



登记号 _____

北京航空航天大学
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

数字信号处理实验三

指 导 书

机械与控制工程国家级虚拟仿真实验教学中心

2020 年 4 月

实验三 最小相位和全通滤波器

一、实验目的

- 1.掌握最小相位-全通分解原理；
- 2.掌握最小相位、全通系统的频率响应特性和群延时特性；
- 3.掌握最小相位系统的应用方法；

二、实验内容

实验内容 1：最小相位-全通分解实验

给定一个因果稳定的 LTI 系统，其单位脉冲响应如下：

$$h[0]=1, \quad h[1]=10/3, \quad h[2]=1$$

- 1) 根据单位脉冲响应求取 $H(z)$ ，画出零极点图；
- 2) 将该系统分解为一个最小相位滤波器和一个全通滤波器(幅度特性为 1)级联的形式；
- 3) 画出最小相位滤波器和全通滤波器的零极点图、幅度响应、相位响应、群延迟响应；
- 4) 将最小相位滤波器和全通滤波器级联，使用 `impz` 求取级联后的单位脉冲响应，验证是否与原系统相同。

实验内容 2：基于全通滤波器的相位均衡实验

已知一个 IIR 低通滤波器系统，其系统函数 $H(z)$ 为：

$$H(z) = \frac{\frac{1-\alpha}{2}(1+z^{-1})}{1-\alpha z^{-1}}$$

- 1) 若 $\alpha = 0.5$ ，画出该系统在 $[0, \pi]$ 范围内的幅度响应、相位响应和群延时，并分析其是否满足线性相位；
- 2) 给定全通滤波器：

$$H_{allp}(z) = \frac{0.0445 - 0.132z^{-1} + 0.3703z^{-2} - 0.5103z^{-3} + z^{-4}}{1 - 0.5103z^{-1} + 0.3703z^{-2} - 0.1320z^{-3} + 0.0445z^{-4}}$$

绘制出全通滤波器的幅度响应、相位响应和群延时 ($[0, \pi]$ 范围内) 以及零极点分布图；

- 3) 完成相位均衡：将原系统和全通滤波器级联，绘制出新的系统的零极点图，幅度响应、相位响应和群延时，分析是否满足线性相位的要求 (主要分析低通滤波器的通带范围内)。

实验内容 3: 基于最小相位滤波器的回声消除

已知一段 4s 的音频（采样率 44100Hz），文件名（newaudio_44100_4s.mat），为该段音频增加回声效果，并构造逆系统消除该回声。具体内容：

- 1) 使用 `importdata` 函数将其导入到 MATLAB 中，绘制该音频的时域波形，并播放该段音频；
- 2) 将录制的语音信号延迟（延迟时间自行确定，要求回声较为明显，推荐值 0.5s），并跟原语音信号合成，实现对录制的语音增加回声效果（回声产生可以使用： $y[n]=x[n]+x[n-k]$ ）；绘制该音频的时域波形，并播放该段音频；
- 3) 构造逆系统消除回声信号，实现原始声音的还原，绘制该音频的时域波形，并播放该段音频。

三、实验要求：

- 1) 实验内容 1 中，将幅度响应、相位响应和群延时响应绘制在同一幅图中，横纵坐标、图名等信息标注完整。共需要提供 6 幅结果图，分别是：1 幅原系统的零极点图、1 幅最小相位滤波器的零极点图、1 幅最小相位滤波器的幅度相位群延时图，1 幅全通滤波器的零极点图、1 幅全通滤波器的幅度相位群延时图和 1 幅最小相位滤波器和全通滤波器级联后的单位脉冲响应图。
- 2) 实验内容 2 中，将幅度响应、相位响应和群延时响应绘制在同一幅图中，横纵坐标、图名等信息标注完整。共需要提供 5 幅结果图，分别是：1 幅原系统的幅度相位群延时图、1 幅全通滤波器的幅度相位群延时图、1 幅全通滤波器的零极点图；1 幅新系统的幅度相位群延时图和 1 幅新系统的零极点图。
- 3) 实验内容 3 中，请提供原始信号、回声信号和消除回声后的信号时域图（横纵坐标标注完整），共三幅图，讨论并分析最小相位滤波器在本次实验中的作用（不少于 50 字）。

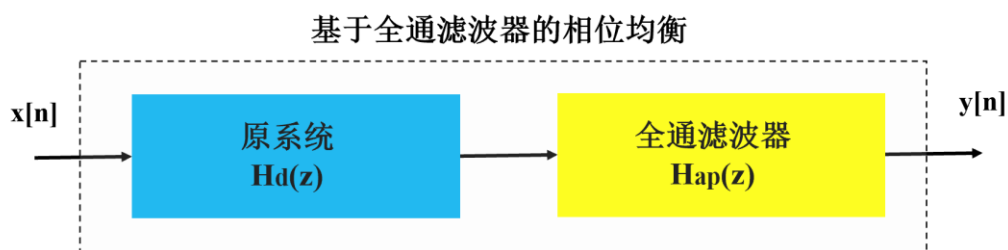
四、实验原理

1. 最小相位-全通分解原理

任何一个非最小相位、因果稳定的滤波器均可以用一个最小相位滤波器和一个全通滤波器级联构成（详见教材 2.5.2）

2. 由于 IIR 滤波器（或系统）的相位是非线性的，因而群延时不为常数，而在视频信号、

数据的传输中，对相位特性非常敏感，希望传输系统有线性相位（群延时为常数），这是可采用全通滤波器作为相位校正之用，以得到线性相位。即将 $H_{ap}(z)$ （全通滤波器）与原系统 $H_d(z)$ 级联得到新的系统 $H(z)$ 。 $H(z)$ 保留了原系统的幅度响应并在一定频率范围内具有线性相位，从而实现了相位均衡（**注意**：新系统的群延时不可能在所有频率上都等于某一常数，通常以一定误差逼近，只要误差在允许的范围内就可以了）。相位均衡过程如下图所示。



群延时的定义如下：

$$\tau_g(\omega) = -\frac{d\theta(\omega)}{d\omega},$$

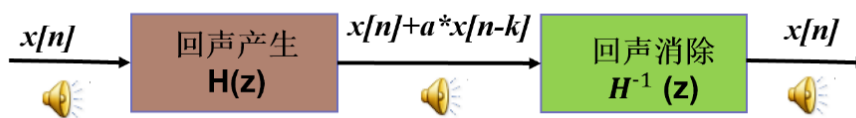
3. 回声消除的原理，如下图所示：

构造逆系统，进行回声消除

设稳定系统 $H(z) = \frac{b(z)}{a(z)}$ ，其逆系统 $H^{-1}(z) = \frac{a(z)}{b(z)}$

$$H^{-1}(z)H(z) = 1$$

$H^{-1}(z)$ 可以抵消 $H(z)$ 的影响



4. 已知系统函数如下：

$$H(z) = \frac{0.05634(1+z^{-1})(1-1.0166z^{-1}+z^{-2})}{(1-0.683z^{-1})(1-1.4461z^{-1}+0.7957z^{-2})}.$$

使用 Matlab 描述 $H(z)$ 的分子和分母

`b0 = 0.05634;`

`b1 = [1 1];`

```
b2 = [1 -1.0166 1];  
a1 = [1 -0.683];  
a2 = [1 -1.4461 0.7957];  
b = b0*conv(b1,b2);  
a = conv(a1,a2);
```

五、参考资料

[1] 高西全, 丁玉美, 阔永红. 数字信号处理——原理、实现及应用 (第 3 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.

[2] A.V.奥本海姆, R.W.谢弗, J.R.巴克. 离散时间信号处理 (第 2 版), 西安交通大学出版社, 2011.

[3] 程佩青, 数字信号处理教程 (第 5 版), 清华大学出版社, 2017.

六、实验报告要求

1、实验报告内容

按照模板撰写实验报告且排版规范, 要包含以下内容

- 1) 实验目的
- 2) 实验过程与实验结果, 包含程序源代码
- 3) 结果分析与实验结论
- 4) 实验收获、体会及建议

2、提交实验报告时间

本次实验结束后 1 周内提交到教务处实验系统。