

信号处理大型实验 指导书

常丽萍 编

浙江工业大学信息工程学院

通信工程专业

Sep. 2015

目 录

实验一 音乐信号处理

实验二 数字信号处理在双音拨号系统中的应用

实验三 变采样率数字滤波器设计

实验四 图像滤波(边缘检测)和图像压缩

实验一 音乐信号处理

一、实验目的

1. 了解现代音乐信号制作时的时域处理方法。
2. 了解现代音乐信号制作时的频域处理方法。
3. 利用 Matlab 来实现音乐信号的时域和频域处理。

二、实验原理

现代音乐的处理和加工基本都是采用数字信号处理技术完成的，大致分为如下步骤：首先在一个隔音的舞台上把乐队中各个乐器的声音分别录在一个多磁道磁带的各个独立磁道上；然后由音响工程师把各个磁道的信号进行单独处理，加入特定的声音效果；最后在一个混音系统中把这些信号进行合成，录制在一个立体声的双磁道磁带上。

这里简要介绍下其中的时域和频域处理技术。

1. 时域处理方法

在音乐厅中听到的悦耳声音，主要由直接传播声音、一次反射声音和混响（密集回声）等组成。在隔音舞台上录制的声音听起来会不自然，就需要用数字滤波器人为的增加回声，使其接近音乐厅的效果。

回声可以用延迟单元来形成，直接声音和它延迟了 R 个单元的回声可以用如下差分方程表示：

$$y[n] = x[n] + \alpha x[n - R], \quad |\alpha| < 1$$

其中 α 表示回声的衰减系数。上述差分方程的传递函数为：

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

它可以作为一个 FIR 滤波器来实现，为梳状滤波器。

为了生成间隔为 R 个周期的多重回声，上式改写为：

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

如果反射的次数很多，则 $\alpha^N \rightarrow 0$ ，则多重回声可以用一个 IIR 滤波器来实现，其传递函数为：

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

不过这样的滤波器其实还无法满足音乐处理的要求，因为这种滤波器的幅频特性不是常数，所以对不同频率的声音谐波响应不均匀，听起来会感到失真；第二是这种回声太单调，每秒中回声数目太少会导致声音的颤动（可以采用上式验证听一下声音效果）。根据经验，回声的密度应该达到每秒 1000 个以上，听众才能有混响的感受。

如何解决以上两个问题，能否给出解决方案？

2. 频域处理方法

把录制的各种声音进行混合时，通常要修改它们的频谱。方法是让信号通过一个均衡器，使声音在中频区（1.5KHz-3KHz）频谱居于峰值，以便在混合信号中表现出来，另外也需要对此中频区以外的信号进行放大或者衰减，以修正低频和高频信号之间的关系。通常是采用多个一阶和二阶参数可调的滤波器级联来实现这个功能。

一阶均衡器的可调滤波器结构如图 1 所示，其输入端到输出端的传递函数分别为：

$$H_{LP}(z) = 0.5[1 - A_1(z)], \quad H_{HP}(z) = 0.5[1 + A_1(z)]$$

$$\text{其中 } A_1(z) = \frac{\alpha - z^{-1}}{1 - \alpha z^{-1}}, \quad |\alpha| < 1$$

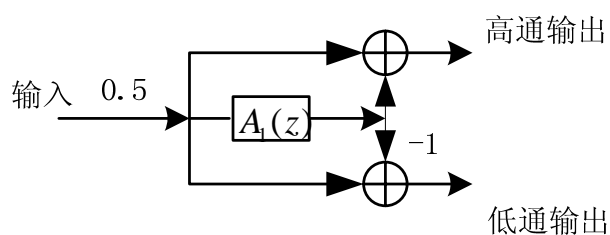


图 1 一阶可调滤波器

把两个输出端信号加权求和，就可以灵活的构成均衡滤波器。如把低频输出乘以 K 和高频输出相加，就可以构成低频均衡滤波器，其传递函数为：

$$G(z) = 0.5K[1 - A_1(z)] + 0.5[1 + A_1(z)] = 0.5(K + 1) + 0.5(1 - K)A_1(z)$$

即在 α 和 K 取不同值时它们的频率响应也不相同。

同理，把高频输出乘以 K 和低频输出相加，就成为高频均衡滤波器，其传递函数为：

$$G(z) = 0.5[1 - A_1(z)] + 0.5K[1 + A_1(z)] = 0.5(K + 1) - 0.5(1 - K)A_1(z)$$

二阶均衡器，是利用

$$A_2(z) = \frac{\alpha - \beta(1 + \alpha)z^{-1} + z^{-2}}{1 - \beta(1 + \alpha)z^{-1} + \alpha z^{-2}}, \quad |\alpha| < 1$$

代替上式的 $A_1(z)$

实际音乐播放器中的均衡器就是采用多个调谐在不同频率上的二阶均衡器级联组成的。

三、实验内容

1. 利用计算机录制一段音乐信号（5 秒以内），采样频率为 $48kHz$ 。
2. 时域处理

设计实现对实验内容 1 中的信号的一次混响处理，延时 0.3 秒，衰减 30%。

3. 频域处理

设计一个一阶低频均衡滤波器，当 K 和 α 取不同数值时求解其频率特性，画出其频率响应图并分析频率响应特性与这些参数的关系。设 K 取两个数值：2.5 和 0.5， α 取 5 个数值 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.7。

使用该均衡器对实验内容 1 中的信号进行滤波。

序号	K	α
1	2.5	0.1
2		0.2
3		0.4
4		0.6
5		0.7
6	0.5	0.1
7		0.2
8		0.4
9		0.6
10		0.7

4. 设计一个二阶低频均衡滤波器，当 K ， α 和 β 取不同值时分析其频率响应特性与这些参数的关系。

(1) 设 $\beta = 0.4$ ， K 取两个数值：2.5 和 0.5， α 取 5 个数值 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.7。

(2) 设 $K=2.5$ ， $\alpha=0.6$ ， β 取 5 个数值 0.8, 0.4, 0, -0.4, -0.8。

使用该均衡器对实验内容 1 中的信号进行滤波。

四、实验报告要求

1. 要求自行查阅文献，编制完整实验程序完成实验内容中的工作，实现对语音信号的处理，并得出实验结果。
2. 在实验报告中给出完整的自编程序和实验结果，并进行相应分析。
3. 除必须完成的实验内容外，鼓励独立思考，进行有意义的扩展实验、自行增加实验内容的，

将获加分。

五、思考题

1. 采用梳状滤波器进行声音的处理时，发现经过处理后声音听起来会感到失真，为什么？应该采用什么措施来改善这种情况？
2. 回声太单调，即每秒中的回声数目太少，会导致声音的颤动，能否给出定性的方法解决这个问题？
3. 采用频率处理方法来处理语音信号时，应如何构造二阶高频均衡滤波器，并写出其传递函数。

建议搜索关键词：回声，*audiorecorder()*，立体声混音

实验二 数字信号处理在双音拨号系统中的应用

一、实验目的

1. 了解双音多频系统的数字处理方法。
2. 自学掌握一种特殊的 DFT 算法：Goertzel 算法。
3. 利用 Goertzel 算法对双音多频信号进行频谱检测。

二、实验原理

DTMF 通信系统是一个很典型的小型信号处理系统，既有模拟信号的生成和传输部分，又有转为数字信号进行数字处理部分，而且为了提高系统的检测速度和降低成本，还开发了一种特殊的 DFT 算法，称为 Goertzel 算法。众所周知，N 点 DFT 的计算量为 $N \log_2 N$ ，可立即得到 DFT 的所有 N 个值，但至少需要 N 个存储器。然而，如果只希望计算 DFT 的 K 个点，且 $K \ll N$ ，则计算 DFT 就会浪费很多内存，因为只需要 K 个频点上的频谱分量，Goertzel 算法的提出可以很好的解决这个问题。

1. Goertzel 算法

Goertzel 算法是 DFT 的一种线性滤波算法，它是利用相位因子 $\{W_N^k\}$ 的周期性。由于 $W_N^{-kN} = 1$ ，用该因子去乘 DFT，得到

$$X[k] = W_N^{-kN} X[k] = \sum_{m=0}^{N-1} x[m] W_N^{-k(N-m)} \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

可以看出上式是一种卷积形式。如果定义 $y_k[n]$ 为

$$y_k[n] = \sum_{m=0}^{N-1} x[m] W_N^{-k(n-m)} = x[n] \circledast W_N^{-k(n)} \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

则可以看出

$$X[k] = y_k[n] \Big|_{n=N} \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

即该滤波器在 $n = N$ 点的输出就是在频点 $\omega_k = 2\pi k/N$ 的 DFT 值。

定义上式卷积中滤波器的单位冲激响应

$$h_k[n] = W_N^{-kn} u[n]$$

其对应的 z 变换为： $H_k[k] = \frac{1}{1 - W_N^{-k} z^{-1}}$

这个滤波器只有一个位于单位圆上频率为 $\omega_k = 2\pi k/N$ 的极点。因此，可使输入数据块通过 N 个并行的单极点滤波器（谐振器）组来计算全部 DFT。如果只需要 K 个 DFT 样本，可以只用 K 个并行的单极点滤波器来分别计算这 K 个样本。

除了卷积的方法，也可以给出滤波器的差分方程，采用迭代的方法计算 $y_k[n]$ ，具体可查阅相关资料。

三、实验内容

1. 查找双音频编解码的原理及具体频点与按键的对应关系。
2. 双音频编码。程序根据用户输入的每一个数字或者字符，查到对应的两个频率，并生成相应的双频信号 $x[n]$ 。
3. 双音频解码。程序对收到的双频信号进行截取，利用 Goertzel 算法进行傅里叶变换，得到八个规定频率上的幅度，确定两个信号频率值，找到对应的数字或字符。

四、实验报告要求

1. 要求自行查阅文献，编制完整实验程序完成实验内容中的工作，实现双音多频信号的产生和检测，得出实验结果。
2. 在实验报告中给出完整的自编程序和实验结果，并进行相应分析。
3. 除必须完成的实验内容外，鼓励独立思考，进行有意义的扩展实验、自行增加实验内容的，将获加分。

五、思考题

1. Goertzel 算法相对于 FFT 算法求信号频谱，有什么优点？
2. 试求出 Goertzel 算法中滤波器的差分方程，并分析如何利用迭代算法得到 $y_k[n]$ 。

建议搜索关键词：双音频，goertzel()

实验三 变采样率数字滤波器设计

一、实验目的

1. 理解变采样率的概念，理解抽取和插值的概念。
2. 掌握采样定理。
3. 掌握如何利用 MATLAB 来实现变采样率数字滤波器。

二、实验原理

在数字系统越来越普及的情况下，各个数字系统都有自己不同的标准，它们之间的衔接也就不可避免要遇到“多采样率”的问题，如：

- (1) 在数字电视系统中，对 NTSC 制式的图像采集速率标准为 14.318MHz，而对 PAL 制为 17.734MHz。对亮度信号采样率为 13.5MHz，对色度信号的采样率为 6.75MHz，两者相差 1 倍。这些标准的差别就要求数字电视演播室系统工作在多采样率状态。
- (2) 在数字电话系统中，传输信号既有语音信号，又有传真信号，甚至有视频信号，这些信号频率成分相差甚远。所以，该系统应具有多种采样率，并根据所传输的信号自动完成采样率转换。

以上所列的几个方面都是希望能对采样率进行转换，或要求系统工作在多采样率状态。采样率转换通常分为“抽取”和“插值”。抽取是降低采样率，以去掉多余数据样本的过程；而插值则是提高采样率，以增加数据样本的过程。近年来，建立在采样率转换基础上的“多采样率数字信号处理”已成为数字信号处理学科中的主要内容之一。

1. 信号的整数倍内插

整数倍内插是指在已知相邻两个采样点之间插入 $L-1$ 个样本点。由于插入的这些样本点不是已知的值，所以关键问题是在不经过模拟域，如何求出这 $L-1$ 个样本值。

数字插值的步骤为：先在已知采样序列 $x[n]$ 的相邻采样点之间等间隔插入 $L-1$ 个零值样本点，

假如其输出为 $y[n]$ ，则输入和输出的关系为：

$$y[n] = \begin{cases} x[n/L], & n = 0, \pm L, \pm 2L, \dots \\ 0 & , n = \text{其他值} \end{cases}$$

式中， L 为大于 1 的整数倍，称为插入因子，然后经过一低通滤波器，得到内插的结果。

2. 信号的整数倍抽取

整数倍抽取是指在已知序列 $x[n]$ 中每隔 $M-1$ 个采样点取出一个样本点，组成新的序列 $y[n]$ ，抽取的所有值都是已知的，可以直接写出下列表达式：

$$y[n] = x[nM]$$

表面上，抽取的数学式比较简单，但由于采样率的降低，造成的频率泄露可能非常严重，以至于抽出的序列中引入了混叠或其他干扰信息。为解决这个问题，在进行抽取之前，必须对原来的序列进行预先滤波，称为“抗混叠滤波”。

3. 分数倍变采样率

如果采样频率的变换不是简单的整数倍抽取或整数倍内插，且变换前后的采样频率比率满足两个整数之比 L/M ，则自然想到，可以通过先做 L 倍内插后再做 M 倍抽取的方法来实现，也可以次序倒过来，先抽取再内插。但滤波器的设计有不同的方法和要求，即在变采样率过程中，必须要有一个合适的滤波器。

在 MATLAB 信号处理工具箱中提供了一个变采样率的函数 `resample` (.)，该函数具有默认的滤波器设计，是按等波纹最优化原理设计的，因此运用起来很方便。其具体的调用格式为：

$y = \text{resample}(x, L, M)$ ，其中，输入参数 x 表示输入序列； L 为采样率提高的倍数， M 为采样率降低的倍数， L 和 M 取整数。

三、实验内容

1. 分数倍变采样率处理初等函数信号

设输入信号 $x = e^{-2t}u(t)$ ，原始采样频率为 $f_0 = 50\text{Hz}$ ，插入倍数 $L = 4$ ，抽取倍数 $M = 5$ ，

x 序列的长度 $N_x = 100$ 。

- 1) **不采用 `resample` 函数**，分析该信号分数倍变采样率处理过程中序列的时域波形及其对应的频谱特性。低通滤波器可采用 `blackman` 家族窗或者 `Kaiser` 窗，截止频率为 0.3π 的 FIR 数字滤波器。截止频率请根据实际信号效果进行调整，找到最优的截止频率。也可以灵活使用其他变换窗。
- 2) **采用 `resample` 函数**，分析该信号分数倍变采样率处理过程中序列的时域波形及其对应的频谱特性。并与 1) 的结果进行对比分析。

2. 分数倍变采样率处理语音信号

以 20kHz 采样率录制一段语音信号，设计一个变采样率滤波器，得到 16kHz 采样率的信号。

画出这两个信号的频谱图并对比，看有什么异同。

四、实验报告要求

1. 针对实验内容中的任务，自行编制完整的实验程序，得到实验结果。
2. 在实验报告中给出完整的自编程序和实验结果，并进行相应分析。
3. 除必须完成的实验内容外，鼓励独立思考，进行有意义的扩展实验、自行增加实验内容的，将获加分。

五、思考题

在数字电话系统中，采样频率一般取为 $f = 8\text{kHz}$ ，希望传输接近 4kHz 的音频带宽，但送话器发出的信号 $x(t)$ 的带宽要比 4kHz 大很多，因此，在 A/D 变换之前要对它进行模拟预滤波，以防止采样后发生频率混叠失真，这就要求该滤波器在 4kHz 处衰减比较大，而为了使能传送的信号频带尽可能宽，又要求该滤波器的通带频率接近于 4kHz （如 3.8kHz ），这样过渡带宽就很窄，只有几百 Hz。用模拟方法实现的低通滤波器很难达到这样的指标。

针对以上的这个问题，你能否给出一种解决方案，并写出具体的实现方法。

建议搜索关键词：变采样率，`fir1()`，`resample()`

实验四 图像滤波(边缘检测)和图像压缩

一、实验目的

1. 了解二维图像滤波和边缘检测的基本方法。
2. 查阅文献，了解 DCT 算法的原理。
3. 利用 DCT 算法进行图像压缩和重构。

二、实验原理

1. 图像滤波

离散信号卷积不但可以用来滤波一维信号，也可以用来滤波二维信号，二维图像滤波和一维滤波很相似，主要差别是图像滤波系统的单位冲激响应必须是二维的，这种二维的单位冲激响应称为“卷积核”。

要进行二维卷积，首先将卷积核旋转 180 度，然后在图像上移动卷积核，逐点相乘相加，得到滤波输出。二维滤波也有低通、高通的概念，如具有低通滤波能力的二维平滑滤波器的核为：

$$\frac{1}{N^2} \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

再如具有 3×3 高通滤波器的核为

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

这个核进行高通滤波，当核对准一个具有相似灰度级的区域，滤波结果就接近零；如果中心像素的灰度级与其邻域相对不同，那么结果就为大的正数或大的负数。当滤波的结果值超出灰度范围时，则需要对灰度进行调节。比如 8bit 图像的灰度范围为[0, 255]。

高通滤波器的一个变体是 Sobel 边缘滤波器，垂直 Sobel 边缘检测核为：

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其转置矩阵为水平边缘检测核。可通过 MATLAB 函数 `edge(.)` 实现，边缘检测是模式识别的重要任务之一，比如工业机器人视觉和军事物体识别、细菌形态识别等。

2. 图像压缩

高清图像如果不经压缩，其编码后的文件会很大，使用好的压缩技术图像文件大小会明显减少。在 Internet 应用中，很多图片牺牲清晰度和细节，得到较小的图片数据量，以便网络传输，减少使用者的等待时间。图像压缩分为有损压缩和无损压缩，无损压缩意味着不损失图片的任何信息，而使文件变得紧凑，有损压缩允许在压缩过程中带来一定的图像损失，而追求更高的压缩率或重构的高效快捷。离散余弦变换 DCT 是常用的图像有损压缩方法。

傅里叶变换是将信号分解为复指数函数加权积分的形式，而图像的二维离散余弦变换 DCT 是将图像分解为正弦信号加权和的形式。一般图像的 DCT 变换系数中有很多近似为零，去掉这些系数不会对重建的图像质量造成很大的影响。这些构成了图像压缩算法的基础。

二维离散余弦正变换公式为

$$F(u, v) = c(u)c(v) \frac{2}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cos\left(\frac{2x+1}{2N}u\pi\right) \cos\left(\frac{2y+1}{2N}v\pi\right)$$

$$\text{式中, } x, y, u, v = 0, 1, \dots, N-1, \quad c(u) = c(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & u=0, v=0 \\ 1 & \text{other} \end{cases}$$

二维离散余弦逆变换公式为

$$f(x, y) = \frac{2}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} c(u)c(v) F(u, v) \cos\left(\frac{2x+1}{2N}u\pi\right) \cos\left(\frac{2y+1}{2N}v\pi\right)$$

在 MATLAB 的图像处理工具箱中，可以直接调用 `dct2` 和 `idct2` 来实现二维离散余弦变换及其反变换。具体可查阅帮助。

这里介绍的图像滤波、边缘检测和图像压缩是最基本和简单的方法，有兴趣想进一步了解其他方法的可查阅相关文献。

三、实验内容

1. 输入一副 256*256 的灰度图像，实现图像的 5*5 低通滤波，10*10 低通滤波、3*3 高通滤波，显示运行结果并分析。
2. 输入一副 256*256 的灰度图像，实现 Sobel 算子水平边缘检测、垂直边缘检测和所有边缘检测，显示运行结果并分析。
3. 自学 DCT 算法。利用 DCT 算法进行图像压缩，将 DCT 系数值小于 0.2 的设为零，统计为零的像素个数，利用非零系数对图像进行重构；将 0.2 改为 0.5，0.1，统计为零的像素个数，利用非零系数对图像进行重构；显示图片结果并比较分析几种门限值对图像压缩和失真程度

的影响。

四、实验报告要求

1. 针对实验内容中的任务，自行编制完整的实验程序，得到实验结果。
2. 在实验报告中给出完整的自编程序和实验结果，并进行相应分析。
3. 除必须完成的实验内容外，鼓励独立思考，进行有意义的扩展实验、自行增加实验内容的，将获加分。

五、思考题

1. DCT 变换和 FFT 变换有什么区别？DCT 变换的优点是什么？
2. 探索汽车车牌识别方法，查阅相关文献，写出汽车车牌识别过程中需要用到哪些数字图像处理方法？如果能给出完整自编 MATLAB 程序和显示结果更好！你能完成这个有意思的任务吗？

建议搜索关键词：图像滤波，边缘检测，图像压缩，*edge()*