t_2) &= E\{X(t_1) Y(t_2)\} \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_2) E\{X(t_1) X(t_2 - \tau_2)\} d\tau_2 \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_2) R_X(t_1, t_2 - \tau_2) d\tau_2. \quad (36)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{YX}(t_1, t_2) &= E\{Y(t_1) X(t_2)\} \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1) E\{X(t_2) X(t_1 - \tau_1)\} d\tau_1 \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1) R_X(t_1 - \tau_1, t_2) d\tau_1. \quad (37)
 \end{aligned}$$

## 广义平稳过程的 $R_{XY}$ 和 $R_{YX}$

当输入  $\{x(t)\}$  广义平稳，自相关函数  $R_X(t_1, t_2) = R_X(t_1 - t_2)$ ,  $R_X(t_1, t_2) = R_X(t_2 - t_1) = R_X(\tau)$ , 则

$$\begin{aligned}
 R_{XY}(t_1, t_2) &\stackrel{(36)}{=} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_2) R_X(\tau + \tau_2) d\tau_2 \\
 &= R_{XY}(\tau).
 \end{aligned} \tag{38}$$

$$\begin{aligned}
 R_{YX}(t_1, t_2) &\stackrel{(37)}{=} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1) R_X(\tau - \tau_1) d\tau_1 \\
 &= R_{YX}(\tau) = R_{XY}(-\tau).
 \end{aligned} \tag{39}$$

## 结论

广义平稳随机信号通过线性时不变系统，其输入与输出联合广义平稳。

# 等式两边进行傅里叶变换

## 输入与输出之间的互功率谱密度函数

$$\begin{aligned}
 G_{XY}(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} R_{XY}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \\
 &\stackrel{(38)}{=} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_2) R_X(\tau + \tau_2) e^{-j\omega\tau} d\tau_2 d\tau \\
 &= H(-\omega) G_X(\omega).
 \end{aligned} \tag{40}$$

$$\begin{aligned}
 G_{YX}(\omega) &\stackrel{(39)}{=} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{YX}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1) R_X(\tau - \tau_1) e^{-j\omega\tau} d\tau_1 d\tau \\
 &= H(\omega) G_X(\omega).
 \end{aligned} \tag{41}$$

## 输出 $Y$ 的功率谱 $G_Y(\omega)$

结合 (35) 式，有如下关系式成立：

$$\begin{aligned}
 G_Y(\omega) &= H(-\omega)H(\omega)G_X(\omega) \\
 &= H(\omega)G_{XY}(\omega) \\
 &= H(-\omega)G_{YX}(\omega).
 \end{aligned} \tag{42}$$

## 结论

综上所述，当广义平稳随机信号  $\{X(t)\}$  通过线性时不变系统，系统输出广义平稳，且输出与输入联合广义平稳。

可以得出输出以及输入、输出之间的统计关系，如图 3 所示。

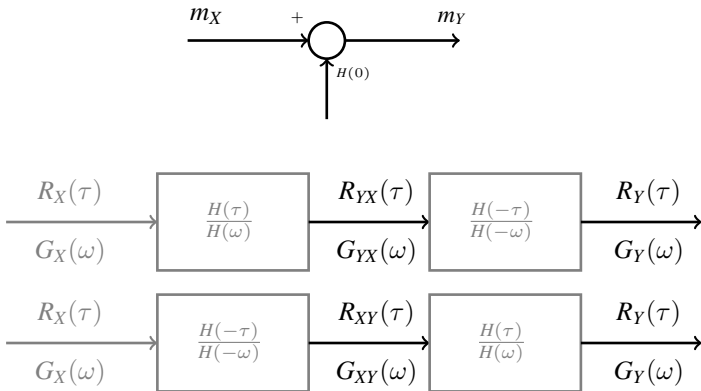


图 3: 广义平稳随机信号通过线性时不变系统示意图

# 广义平稳随机信号通过物理可实现的线性时不变系统

上述分析虽然基于物理不可实现的线性时不变系统，但是当广义平稳随机信号通过物理可实现的线性时不变系统时，相关结论仍然成立，只是此时  $h(t) = 0, t < 0$ .

当系统输入  $\{X(t)\}$  只从  $t = 0$  时刻开始加入, 即  $x(t) = 0, t < 0$  结论就有所不同了。

## 系统输出情形

(1) 输入  $\{X(t)\}$  广义平稳, 但输出  $\{Y(t)\}$  的均值不再是常数, 这种条件下的系统输出不再是平稳的。

## 输出 $\{Y(t)\}$ 的均值

$$\begin{aligned}
 m_Y(t) &= E\{Y(t)\} = \int_{-\infty}^t h(\tau) E\{X(t - \tau)\} d\tau \\
 &= m_X \int_{-\infty}^t h(\tau) d\tau.
 \end{aligned} \tag{43}$$

## 输出 $\{Y(t)\}$ 的相关函数

$$\begin{aligned}
 R_Y(t_1, t_2) &= E\{Y(t_1) Y(t_2)\} \\
 &= \int_{-\infty}^{t_1} \int_{-\infty}^{t_2} h(\tau_1) h(\tau_2) E\{X(t_1 - \tau_1) X(t_2 - \tau_2)\} d\tau_1 d\tau_2 \\
 &= \int_{-\infty}^{t_1} \int_{-\infty}^{t_2} h(\tau_1) h(\tau_2) R_X(\tau - \tau_1 + \tau_2) d\tau_1 d\tau_2. \tag{44}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{XY}(t_1, t_2) &= \int_{-\infty}^{t_2} h(\tau_2) |y(t_2) \\
 &= \int_{-\infty}^{t_2} h(\tau_2) E\{X(t_1) X(t_2 - \tau_2)\} d\tau_2 \\
 &= \int_{-\infty}^{t_2} h(\tau_2) R_X(\tau + \tau_2) d\tau_2.
 \end{aligned} \tag{45}$$

$$\begin{aligned}
 R_{YX}(t_1, t_2) &= E\{X(t_2) Y(t_1)\} = \int_{-\infty}^{t_2} h(\tau_1) E\{X(t_2) x(t_1 - \tau_1)\} d\tau_1 \\
 &= \int_{2\pi}^{t_1} h(\tau_1) R_X(\tau - \tau_1) d\tau_1.
 \end{aligned} \tag{46}$$

根据上述公式，尽管输入  $\{X(t)\}$  广义平稳，但输出  $\{Y(t)\}$  的均值不再是常数，而与时间  $t$  有关，且自相关函数跟时间差值  $T$  以及时间  $t_1$  和  $t_2$  都有关，说明系统输出不再是平稳的。



# 宽平稳随机过程下的输入输出

## (2) 输入 $X(t)Y(t)$ 宽平稳

若输入  $X(t)$  是宽平稳的, 则系统输出  $Y(t)$  也是宽平稳的, 且输入与输出联合平稳。

### $X(t)$ 宽平稳条件下

$$\begin{cases} E[X(t)] = m_X(\text{常数}) \\ R_X(t_1, t_2) = R_X(\tau), \quad \tau = t_2 - t_1 \\ R_X(0) = E[X^2(t)] < \infty \end{cases} \quad (47)$$

## 时域分析的结果

$$\begin{aligned}
 E[Y(t)] &= \int_0^{\infty} h(\tau) E[X(t - \tau)] d\tau \\
 &= m_X \int_0^{\infty} h(\tau) d\tau = m_Y.
 \end{aligned} \tag{48}$$

$$R_{XY}(t_1, t_2) = \int_0^{\infty} h(u) R_X(\tau - u) du = R_X(\tau) * h(\tau) = R_{XY}(\tau). \tag{49}$$

$$R_{YX}(t_1, t_2) = \int_0^{\infty} h(u) R_X(\tau + u) du = R_X(\tau) * h(-\tau) = R_{YX}(\tau). \tag{50}$$

$$\begin{aligned}
 R_Y(t_1, t_2) &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} h(u) h(v) R_X(t_2 - t_1 - v + u) du dv \\
 &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} h(u) h(v) R_X(\tau - v + u) du dv
 \end{aligned}$$

# 宽平稳的随机过程

## 系统输出的均方值

$$\begin{aligned}
 E[Y^2(t)] &= \left| E[Y^2(t)] \right| \\
 &= \left| \int_0^\infty \int_0^\infty h(u)h(v)R_X(u-v)dudv \right| \\
 &\leq \int_0^\infty \int_0^\infty |h(u)||h(v)||R_X(u-v)|dudv \quad (52) \\
 &\leq R_X(0) \int_0^\infty \int_0^\infty |h(u)||h(v)|dudv \\
 &= R_X(0) \int_0^\infty |h(u)|du \cdot \int_0^\infty |h(v)|dv
 \end{aligned}$$

## 系统下的结论

如果系统是稳定的, 则由  $\int_0^\infty |h(\tau)| d\tau < \infty$ , 可推出

$$|E[Y^2(t)]| < \infty \quad (53)$$

## 由(48) (51)和 (53)得出的结论

① 由 (48), (51)和 (53), 可证, 输出  $Y(t)$  是宽平稳过程。

## 由(49) (50)得出的结论

② 由 (49) 或 (50) 可证, 输入与输出之间是联合宽平稳的。

# 宽平稳过程的卷积形式表示

## 卷积形式表示宽平稳过程

$$R_{XY}(\tau) = R_X(\tau) * h(\tau) \quad (54)$$

$$R_{YX}(\tau) = R_X(\tau) * h(-\tau) \quad (55)$$

$$\begin{aligned} R_Y(\tau) &= R_X(\tau) * h(-\tau) \\ &= R_{XY}(\tau) * h(-\tau) \\ &= R_{YX}(\tau) * h(\tau). \end{aligned} \quad (56)$$

# 严平稳的随机过程过线性时不变系统

3) 输入  $X(t)$  严平稳输出  $Y(t)$  严平稳

证: 因为是线性时不变系统, 对于任何时移  $\tau$ , 都有

$$Y(t + \tau) = L[X(t + \tau)] \quad (57)$$

成立。算子作用后的输出  $Y(t+\tau)$  和输入  $X(t+\tau)$  之间的关系与  $Y(t)$ ,  $X(t)$  之间的是完全一样的。当  $X(t+\tau)$  与  $X(t)$  具有相同的概率密度函数时,  $Y(t+\tau)$  与  $Y(t)$  也具有相同概率密度函数。

## 输出的严平稳

输出  $Y(t)$  严平稳。

# 宽各态历经过程线性时不变系统——输入输出特性

(4) 输入  $X(t)$  宽各态历经输出  $Y(t)$  宽各态历经

证: 由随机过程的宽各态历经定义, 输入  $X(t)$  满足条件

$$\overline{X(t)} = m_X; \overline{X(t)X(t+\tau)} = R_X(\tau). \quad (58)$$

输出  $Y(t)$  的时间平均:  $\overline{Y(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T Y(t) dt$

$$\begin{aligned}
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \left[ \int_0^\infty h(u) X(t-u) du \right] dt \\
 &= \int_0^\infty \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t-u) dt \right] h(u) du \\
 &= \int_0^\infty m_X h(u) du = m_Y.
 \end{aligned}$$

# 宽各态历经的随机过程过线性是不变系统

$$\begin{aligned}
 \overline{Y(t)Y(t+\tau)} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T Y(t)Y(t+\tau)dt \\
 &= \int_0^\infty \int_0^\infty h(u)h(v) \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \right. \\
 &\quad \left. \cdot \int_{-T}^T X(t-u)X(t+\tau-v)dt \right] dudv \\
 &= \int_0^\infty \int_0^\infty h(u)h(v)R_X(\tau+u-v)dudv \\
 &= R_Y(\tau),
 \end{aligned}
 \tag{60}$$

故  $Y(t)$  是宽各态历经的。



# 举例

## 例 .1

低通  $RC$  电路有由电源  $X(t)$ , 电阻  $R$  和电容  $C$  组成, 已知输入信号  $X(t)$  是宽平稳的双侧信号, 其均值为  $m_X$ , 求输出均值。



解: 由电路知, 此系统的冲激响应为  $h(t) = be^{-bt}U(t)$ , 其中  $b = 1/RC$ , 输出均值为

$$\begin{aligned}
 m_Y &= m_X \int_0^{\infty} be^{-bu} du \\
 &= -m_X e^{-bu} \Big|_0^{\infty} \\
 &= m_X.
 \end{aligned}
 \tag{61}$$

## 例 2

若上例中输入自相关函数  $X(t)$  是自相关函数为  $\frac{N_0}{2}\delta(\tau)$  的白噪声, ① 求输出的自相关函数  $R_Y(\tau)$ , ② 输出的平均功率  $E[Y^2(t)]$ , ③ 输入与输出间的互相关函数  $R_{XY}(\tau)$  和  $R_{YX}(\tau)$ 。

解, ①, 由题意知  $R_X(\tau) = \frac{N_0}{2}\delta(\tau)$ , 则输出自相关函数  $R_Y(\tau)$  为

$$\begin{aligned}
 R_Y(\tau) &= E[Y(t_1)Y(t_2)] = E\left[\int_{-\infty}^{\infty} h(u) \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(v)X(t_1 - u)X(t_2 - v)dv\right] du\right] \\
 &= \int_0^{\infty} h(u) \int_0^{\infty} h(v)E[X(t_1 - u)X(t_2 - v)]dvdu \\
 &= \int_0^{\infty} h(u)h(v)R_X(t_1, t_2)dvdu
 \end{aligned}$$

(62)

$$\begin{aligned}
 R_Y(\tau) &= \int_0^\infty h(u) \left[ \int_0^\infty \frac{N_0}{2} \delta(\tau + u - v) h(v) dv \right] du \\
 &= \frac{N_0}{2} \int_0^\infty h(u) h(\tau + u) du,
 \end{aligned} \tag{63}$$

式(63)说明当输入是白噪声时, 输出信号的自相关函数  $R_Y(\tau)$  正比于系统冲激响应的卷积:

$$R_Y(\tau) = \frac{N_0}{2} \int_0^\infty (be^{-bu}) U(u) (be^{-b(\tau+u)}) U(\tau + u) du \tag{64}$$

上式分别按  $\tau \geq 0$  与  $\tau < 0$  两种情况求解。

## ① 当 $\tau \geq 0$ 时的结论

$$\begin{aligned}
 R_Y(\tau) &= \frac{N_0 b^2}{2} e^{-b\tau} \int_0^{\infty} e^{-2bu} du \\
 &= \frac{N_0 b}{4} e^{-b\tau}.
 \end{aligned} \tag{65}$$

## ② 当 $\tau < 0$ 时的结论

由自相关函数的偶对称性，得到输出的自相关函数

$$R_Y(\tau) = R_Y(-\tau) = \frac{N_0 b}{4} e^{b\tau}. \tag{66}$$

合并  $\tau \geq 0$  与  $\tau < 0$  时的结果, 得到输出的自相关函数  $R_Y(\tau)$ :

$$R_Y(\tau) = \frac{N_0 b}{4} e^{-b|\tau|}, \quad |\tau| < \infty. \quad (67)$$

③ 在上式中令  $\tau = 0$ , 即可得输出的平均功率为

$$E[Y^2(t)] = R_Y(0) = \frac{bN_0}{4} \quad (68)$$

由于  $b$  是时间常数  $RC$  的倒数, 即  $b = 1/(RC)$ , 因此也与电路的带宽  $\Delta\omega$  有关, 其中

$$\Delta\omega = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{b}{2\pi} \quad (69)$$

于是输出平均功率  $R_{XY}(\tau)$  又可写成

$$E[Y^2(t)] = \frac{\pi N_0}{2} \Delta\omega, \quad (70)$$

由此可见, 该电路的输出平均功率随着电路的带宽变宽而线性地增大。

④ 输入和输出的互相关函数  $R_{XY}(\tau)$  为

$$\begin{aligned} R_{XY}(\tau) &= \int_0^\infty \frac{N_0}{2} \delta(\tau - u) h(u) du \\ &= \frac{N_0}{2} h(\tau) * U(\tau) = \begin{cases} \frac{N_0}{2} h(\tau), & \tau \geq 0 \\ 0, & \tau < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (71)$$

$$\begin{aligned} R_{YX}(\tau) &= \int_0^\infty \frac{N_0}{2} \delta(\tau + u) h(u) du \\ &= \frac{N_0}{2} h(-\tau) * U(-\tau) = \begin{cases} 0 & \tau > 0 \\ \frac{N_0}{2} h(-\tau) & \tau \leq 0 \end{cases} \quad \text{同理} \end{aligned} \quad (72)$$

### 例 3

在例 71 中, 假设  $X(t)$  的自相关函数为  $R_X(\tau) = \frac{\beta N_0}{4} e^{-\beta|\tau|}$ , 式中  $\beta \neq b$ , 求输出的自相关函数  $R_Y(\tau)$ 。

$$\begin{aligned}
 R_Y(\tau) &= E[Y(t_1)Y(t_2)] = E\left[\int_{-\infty}^{\infty} h(u) \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(v)X(t_1 - u)X(t_2 - v)dv\right] du\right] \\
 &= \int_0^{\infty} h(u) \int_0^{\infty} h(v)E[X(t_1 - u)X(t_2 - v)]dvdu \\
 &= \int_0^{\infty} h(u)h(v)R_X(t_1, t_2)dvdu
 \end{aligned}$$

(73)

$$R_Y(\tau) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} R_X(\tau + u - v)h(u)h(v)dudv$$

② 当  $\tau > 0$  时, 考虑到  $u, v$  均在 0 和  $\infty$  之间变化, 故先对  $v$  积分较方便。

$$\begin{aligned}
 R_Y(\tau) &= \frac{\beta N_0 b^2}{4} \int_0^\infty e^{-bu} \left[ \int_0^{\tau+u} e^{-\beta(\tau+u-v)} e^{-bv} dv \right. \\
 &\quad \left. + \int_{\tau+u}^\infty e^{\beta(\tau+u-v)} e^{-bv} dv \right] du \quad (75) \\
 &= \frac{\beta N_0 b^2}{4(b^2 - \beta^2)} \left( e^{-\beta\tau} - \frac{\beta}{b} e^{-b\tau} \right), \quad \tau \geq 0
 \end{aligned}$$



## 自相关函数的性质

自相关函数为  $\tau$  的偶函数,

所以  $\tau < 0$  时的  $R_Y(\tau)$  表达式能直接由  $R_Y(-\tau)$  时的表达写出。

综合上面的讨论后的最终结果

$$R_Y(\tau) = \frac{b^2 \beta N_0}{4(b^2 - \beta^2)} \left( e^{-\beta|\tau|} - \frac{\beta}{b} e^{-b|\tau|} \right) \quad (76)$$

上式可写为

$$R_Y(\tau) = \left( \frac{bN_0}{4} e^{-b|\tau|} \right) \cdot \left\{ \left[ \frac{1}{1 - b^2/\beta^2} \right] \left[ 1 - \frac{b}{\beta} e^{-(\beta-b)|\tau|} \right] \right\}, \quad (77)$$

## 输出的严平稳

- 式中的第一项因子是白噪声输入时系统输出的自相关函数,
- 第二项因子是当非白声输入时系统输出的自相关函数附加的相乘因子。

显然, 当  $\beta/b \rightarrow \infty$  时, 有

$$\lim_{\beta \rightarrow \infty} R_Y(\tau) = \frac{bN_0}{4} e^{-b|\tau|}, \quad (78)$$

关于  $Y$  的自相关函数  $R_Y(\tau)$  趋近于第一项因子。

由此可知, 当  $\beta$  较  $b$  大很多时, 第二项因子接近于 1,  $R_Y(\tau)$  趋近于第一项因子—白噪声输入时系统输出的自相关函数。

由于  $\beta$  正比于输入信号的带宽  $b$ , 正比于系统的带宽, 因此上面讨论指出: 在输入信号的带宽远大于系统带宽的情况下, 分析系统输出的统计特性时, 可利用白噪声来近似输入的随机信号。这既可以节省工作量, 又不会使精度降低太多。

### 高增益宽带放大器中的热噪声

在带宽为 10MHz 的高增益宽带放大器中, 最重要的噪声来源是第一级的热噪声, 这种热噪声的带宽可以到 1000Hz, 因此, 若取  $b/\beta$  为 0.01, 那么用白噪声近似热噪声时, 其误差不超过 1%。

# 系统输出的概率密度

## 随机信号通过线性时不变系统后的高级统计特性

仅从系统输出的均值、相关函数及相应的功率谱密度分析了随机信号通过线性时不变系统后的统计特性，但若希望知道更多的统计特性，就需要知道系统输出的概率密度函数。

根据系统输出与输入的积分关系 (24) 式，可将其写成求和的形式，便于分析：

$$\begin{aligned} y(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau \\ &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} h(\tau_i)x(t-\tau_i)\Delta\tau_i, \end{aligned} \quad (79)$$

其中  $\Delta\tau_i = \tau_{i+1} - \tau_i$  足够小。可见，系统输出是输入的线性组合。

## 计算线性系统输出的概率密度函数

利用随机变量的线性变换的概率密度函数与随机变量的概率密度函数之间的关系, 即相差一个雅可比列式系数, 就可计算出线性系统输出的概率密度函数。

## 计算线性系统输出再高斯信号下的概率密度函数

如果系统输入是高斯信号, 由于高斯变量的线性组合仍然是高斯变量, 系统输出也是高斯信号。

## 计算高斯信号下的任意维概率密度函数

描述高斯信号的分布特性则比较简单, 此时只需要计算出系统输出的均值和相应的相关函数, 就可得到任意维的概率密度函数。

# 目录

- 1 信号与系统概述
  - 系统及其分类
  - 线性时不变系统
- 2 随机信号过线性时不变系统
  - 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数
  - 线性时不变系统输入输出的宽各态历经
- 3 随机序列过线性时不变系统
  - 系统输出的自相关函数和功率谱密度函数
  - 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数
- 4 白噪声过线性时不变系统
  - 色噪声白化的方法
  - 白噪声通过理想带通系统
- 5 平稳序列的参数模型
  - 自回归模型
  - 随机信号通过线性时变系统 \*

# 随机序列过线性时不变系统

研究随机序列通过线性时不变系统，分析输出统计特性的方法与上节中讨论连续随机信号的方法类似。

随机序列  $\{X(n)\}$  通过一个冲激响应为  $h(n)$  的离散线性时不变系统，输出为随机序列  $\{Y(n)\}$ 。

由于随机序列  $\{X(n)\}$  同样可以看作是大样本序列的集合，每个样本序列  $X(n)$  对应每次试验的结果，均为确定的时间序列。

## 时不变系统下的卷积关系

当样本序列  $x(n)$  通过时不变线性系统时，其输出  $y(n)$  与输入  $x(n)$  之间存在如下卷积关系：

$$y(n) = x(n) * h(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h(k)x(n-k). \quad (80)$$

如果  $X(n), h(n)$  绝对可和，且傅里叶变换分别为  $X(\Omega), H(\Omega)$ ，则  $y(n)$  的傅里叶变换  $Y(\Omega)$  满足如下等式：

$$Y(\Omega) = H(\Omega)X(\Omega). \quad (81)$$

其中，系统传递函数  $H(\Omega)$  与冲激响应  $h(n)$  构成傅里叶变换对。



## 傅里叶变换对

$$H(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(n)e^{-j\Omega n}. \quad (82)$$

$$h(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(\Omega)e^{j\Omega n} d\Omega. \quad (83)$$

对于  $\{X(t)\}$  的一系列样本序列  $x(n)$ , 系统输出端就会得到一系列新的样本序列  $Y(n)$ , 这些样本序列就构成随机序列  $\{Y(t)\}$ .

此外, 在 (80) 式中, 当系统是物理可实现的线性时不变系统时,  $h(k) = 0, (k < 0)$ .

# 系统输出的均值

$$\begin{aligned}
 m_Y(n) &= E\{Y(n)\} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h(k)E\{X(n-k)\} \\
 &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h(k)m_X(n-k).
 \end{aligned} \tag{84}$$

当输入位  $\{X(n)\}$  广义平稳,  $m_X(n) = m_X$ , 则

$$\begin{aligned}
 m_Y(n) &= m_X \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h(k) \\
 &= m_X H(0) \\
 &= m_Y.
 \end{aligned} \tag{85}$$

此时输出均值与时间无关。

$$\begin{aligned}
 R_Y(n_1, n_2) &= E\{Y(n_1)Y(n_2)\} \\
 &= \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} h(k_1)h(k_2)E\{X(n_1-k_1)X(n_2-k_2)\} \\
 &= \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} h(k_1)h(k_2)R_X(n_1-k_1, n_2-k_2).
 \end{aligned}
 \tag{86}$$

当输入  $\{X(t)\}$  广义平稳，则

$$\begin{aligned}
 R_Y(n_1, n_2) &= \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} h(k_1)h(k_2)R_X(m-k_1+k_2) \\
 &= R_Y(m).
 \end{aligned}
 \tag{87}$$

输出的均方值，即平均功率  $E\{Y^2(n)\}$  为

$$\begin{aligned}
 E\{Y^2(n)\} &= R_Y(0) = \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} h(k_1) h(k_2) R_X(-k_1 + k_2) \\
 &\leq \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} |h(k_1) h(k_2) R_X(-k_1 + k_2)| \\
 &\leq R_X(0) \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} |h(k_1) h(k_2)| \\
 &= R_X(0) \left( \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} |h(k_1)| \right)^2 < +\infty.
 \end{aligned} \tag{88}$$

由 (85) 式及上面两式，我们可得如下结论：

当广义平稳随机序列为  $\{X(t)\}$ ，从  $t_0$  时刻开始就加入到线性时不变系统，其输出随机序列也广义平稳；同样，利用维纳——辛钦公式，即功率谱密度函数与自相关函数是一组傅里叶变换对；

对上式两边进行傅里叶变换，可得输出  $\{Y(t)\}$  的功率谱密度函数

$$\begin{aligned}
 G_Y(\Omega) &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} R_Y(m) e^{-j\Omega m} \\
 &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} h(k_1) h(k_2) R_X(m - k_1 + k_2) e^{-j\Omega m} \\
 &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} h(k_2) e^{-j\Omega m} \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} h(k_1) R_X(m + k_2 - k_1) .
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G_Y(\Omega) &= \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} h(k_2) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e^{-j\Omega m} R_1(m+k_2) \\
 &= \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} h(k_2) H(\Omega) G_X(\Omega) e^{jk_2\Omega} \\
 &= H(\Omega) G_X(\Omega) H(-\Omega) \\
 &= |H(\Omega)|^2 G_X(\Omega).
 \end{aligned} \tag{89}$$

其中  $R_X(n) = R_X(n) * h(n)$ ,  $G_X(\Omega) = \sum_{j=1}^{+\infty} R_X(m) e^{-j\Omega m}$  为广义平稳输入  $\{X(t)\}$  的功率谱密度函数。可见，输出功率谱密度有如下特性：

只与系统的幅频特性有关，而与系统的相频特性无关。

目录	信号与系统概述	随机信号过线性时不变系统	随机序列过线性时不变系统	白噪声过线性时不变系统	平稳序列的参数模型
○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○ ○○○○○ ●○○○○	○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○ ○○○○○○○ ○○○

# 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数

$$\begin{aligned}
 R_{XY}(n_1, n_2) &= E\{X(n_1)Y(n_2)\} \\
 &= \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} h(k_2) E\{X(n_1)X(n_2 - k_2)\} \\
 &= \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} h(k_2) R_X(n_1, n_2 - k_2). \tag{90}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{YX}(n_1, n_2) &= E\{Y(n_1)X(n_2)\} \\
 &= \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} h(k_1) E\{Y(n_2)X(n_1 - k_1)\} \\
 &= \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} h(k_1) R_X(n_1 - k_1, n_2). \tag{91}
 \end{aligned}$$

当输入  $\{X(t)\}$  广义平稳，则

$$\begin{aligned}
 R_{XY}(n_1, n_2) &= \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} h(k_2) R_X(m + k_2) \\
 &= R_{XY}(m) R_{YX}(n_1, n_2) \\
 &= \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} h(k_1) R_X(m - k_1) \\
 &= R_{YX}(m) \\
 &= R_{XY}(-m).
 \end{aligned} \tag{92}$$



# 随机序列在输入与输出之间的互功率谱密度函数

对以上等式两边进行傅里叶变换，可得输入与输出之间的互功率谱密度函数

$$\begin{aligned}
 G_{XY}(\Omega) &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} R_{XY}(m) e^{-j\Omega m} \\
 &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{+\infty} h(k_2) R_X(m+k_2) e^{-j\Omega m} \\
 &= H(-\Omega) G_X(\Omega)
 \end{aligned} \tag{93}$$

$$\begin{aligned}
 S_{YX^*}(\Omega) &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} R_{YX}(m) e^{-j\Omega m} \\
 &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{k_1=-\infty}^{+\infty} h(k_1) R_X(m-k_1) e^{-j\Omega m} \\
 &= H(\Omega) G_X(\Omega).
 \end{aligned} \tag{94}$$

结合 (89) 式，有如下关系式：

$$\begin{aligned}
 G_Y(\Omega) &= H(-\Omega)H(\Omega)G_X(\Omega) \\
 &= H(-\Omega)G_{YX}(\Omega) \\
 &= H(\Omega)G_{XY^*}(\Omega).
 \end{aligned} \tag{95}$$

广义平稳随机序列下的线性时不变系统具有的特性

综上，我们可以得到与连续随机信号相类似的结论：当广义平稳随机序列位  $X(n)$  从  $-\infty$  时刻开始，将其加入到线性时不变系统，则系统输出广义平稳，且输出与输入联合广义平稳。

系统输出以及系统输入、输出之间的统计关系也可参照图 7 所示。

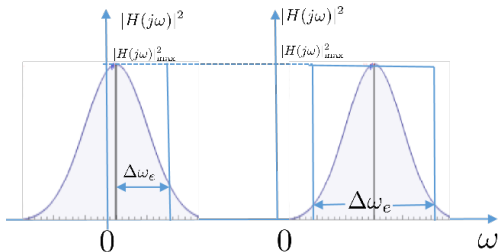


图 4: 广义平稳随机信号通过线性时不变系统示意图

广义平稳随机序列下的物理可实现线性时不变系统具有的特性

但是，如果广义平稳随机序列  $\{X(n)\}$  是从  $n = 0$  时刻开始加入系统，即  $x(n) = 0, n < 0$ ，此时系统输出不再平稳。

目录	信号与系统概述	随机信号过线性时不变系统	随机序列过线性时不变系统	白噪声过线性时不变系统	平稳序列的参数模型
○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○	●○○○○○○○○○○	○○○○○○
	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○○○	○○○○	○○○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○
	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○	○○○○○○○	○○○

# 目录

- 1 信号与系统概述
  - 系统及其分类
  - 线性时不变系统
- 2 随机信号过线性时不变系统
  - 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数
  - 线性时不变系统输入输出的宽各态历经
- 3 随机序列过线性时不变系统
  - 系统输出的自相关函数和功率谱密度函数
  - 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数
- 4 白噪声过线性时不变系统
  - 色噪声白化的方法
  - 白噪声通过理想带通系统
- 5 平稳序列的参数模型
  - 自回归模型
  - 随机信号通过线性时变系统 \*

# 色噪声的产生与白化滤波器

下面讨论在理论和实际应用中具有重要意义的两个问题。

其一, 如何设计一个线性系统, 使其输入为白噪声时, 能输出具有指定功率谱密度的色噪声;

其二, 如何设计一个线性系统, 使其在输入为色噪声时, 能输出白噪声。

# 色噪声和白噪声的产生

如图 5 所示

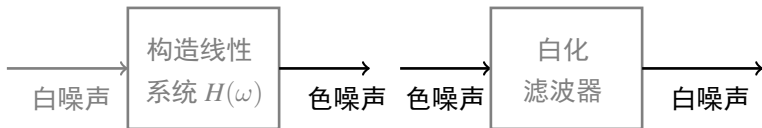


图 5: 色噪声的产生和白化滤波器

# 色噪声的产生

当具有单位功率谱密度的白噪声通过一个传递函数为  $|H(\omega)|$  的线性系统后，其输出的功率谱密度为

$$G_Y(\omega) = |H(\omega)|^2 \cdot 1, \quad (96)$$

## 上式表明的结果

白噪声通过任一线性系统后，由于输出的功率谱密度取决于系统的功率传递函数  $|H(\omega)|^2$ ，所以输出的功率谱密度不再是常数，即不再是白噪声。





为了便于讨论，将传递函数用复频率来表示，以  $s$  代替  $H(\omega)$  中的  $j\omega$ ，以  $-s^2$  代替  $G_X(\omega)$  中的  $\omega^2$ ，则有

$$G_Y(s) = H(s)H(-s) \quad (98)$$

因此，我们可以利用白噪声源和线性系统产生具有指定功率谱密度的色噪声，方法如下

$$G_Y(s) = \tilde{G}_Y(s)\tilde{G}_Y(-s) \quad (99)$$

② 根据物理可实现稳定系统的条件，在  $\tilde{G}_Y(s)$  和  $\tilde{G}_Y(-s)$  中选择满足所有极点都位于  $S$  左半平面 (不包含虚轴) 的一个为  $H(s)$ 。

### 例 .1

设计一稳定的线性系统, 使其在具有单位的白噪声激励下的输出功率谱为

$$G_Y(\omega) = \frac{25\omega^2 + 49}{\omega^4 + 10\omega^2 + 9}. \quad (100)$$

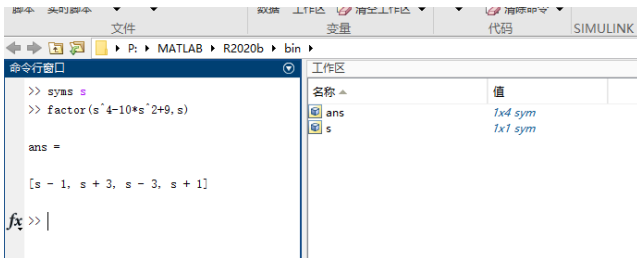


解:  $G_Y(\omega)$  的复频域表达式为

$$G_Y(s) = \frac{49 - 25s^2}{s^4 - 10s^2 + 9}. \quad (101)$$

将  $G_Y(\omega)$  进行谱分解

$$\begin{aligned} G_Y(s) &= \frac{(7 + 5s)(7 - 5s)}{(1 - s^2)(9 - s^2)} \\ &= \frac{(7 + 5s)(7 - 5s)}{(1 + s)(1 - s)(3 + s)(3 - s)}. \end{aligned} \quad (102)$$



令

$$\tilde{G}_Y(s) = \frac{(5s+7)}{(s+1)(s+3)}, \quad \tilde{G}_Y(-s) = \frac{-(5s-7)}{(s-1)(s-3)} \quad (103)$$

因  $\tilde{G}_Y(s)$  位于  $S$  平面的所有极点  $s_1 = -1, s_2 = -3$  均在左半平面, 所以选  $\tilde{G}_Y(s)$  为  $H(s)$ , 即

$$H(s) = \tilde{G}_Y(s) = \frac{(5s+7)}{(s+1)(s+3)}, \quad (104)$$

所设计系统的传递函数  $H(\omega)$  为

$$H(\omega) = \frac{(5j\omega+7)}{(j\omega+1)(j\omega+3)}. \quad (105)$$



## 色噪声白化的方法

① 将色噪声的有理谱  $G_X(s)$  分解

若色噪声的谱密度不是有理函数来逼近

$$G_X(s) = \widetilde{G}_X(s)\widetilde{G}_X(-s). \quad (106)$$

## ② 系统的传递函数

$$H(s) = \frac{1}{\tilde{G}_X(s)} \quad \text{或} \quad H(s) = \frac{1}{\tilde{G}_X(-s)}. \quad (107)$$

条件要求:  $H(s)$  是稳定的因果系统的传递函数 (即在虚轴与右半平面无极点)。

③ 虽然输入系统的是色噪声, 但系统输出信号的功率谱密度是

$$\begin{aligned}
 G_Y(s) &= H(s)H(-s)G_X(s) \\
 &= \frac{1}{\widetilde{G}_X(s)\widetilde{G}_X(-s)} \cdot \widetilde{G}_X(s)\widetilde{G}_X(-s) \\
 &= 1.
 \end{aligned} \tag{108}$$

可见系统输出的是单位谱的白噪声。





## 线性时不变系统的传递函数

在实际应用中，为了便于对问题的分析和处理，线性时不变系统的传递函数通常用一个有限阶数的有理函数来近似表示。

## 平稳随机序列的参数模型

相应地，系统的输出序列也就可以用有限个参数来描述，该有理函数称为平稳随机序列的参数模型。

## 作用

通过建立合适的参数模型来分析平稳随机序列的方法，因其频谱分辨率高，已成为现代谱分析中的一种重要方法。

## 白噪声

白噪声是实际应用中最常遇见的一种噪声，它是一种广义平稳的随机过程。其特殊的统计特性使它在线性系统的分析应用中起着非常重要的作用。

白噪声  $\{n(t)\}$  的均值为零，功率谱密度均匀分布在无限宽的频带范围内，即

$$G_N(\omega) = \frac{N_0}{2}, \quad -\infty < \omega < +\infty \quad (110)$$

其中  $N_0$  为常数白噪声的”白”字是借用了光学中白光的概念，白光的光谱覆盖了所有可见光的频率。

不具有上述均匀功率谱的噪声称为色噪声。根据维纳-辛钦定理，我们可以进一步得到白噪声的自相关函数以及相关系数。

# 带白噪声

$$\begin{aligned}
 R_N(\tau) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G_N(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \\
 &= \frac{N_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\omega\tau} d\omega \\
 &= \frac{N_0}{2} \delta(\tau).
 \end{aligned} \tag{111}$$

$$\rho_N(\tau) = \frac{R_N(\tau)}{R_N(0)} = \begin{cases} 1, & \tau = 0 \\ 0, & \tau \neq 0 \end{cases}. \tag{112}$$

上式表明，白噪声在任意相邻时刻的取值都是不相关的，且平均功率  $R_0(0)$  无限大。

上述定义的白噪声只是一种理想化的噪声模型。

在实际中是不可能存在的, 因为实际系统的带宽总是有限的.

## 带白噪声

在实际中是不可能存在的, 因为实际系统的带宽总是有限的.

有限带宽系统中白噪声的平均功率不可能是无限大的通常情况下, 只要平稳随机过程的功率谱密度在比系统带宽大得多的频率范围内近似均匀分布, 将其视为白噪声, 通常又被称为带白噪声.

# 系统输出的一般特性及等效噪声带宽

作为一种特殊的广义平稳随机过程，白噪声通过线性时不变系统后的输出，同样具有前节中所列举的一系列统计特性。根据 (29), ..., (41) 式，得到

## 常见的几个统计特性

$$m_Y = m_n \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) d\tau = m_n H(0) = 0. \quad (113)$$

$$\begin{aligned} R_Y(\tau) &= \frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_1) h(\tau_2) \delta(\tau - \tau_1 + \tau_2) d\tau_1 d\tau_2. \\ &= \frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau_2) h(\tau + \tau_2) d\tau_2. \end{aligned} \quad (114)$$

$$G_Y(\omega) = \frac{N_0}{2} |H(\omega)|^2. \quad (115)$$

$$R_{NY}(\tau) = \frac{N_0}{2} h(-\tau) = R_{YN}(-\tau). \quad (116)$$

$$G_{NY}(\omega) = \frac{N_0}{2} H(-j\omega) = G_{YN}(-\omega). \quad (117)$$

由 (115) 式可知，白噪声通过线性时不变系统后，输出一般不再具有均匀分布的功率谱密度，而是由系统的幅频响应来决定，输出一般是色噪声。

### 输出噪声的平均功率

$$\begin{aligned} R_Y(0) &= \frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} h^2(\tau) d\tau = \frac{N_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(j\omega)|^2 d\omega \\ &= \frac{N_0}{2\pi} \int_0^{+\infty} |H(j\omega)|^2 d\omega. \end{aligned} \quad (118)$$

上式中利用了实际系统的冲激响应一般为实函数的性质。

## 等效噪声带宽

在实际应用中，为了便于计算系统的输出噪声功率，人们引入了等效噪声带宽的概念。

## 系统的等效

用一个具有矩形幅频响应的理想系统来替代实际系统，当白噪声激励这个理想系统时，输出噪声的功率谱密度在通带范围内均匀分布。

## 带宽的等效

若输出噪声的平均功率等于实际系统输出的平均功率，且理想系统  $H_e(j\omega)$  在通带范围内的幅度值等于实际系统幅频响应的最大值，则理想系统的带宽  $\Delta\omega_e$  就定义为实际系统的等效噪声带宽，如图 7。

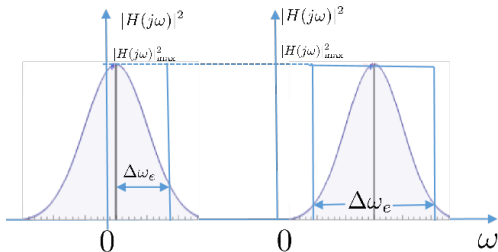


图 7: 系统的等效噪声带宽

## 输出噪声的平均功率

$$\begin{aligned}
 R_Y(0) &= \frac{N_0}{2\pi} \int_0^{+\infty} |H_e(\omega)|^2 d\omega = \frac{N_0}{2\pi} \Delta\omega_e |H(\omega)|_{\max}^2 \\
 &= \frac{N_0}{2\pi} \int_0^{+\infty} |H(j\omega)|^2 d\omega.
 \end{aligned} \tag{119}$$



解得

$$\Delta\omega_e = \frac{1}{|H(j\omega)|_{\max}^2} \int_0^{+\infty} |H(j\omega)|^2 d\omega. \quad (120)$$

### 平稳随机过程的信号建模

根据 (114) 式和 (115) 式，我们可以通过用白噪声激励一个线性时不变系统的方法，来产生具有特定二阶统计特性的平稳随机过程，这是个信号建模问题。

由于输出的功率谱密度只提供了系统的幅度信息，缺少相位信息，我们只能据此得到最小相移系统。

如果知道了平稳随机过程的二阶统计特性，将其激励一个线性时不变系统来产生一个白噪声信号，则称之为对随机过程进行预白化。

## 系统输出与输入之间的互相关函数（或互功率谱密度）

由 (116) 式和 (117) 式，我们还可以看到：系统输出与输入之间的互相关函数（或互功率谱密度）等于系统的冲激响应（或传递函数）乘上一个常数。

## 等价说法

当白噪声激励一个未知的线性时不变系统时，可以通过估计系统输出与白噪声之间的互相关函数（或互功率谱密度）来估计系统的冲激响应（或传递函数），这是一个系统辨识问题。

# 白噪声通过理想低通系统

图 8 所示为一个理想的低通系统，系统的幅频响应为

$$|H(\omega)| = \begin{cases} A, & |\omega| \leq \Delta\omega \\ 0, & |\omega| > \Delta\omega \end{cases} \quad (121)$$

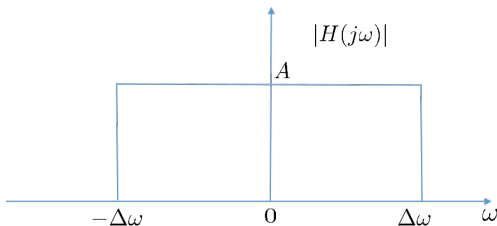


图 8: 系统的等效噪声带宽 a) 低通系统 b) 带通系统

当白噪声通过该系统，输出的功率谱密度函数和自相关函数可以分别表示

$$G_Y(\omega) = \begin{cases} \frac{N_0 A^2}{2}, & |\omega| \leq \Delta\omega \\ 0, & |\omega| > \Delta\omega \end{cases} \quad (122)$$

$$\begin{aligned} R_Y(\tau) &= \frac{N_0 A^2}{2} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\Delta\omega}^{\Delta\omega} e^{j\omega\tau} d\omega \\ &= \frac{N_0 A^2}{2\pi} \int_0^{\Delta\omega} \cos \omega\tau d\omega \\ &= \frac{N_0 A^2 \Delta\omega}{2\pi} \cdot \frac{\sin \Delta\omega\tau}{\Delta\omega\tau} \\ &= R_Y(0) \cdot \frac{\sin \Delta\omega\tau}{\Delta\omega\tau}. \end{aligned} \quad (123)$$

## 系统的等效噪声带宽

$$\begin{aligned}\Delta\omega_e &= \frac{1}{A^2} \int_0^{\Delta\omega} A^2 d\omega \\ &= \Delta\omega.\end{aligned}\tag{124}$$

此外，根据 (123) 式可以进一步得到如下结论：

### (123) 式推出的结论

- 当  $\tau = k\pi/\Delta\omega (k = \pm 1, \pm 2, \dots)$  时， $R_y(\tau) = 0$ ，即白噪声通过理想低通系统后，输出在  $\pi/\Delta\omega$  间隔上抽样得到的各个样本之间是互不相关的。

图 9 所示为一个理想的带通系统，系统的幅频响应为

$$|H(\omega)| = \begin{cases} A, & |\omega \pm \omega_0| \leq \frac{\Delta\omega}{2} \\ 0, & |\omega \pm \omega_0| > \frac{\Delta\omega}{2} \end{cases} \quad (125)$$

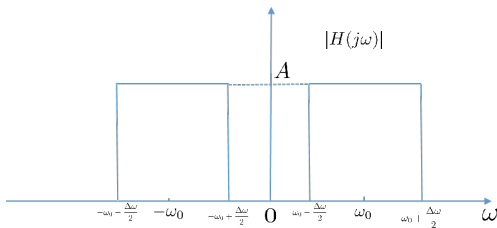


图 9: 系统的等效噪声带宽

# 白噪声通过该系统的功率谱密度函数和自相关函数

## 系统的噪声带宽

$$G_Y(\omega) = \begin{cases} \frac{N_0 A^2}{2}, & |\omega \pm \omega_0| \leq \frac{\Delta\omega}{2} \\ 0, & |\omega \pm \omega_0| > \frac{\Delta\omega}{2} \end{cases} \quad (126)$$

## 系统的自相关函数

$$\begin{aligned} R_Y(\tau) &= \frac{N_0 A^2}{2\pi} \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} \cos \omega \tau d\omega \\ &= \frac{N_0 A^2}{2\pi\tau} \sin \left( \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} \right) \tau \\ &\quad - \frac{N_0 A^2}{2\pi\tau} \sin \left( \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2} \right) \tau. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_Y(\tau) &= \frac{N_0 A^2}{\pi \tau} \sin \frac{\Delta \omega \tau}{2} \cos \omega_0 \tau \\
 &= \frac{N_0 A^2 \Delta \omega}{2\pi} \cdot \frac{\sin \frac{\Delta \omega \tau}{2}}{\frac{\Delta \omega \tau}{2}} \cos \omega_0 \tau \\
 &= R_Y(0) \cdot \frac{\sin \frac{\Delta \omega \tau}{2}}{\frac{\Delta \omega \tau}{2}} \cos \omega_0 \tau.
 \end{aligned} \tag{127}$$

### 系统的等效噪声带宽

$$\begin{aligned}
 \Delta \omega_e &= \frac{1}{A^2} \int_{\omega_0 - \frac{\Delta \omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta \omega}{2}} A^2 d\omega \\
 &= \Delta \omega.
 \end{aligned} \tag{128}$$



# 白噪声通过具有高斯频率特性的带通系统

## 多级单调谐中频放大器级联系统的幅频特性

由多级单调谐中频放大器级联构成的系统，其幅频特性近似具有高斯特性。

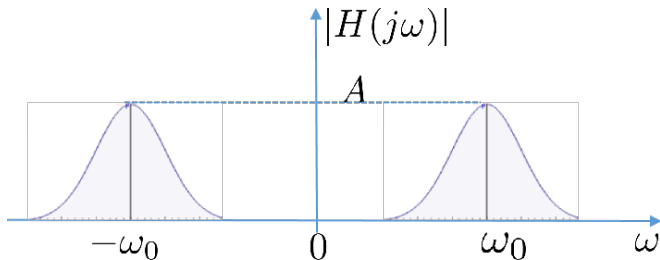


图 10: 理想的带通系统

## 系统的幅频响应

图 10 所示的是一个具有高斯频率特性的带通系统，系统的幅频响应为

$$|H(\omega)| = \begin{cases} A \exp \left[ -\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\beta^2} \right], & \omega > 0 \\ A \exp \left[ -\frac{(\omega + \omega_0)^2}{2\beta^2} \right], & \omega < 0 \end{cases} \quad (129)$$

## 输出的功率谱密度函数

当白噪声通过该系统，输出的功率谱密度函数为

$$G_Y(\omega) = \begin{cases} \frac{N_0 A^2}{2} \exp \left[ -\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\beta^2} \right], & \omega > 0 \\ \frac{N_0 A^2}{2} \exp \left[ -\frac{(\omega + \omega_0)^2}{\beta^2} \right], & \omega < 0 \end{cases} \quad (130)$$

如果将  $S_y(w)$  看作是基带信号  $S_1(\tau)$  经过上变频后的带通信号，即

$$s_1(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} N_0 A^2 \exp\left(-\frac{\omega^2}{\beta^2}\right) e^{j\omega\tau} d\omega. \quad (131)$$

此时输出的自相关函数可表示为

$$\begin{aligned} R_Y(\tau) &= s_1(\tau) \cos \omega_0 \tau \\ &= \frac{N_0 A^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{\omega^2}{\beta^2}\right) e^{j\omega\tau} d\omega \cdot \cos \omega_0 \tau. \end{aligned} \quad (132)$$

利用  $\exp(-a^2 t^2)$  和  $\frac{\sqrt{\pi}}{a} \exp\left(-\frac{\omega^2}{4a^2}\right)$  为对傅里叶变换对，则

$$\begin{aligned}
 R_Y(\tau) &= \frac{N_0 A^2}{2\pi} \beta \sqrt{\pi} \exp\left(-\frac{\beta^2 \tau^2}{4}\right) \cos \omega_0 \tau \\
 &= \frac{N_0 A^2 \beta}{2\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{\beta^2 \tau^2}{4}\right) \cos \omega_0 \tau.
 \end{aligned} \tag{133}$$

### 系统的等效噪声带宽

$$\begin{aligned}
 \Delta\omega_e &= \frac{1}{A^2} \int_0^{+\infty} A^2 \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\beta^2}\right] d\omega \\
 &= \sqrt{\pi} \beta.
 \end{aligned} \tag{134}$$

目录	信号与系统概述	随机信号过线性时不变系统	随机序列过线性时不变系统	白噪声过线性时不变系统	平稳序列的参数模型
○○○○	○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○ ○○○○ ○○○○○	○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○○○○	●○○○○○ ○○○○○○○ ○○○

# 目录

- 1 信号与系统概述
  - 系统及其分类
  - 线性时不变系统
- 2 随机信号过线性时不变系统
  - 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数
  - 线性时不变系统输入输出的宽各态历经
- 3 随机序列过线性时不变系统
  - 系统输出的自相关函数和功率谱密度函数
  - 系统输入与输出的互相关函数和互功率谱密度函数
- 4 白噪声过线性时不变系统
  - 色噪声白化的方法
  - 白噪声通过理想带通系统
- 5 平稳序列的参数模型
  - 自回归模型
  - 随机信号通过线性时变系统 \*

# 三种最常用的参数模型。

## 有限阶数的离散线性时不变系统

$$H(\Omega) = \frac{1 + \sum_{k=1}^q b_k e^{-j\Omega k}}{1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-i\Omega k}} = \frac{\sum_{k=0}^q b_k e^{-iak}}{\sum_{k=0}^p a_k e^{ink}}, \quad (135)$$

其中  $a_0 = b_0 = 1$ , 其他参数由输出序列  $\{y(n)\}$  的二阶统计特性 (自相关函数或者功率谱函数) 决定。

## 平稳随机序列的参数模型

平稳随机  
序列的参  
数模型





# 自回归滑动平均模型

如果系数  $a_1, \dots, a_p$  和  $b_1, \dots, b_q$  不全为零, 且  $a_p \neq 0, b_q \neq 0$  时, 此时系统存在零点也存在极点。

当白噪声序列  $\{W(n)\}$  激励上述系统后, 系统输出序列  $\{Y(n)\}$  与输入  $\{W(n)\}$  之间的关系可由如下差分方程表示

$$\begin{aligned}
 y(n) = & -a_1y(n-1) - a_2y(n-2) - \dots - a_py(n-p) \\
 & + w(n) + b_1w(n-1) + b_2w(n-2) \\
 & + \dots + b_qw(n-q)
 \end{aligned} \tag{137}$$

$$= \sum_{k=0}^q b_k w(n-k) - \sum_{k=1}^p a_k y(n-k).$$



# ARMA

称为平稳随机序列  $\{Y(n)\}$  的  $p$  阶自回归  $q$  阶滑动平均模型 (ARMA). 由该模型表征的平稳随机序列  $\{Y(n)\}$ , 也即系统输出的功率谱密度函数和自相关函数分别为

$$G_Y(\Omega) = \sigma_w^2 \frac{|\sum_{k=0}^q b_k e^{-i\Omega k}|^2}{|\sum_{k=0}^p a_k e^{-i\Omega k}|^2}. \quad (138)$$

$$\begin{aligned} R_Y(m) &= R_Y(n_1 - n_2) = E \left\{ Y(n_2) \left[ \sum_{k=0}^q b_k w(n_1 - k) - \sum_{k=1}^p a_k Y(n_1 - k) \right] \right\} \\ &= \sum_{k=0}^q b_k R_{wy}(m - k) - \sum_{k=1}^p a_k R_Y(m - k) \\ &= \sum_{k=0}^q b_k \sigma_w^2 h(k - m) - \sum_{k=1}^p a_k R_Y(m - k). \end{aligned} \quad (139)$$

上式利用了 4 节中的结论

$$R_{WY}(m) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h(k)R_W(m+k) = \sigma_w^2 h(-m). \quad (140)$$

其中系统的冲激响应  $h(n)$  可根据 (??) 式表示成

$$h(n) = \begin{cases} -\sum_{k=1}^p a_k h(n-k) + b_n, & 0 \leq n \leq q \\ -\sum_{k=1}^p a_k h(n-k), & n > q \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (141)$$

## AR 模型

当系数  $b_1, \dots, b_q$  均为零且  $a_p \neq 0$  时, 系统为全极点系统, 其传递函数和冲激响应分别为

$$H(\Omega) = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-i a k}} = \frac{1}{\sum_{k=0}^p a_k e^{-i a k}}. \quad (142)$$

$$h(n) = \begin{cases} -\sum_{k=1}^p a_k h(n-k) + \delta(n), & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases}. \quad (143)$$

系统输出序列  $\{Y(n)\}$  与白噪声序列  $\{W(n)\}$  的当前值和  $\{Y(n)\}$  的  $p$  个过去值有关, 即

$$y(n) = w(n) - \sum_{k=1}^p a_k y(n-k). \quad (144)$$

称为平稳随机序列  $\{Y(n)\}$  的  $p$  阶自回归模型 (Auto Regressive model, AR), 记为  $AR(p)$ .

可见  $AR(p)$  模型是由  $ARMA(p, q)$  模型经过  $q = 0$  退化而来。相应地，由该模型表征的平稳随机序列  $\{y(n)\}$ ，即系统输出的功率谱密度函数和自相关函数可表示为

$$G_Y(\Omega) = \frac{\sigma_w^2}{\left| \sum_{k=0}^p a_k e^{-j\Omega k} \right|^2}. \quad (145)$$

$$\begin{aligned} R_Y(m) &= R_Y(n_1 - n_2) = E \left\{ y(n_2) \left[ w(n_1) - \sum_{k=1}^p a_k Y(n_1 - k) \right] \right\} \\ &= R_{wy}(m) - \sum_{k=1}^p a_k R_Y(m - k) \\ &= \sigma_m^2 h(-m) - \sum_{k=1}^p a_k R_Y(m - k). \end{aligned} \quad (146)$$

# 滑动平均模型

当系数  $a_1, \dots, a_p$  均为零且  $b_q \neq 0$  时，系统为全零点系统，其传递函数和冲激响应分别为

$$\begin{aligned}
 H(\Omega) &= 1 + \sum_{k=1}^q b_k e^{-i\Omega k} = \sum_{k=0}^q b_k e^{iak} \\
 h(n) &= \begin{cases} b_n, & 0 \leq n \leq q \\ 0, & n < 0, n > q \end{cases}
 \end{aligned} \tag{147}$$

此时， $\{Y(n)\}$  仅与白噪声序列  $\{w(n)\}$  的当前值和  $q$  个过去值有关，即

$$y(n) = w(n) + \sum_{k=1}^q b_k w(n-k) = \sum_{k=0}^q b_k w(n-k). \tag{148}$$

## $q$ 阶滑动平均模型

平稳随机序列  $\{y(n)\}$  的  $q$  阶滑动平均模型 (Moving Average model, MA), 记为  $MA(q)$ .

$MA(q)$  模型可以看作是由  $ARMA(p, q)$  模型经过  $p = 0$  退化而来。

相应地, 由该模型表征的平稳随机序列  $\{y(n)\}$ , 即系统输出的功率谱密度函数和自相关函数表示。

# 功率谱密度函数和自相关函数

功率谱密度函数和自相关函数分别表示为

$$G_Y(\Omega) = \sigma_w^2 \left| \sum_{k=0}^q b_k e^{-j\Omega k} \right|^2 \quad (149)$$

$$\begin{aligned} R_Y(m) &= R_Y(n_1 - n_2) = E \left\{ y(n_2) \sum_{k=0}^q b_k w(n_1 - k) \right\} \\ &= \sum_{k=0}^q b_k R_{wy}(m - k) = \sum_{k=0}^q b_k \sigma_w^2 h(k - m). \end{aligned} \quad (150)$$

在上文、中，我们提到 AR 模型和 MA 模型是 ARMA 模型分别在不同条件下的特例，除此之外，这三种模型之间还可以相互等价。下面我们就以 MA 模型为例，证明一个有限阶的 MA(q) 模型可以等价于一个无穷阶的 AR 模型。

对 (??) 式两边取 Z 变换

其中  $Y(z)$  和  $W(z)$  分别为  $y(n)$  和  $w(n)$  的  $z$  变换. 若系统  $H(z)$  具有可逆性, 即其零点  $|\beta_k| < 1$ , 序列  $\{w(n)\}$  可以看成是序列  $\{y(n)\}$  激励其逆系统  $H_{inv}$  的输出, 即

◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡



利用系统的稳定性条件和下面的公式

$$\frac{1}{1 - \beta_k z^{-1}} = \sum_{i=0}^{+\infty} \beta_k^i z^{-i} = 1 + \sum_{i=1}^{+\infty} \beta_k^i z^{-i}. \quad (153)$$

将其代入 (??) 式得

$$W(z) = \prod_{k=1}^q \left( 1 + \sum_{i=1}^{+\infty} \beta_k^i z^{-i} \right) Y(z) = \left( 1 + \sum_{i=1}^{+\infty} \varepsilon_i z^{-i} \right) Y(z). \quad (154)$$

比较上式与 (??) 式，两者在形式上完全一致，这就证明：

- ① 一个可逆的有限阶 MA 模型可以等价于一个无穷阶的 AR 模型。
- ② 一个可逆的有限阶 MA 模型或 ARMA 模型可以等价于一个无穷阶的 AR 模型。
- ③ 一个稳定的有限阶 AR 模型或 ARMA 模型也可以等价于一个无穷阶的 MA 模型。

## 随机信号通过线性时变系统 \*

而当随机信号通过的是线性时变系统时，此时系统的输出跟输入的起始作用时间有关，输出与输入之间的关系可以表示成

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) x(\tau) d\tau, \quad (155)$$

其中  $h(t, \tau)$  为时变系统的冲激响应， $\tau$  表示系统输入端出现冲激的时刻， $t$  表示响应出现的时刻。当该系统为因果系统时，有

$$h(t, \tau) = 0, t < \tau.$$

采用类似的分析方法，可得系统输出的一阶、二阶统计特性分别为

$$m_Y(t) = E\{Y(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) E\{X(\tau)\} d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) m_X(\tau) d\tau. \quad (156)$$

$$\begin{aligned}
 R_Y(t_1, t_2) &= E\{Y(t_1)Y(t_2)\} \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t_1, \tau_1) h(t_2, \tau_2) E\{X(\tau_1)x(\tau_2)\} d\tau_1 d\tau_2. \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t_1, \tau_1) h(t_2, \tau_2) R_X(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \quad (157)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{XY}(t_1, t_2) &= E\{X(t_1)Y(t_2)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t_2, \tau_2) E\{X(t_1)x(\tau_2)\} d\tau_2 \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(t_2, \tau_2) R_X(t_1, \tau_2) d\tau_2.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{YX}(t_1, t_2) &= E\{Y(t_1)X(t_2)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t_1, \tau_1) E\{X(\tau_1)x(t_2)\} d\tau_1 \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(t_1, \tau_1) R_X(\tau_1, t_2) d\tau_1. \quad (158)
 \end{aligned}$$

# 冲激响应的幅度调制

## 冲激响应的幅度调制

以冲激响应  $h(t, \tau) = f(t)\delta(t - \tau)$  的幅度调制系统为例。

假设一广义平稳的随机信号  $\{X(t)\}$  通过该时变系统，此时系统的输出  $y(t) = f(t)x(t)$ ，则其一阶、二阶统计特性分别为

$$\begin{aligned}
 m_Y(t) &= E\{Y(t)\} = f(t)m_X. \\
 R_Y(t_1, t_2) &= E\{Y(t_1)Y(t_2)\} = f(t_1)f(t_2)R_X(t_1 - t_2). \\
 R_{XY}(t_1, t_2) &= E\{X(t_1)Y(t_2)\} = f(t_2)R_X(t_1 - t_2). \\
 R_{YX}(t_1, t_2) &= E\{Y(t_1)X(t_2)\} = f(t_1)R_X(t_1 - t_2).
 \end{aligned} \tag{159}$$

可见，即使输入  $\{X(t)\}$  广义平稳，输出  $\{Y(t)\}$  的均值也不再是常数，而与时间  $t$  有关，且自相关函数和互相关函数跟时间  $t_1, t_2$  都有关，系统输出不再广义平稳。