

可直接感受的基于 MATLAB 的语音滤波

雷学堂,徐火希

(黄冈师范学院 物理科学与技术系,湖北 黄冈 438000)

摘要:分析了时域卷积运算和频域加权算法的物理意义,并利用 MATLAB 的声音处理函数作为数据接口,利用多媒体播放器作为交互界面,利用 MATLAB 的 FDATool 作为滤波器设计工具,设计了一组语音信号滤波实验,目的在于:通过对比滤波前后的语音效果来加深对数字信号处理的认识。

关键词:MATLAB;数字信号处理;数字滤波;语音滤波

中图分类号:TN911.72

文献标识码:A

文章编号:1673-162X(2006)03-0048-04

数字信号处理是将信号和系统抽象成离散的数学模型,并从数学分析的角度分别讨论信号、系统、信号经过系统、系统设计等问题,其物理意义都隐含在数学运算之中,如何深刻理解其数学运算的物理意义是学好这门课程的关键。

1 低通滤波的分析

滤波就是有选择性地提取或去掉(或削弱)某一段或某几段频率范围内的信号,数字滤波器是一种用来过滤时间离散信号的数字系统,它是通过对抽样数据进行数学处理来达到选频目的。

1.1 低通滤波的时域分析 在时域,信号经过系统的响应 $y(n)$ 体现为激励 $x(n)$ 跟系统单位抽样响应

$h(n)$ 的卷积和 $y(n) = x(n) * h(n) = \sum_{m=0}^{N-1} h(m)x(n-m)^{[1,2]}$ 。对于长度为 N 的 FIR 系统, $h(n)$ 可以看成

一个长度为 N 点的固定窗口,而 $x(n)$ 则看成一个队列以齐步走的方式穿过 $h(n)$ 窗口。每走一步,位于窗口中的 $x(n)$ 部分的点跟 $h(n)$ 的对应点的值相乘(即加权)再求和,所得结果构成此时系统的响应值 $y(n)$, $x(n)$ 队列每走一步就得到一个响应值 $y(n)$,即 $y(n)$ 是 $h(n)$ 对应于其窗口中的 $x(n)$ 的加权求和。

时域低通滤波要求 $h(n)$ 窗口具有波形平滑作用,即利用 $h(n)$ 窗口加权和使变化快(高频)的正弦分量正负抵消(理想低通滤波)或衰减幅度大(实际低通滤波),使变化缓慢(低频)的正弦分量保留(理想低通)或衰减幅度小(实际低通)。理想滤波器的 $h(n)$ 是无限长的,只可逼近不可实现,实际的 FIR 低通滤波器 $h(n)$ 可通过窗函数法、频率抽样法和最优化设计法^[1]求得。

为了计算简便起见,设 $h(n) = 1/N, (0 \leq n \leq N-1), x(n) = x_1(n) + x_2(n) = 0.8\sin(2\pi \cdot 100n\Delta t) - 0.2\sin(2\pi \cdot 1000n\Delta t)$, 其中 $N = 10, \Delta t = 0.0001s, n$ 为整数,即 $x(n)$ 由 100Hz 的 $x_1(n)$ 和 1kHz 的 $x_2(n)$ 两种频率的信号组成。低通滤波的目的就是要尽可能地去掉 $x(n)$ 中的高频分量 $x_2(n)$, 同时尽可能地保留 $x(n)$ 中的低频分量 $x_1(n)$ 。 $x(n)$ 跟 $h(n)$ 卷积结果如图 1。从图 1 可以看出,响应 $y(n)$ 中只剩下 100Hz 的信号,因为 $h(n)$ 对 $x(n)$ 的加权和可以看成 $h(n)$ 对 $x(n)$ 的各个正弦分量($x_1(n), x_2(n)$) 分别加权求和再叠加,窗口中 1kHz 的信号 $x_2(n)$ 的加权和刚好为 0(此时 $h(n)$ 对 $x_2(n)$ 的加权和刚好为 $x_2(n)$ 在一个周期的平均值),而窗口中 100Hz 的信号 $x_1(n)$ 的衰减不大(此时 $h(n)$ 对 $x_1(n)$ 的加权和为 $x_1(n)$ 中连续 10 个点的平均值),其幅度衰减为以 $x_1(n)$ 中最大值为中心的连续 10 个点的平均值,相位右移了 $(N-1)/2 = 4.5$ 个抽样点的距离。

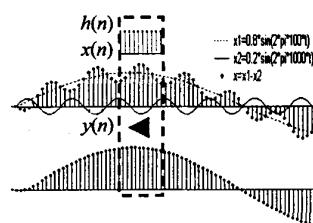


图 1 时域低通滤波

收稿日期:2006-05-08 修回日期:2006-07-29

基金项目:黄冈师范学院科学研究基金、青年科研基金项目(03CQ61)资助。

作者简介:雷学堂(1968—),男,湖北罗田人,黄冈师范学院物理科学与技术系副教授,硕士,研究方向:信号处理和数据通信;徐火希(1969—),男,湖北罗田人,黄冈师范学院物理科学与技术系讲师,硕士,研究方向:接口与通信。

滤波的效果跟 $h(n)$ 窗口的宽度有关(实质上取决于 $h(n)$ 的取值情况,在此不进行详细讨论). 当窗口宽度 $N = 1$ 时无滤波作用(两种频率都没有衰减),从 $N \geq 2$ 时开始对两种频率的信号都有衰减,但对 1kHz 信号的衰减比对 100Hz 信号的衰减要快得多. 当 $N = 10$ 时 1kHz 的信号完全滤除(幅度降为 0),而此时 100Hz 信号的幅度为原来的 97.9%. 从 $N > 10$ 开始对 1kHz 信号的滤波效果相对于 $N = 10$ 时变差, $N = 15$ 时最差,1kHz 信号的残留为:半个周期的样值之和 / 15 = 20.5%,此时 100Hz 信号的幅度为原来的 96.2%. $N = 20$ 时 1kHz 信号完全滤除,此时 100Hz 信号为原来的 93.1%, $N = 25$ 时 1kHz 信号的残留为:半个周期的样值之和 / 25 = 12.3%,此时 100Hz 信号的幅度为原来的 89.7%,即 $N = 5 \times 2m$ 时 1kHz 信号完全滤除, $N = 5 \times (2m + 1)$ 时 1kHz 信号的残留为:半个周期的样值之和 / $[5 \times (2m + 1)]$. 这种高频信号的残留反映了滤波器的阻带衰减. 由此看出 N 越大对高频(1kHz)的滤波效果越好,但随着 N 的增大对低频(100Hz)的滤波作用也在增强,当 $N = 100$ 时,100Hz 和 1kHz 的信号都完全滤除,这种对低频信号的滤波作用反映了滤波器的通带衰减. 反过来说,当 $N = 10$ 固定时,对频率低于 1kHz 信号的滤波作用较弱,频率越低衰减越小,对频率高于 1kHz 的信号有较明显的衰减作用,这种衰减对频率的选择性反映了滤波器的截止频率或过零点带宽.

1.2 低通滤波的频域分析 在频域,信号经过系统的响应 $y(n)$ 的频谱 $Y(e^{j\omega})$ 体现为激励 $x(n)$ 的频谱 $X(e^{j\omega})$ 跟系统单位抽样响应 $h(n)$ 的频谱 $H(e^{j\omega})$ (即系统的频谱)的乘积 $Y(e^{j\omega}) = |H(e^{j\omega})| \cdot |X(e^{j\omega})| \cdot e^{j(\varphi_H + \varphi_X)}$. 即响应的频谱 $Y(e^{j\omega})$ 的幅值由系统频谱 $H(e^{j\omega})$ 的幅值对激励频谱 $X(e^{j\omega})$ 的幅值相乘(加权)得到,响应的频谱 $Y(e^{j\omega})$ 的幅角由系统的频谱 $H(e^{j\omega})$ 的幅角跟激励频谱 $X(e^{j\omega})$ 的幅角相加(移相)得到^[1,2].

频域低通滤波就是要求系统的幅度函数 $|H(e^{j\omega})|$ 对需要保留的低频信号的加权权重较大(理想时为 1),而对需要滤除的高频信号的加权权重较小(理想时为 0).

为便于对比,还以 1.1 例在频域进行说明. 图 2 为 $x(n)$ 、 $y(n)$ 和 $h(n)$ 在 $N = 10, 15, 20, 25, 100$ 时的幅频特性曲线,横坐标为频率,单位为 kHz,其中 5kHz 为最高频率(因 $f_h = f_s/2 = 1/(2\Delta t) = 5\text{kHz}$). 从图 2(a)可以看出 $x(n)$ 中含有 100Hz 和 1kHz(横轴单位为 kHz)两种频率的信号,从图 2(b) ~ (f)中虚线为 $h(n)$ 的幅度谱 $|H(f)|$,可以看出当 $N = 10, 20, 100$ 时 $|H(f)|$ 在 1kHz 处的幅度为 0,而当 $N = 15, 25$ 时 $|H(f)|$ 在 1kHz 处的

幅度为最大. 这是因为由 $H(e^{j2\pi f}) = H(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{L-1} h(n)e^{-j2\pi f n}$ ^[1,2], 可求得

$$|H(e^{j\omega})| = \left| \frac{1}{N} e^{-j\pi \frac{N-1}{L} k} \frac{\sin\left(\frac{Nk}{L}\pi\right)}{\sin\left(\frac{k}{L}\pi\right)} \right| = \begin{cases} 1 & k = 0 \\ 0 & k = \frac{L}{N}m \\ \frac{1}{N \sin\left(\frac{k}{L}\pi\right)} & k = \frac{L}{2N}(4m + 1), \\ \left| \frac{\sin\left(\frac{Nk}{L}\pi\right)}{N \sin\left(\frac{k}{L}\pi\right)} \right| & k \text{ 为其它整数} \end{cases}$$

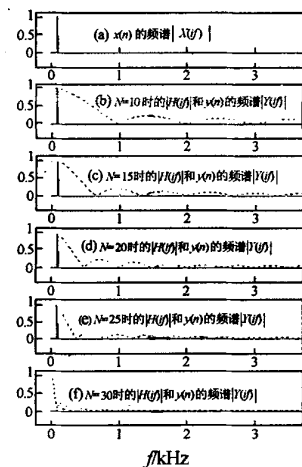
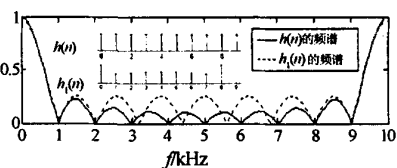


图 2 滤波前后的频谱

其中 $0 \leq k \leq L-1$, L 为激励信号 $x(n)$ 的长度 ($L = 100$), $h(n)$ 的有值长度为 N , m, k 均为整数,与数字频率 k 对应的模拟频率为 $f = (f_s k/L)\text{Hz}$. 当 $N = 10$ 时,在 $f = mk\text{Hz}$,即 $f = 1\text{kHz}, 2\text{kHz}, 3\text{kHz}$ 等处为 0;而在 $f = (2m \pm 0.5)\text{kHz}$,即 $f = 1.5\text{kHz}, 2.5\text{kHz}, 3.5\text{kHz}$ 等处残留最大,如图 2(b)所示. 当 $N = 15$ 时,在 $f = 2m/3(\text{kHz})$ 处为 0,而在 $f = (4m + 1)/3(\text{kHz})$ 处残留最大. 如图 2(c)所示,此时 $f = 1\text{kHz}$ 处的残留大约为 0.2(即 20%). 从图 2(f)可以看出 $|H(f)|$ 在 100Hz 处为 0. 其它依此类推.

图 2(b) ~ (f)中实线部分为不同长度的 $h(n)$ 对 $x(n)$ 的滤波情况,可以看出,当 $N = 10, 20, 100$ 时 1kHz 信号完全滤去, $N = 100$ 时,100Hz 的信号也完全滤去,当 $N = 15, 25$ 时 1kHz 信号残留最大,这与在时域中分析的结论是一致的.

需要说明的是,在实际应用中,滤波器的单位抽样响应 $h(n)$ 是通过滤波器的一些设计方法设计出来的. 滤波器设计追求的目标是:在满足滤波器指标要求的前提下,如何来构造一个长度最短(阶数最少)的 $h(n)$. 本例中为便于数值计算直接给定 $h(n)$,在 $N = 10$ (即 9 阶)时才能满足滤除 1kHz. 保留 100Hz、信号的要求,这里的 $h(n)$ 并不是最短的,例如以 MATLAB 的 FDATool 设计的一个 8 阶 FIR 低通滤波器 $h_1(n)$ 基本上可以达到上述要求, $h_1(n) = [0.172\ 7, 0.081\ 3, 0.093\ 3, 0.101\ 0, 0.103\ 6, 0.101\ 0, 0.093\ 3, 0.081\ 3, 0.172\ 7]$, 图 3 显示的是 $h(n)$ 和 $h_1(n)$ 及其频谱. 从图 3 中可看出两者的频谱在频率低于 1kHz 的低频段(通带)上基本是重合的,在 1kHz 以上的高频段(阻带)上不同, $h(n)$ 的频谱随频率的增大其衰减逐渐增大,而 $h_1(n)$ 的衰减基本不变,这正是 $h_1(n)$ 能够降低一阶的原因所在,因为它牺牲了阻带中随频率增大的衰减增量. 由此可以看出,可通过衰减来换取阶数,滤波器的设计就是基于这二者之间的权衡.

图 3 $h(n)$ 和 $h_1(n)$ 及其频谱

2 语音低通滤波器的设计

用 Windows 附件中的录音机将其它格式的语音转换成 .wav 格式,并命名 lei1 保存到 MATLAB 的 work 文件夹中,用 MATLAB 中的 wavread() 函数将 .wav 语音转换成数组格式数据,用 wavwrite() 函数将数组格式数据转换成 .wav 语音^[3],用 MATLAB 的 FDATool 工具箱^[4]设计所需 FIR 滤波器的系数 $h(n)$,具体设计方法见文献[5]. 注意 FDATool 中采样率的设置必须跟 .wav 语音录制时的采样率一致,本例中取抽样频率 $F_s = 22\ 050\text{Hz}$,截止频率 $F_c = 500\text{Hz}$,采用 20 阶的 Kaiser 窗,设计一低通滤波器,将设计好的滤波器的系数导出到工作空间,命名为 hl,编写如下 m 程序:

```
x = wavread('lei1.wav');           % 读取原 .wav 语音文件并转换为数组格式数据
y = conv(hl,x);                     % 时域卷积,实现低通滤波
wavwrite(y,22050,'lei2.wav').       % 将滤波后的数组格式数据保存为 .wav 格式文件
```

运行该 m 程序将在 MATLAB 的 work 文件夹中产生一个名为 lei2 的 .wav 语音文件,通过 MATLAB 的作图函数^[6]并取 x 的长度为 60 点,可得到如图 4 所示的一段时域波形,分别播放滤波前后的 lei1 和 lei2 这两段语音,会感觉到处理后的语音变得低沉,原因是高频分量被低通滤波器滤除或衰减,这从图 4 中的 $x(n)$ 和 $y(n)$ 波形形状可明显看出.

频域低通滤波在这里还是使用上例中设计的 hl 滤波器,其 m 程序如下:

```
fs = 22050; x = wavread('lei1.wav'); n = length(x);
Hw = fft(hl,n); % 求系统函数(频谱)Hw
Xw = fft(x,n); % 求原输入信号(激励)的频谱 Xw
Yw = Hw * Xw; % 频域滤波
y = ifft(Yw,n); % 转换到时域
wavwrite(y,22050,'lei3.wav');
f = 0:fs/n:fs * (n-1)/n; % 以下为作图
subplot(3,1,1); plot(f/1000,abs(Hw));
subplot(3,1,2); plot(f/1000,abs(Xw));
subplot(3,1,3); plot(f/1000,abs(Yw)).
```

其频谱如图 5 所示,可以看出滤波后信号的频谱 $|H(f)|$ 的高频部分有明显的衰减.

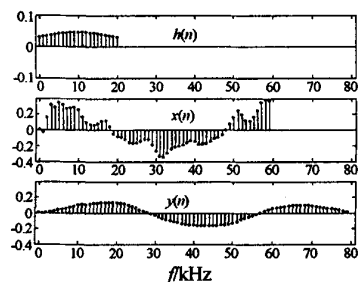


图 4 时域滤波波形

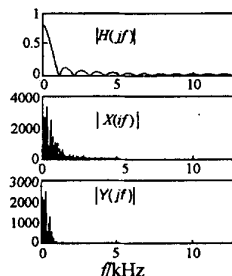


图 5 频域滤波的频谱

3 结论

利用 MATLAB 强大的运算和作图功能,以数字低通滤波器为例,分别从时域和频域详细地分析了时万方数据

域卷积运算和频域乘积运算的物理意义,并以 MATLAB 的声音处理函数为交互界面设计了一组语音低通滤波程序。这有利于学生理解算法的物理意义,有利于激发学生的学习兴趣,从而引发学生对数字信号处理算法的进一步思考。该方法很容易扩展到语音的其它处理。

参考文献:

- [1] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2001:20-25.
- [2] 吴大正. 信号与线性系统分析[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2003:83-109.
- [3] 姚东,王爱民,冯峰,等. MATLAB 命令大全[M]. 北京:人民邮电出版社,2000:359-363.
- [4] 陈亚勇. MATLAB 信号处理详解[M]. 北京:人民邮电出版社,2002:245-344.
- [5] 武晓春. FIR 数字滤波器的 MATLAB 设计[J]. 甘肃科技纵横,2005,34(1):21.
- [6] 陈怀琛,吴大正,高西全. MATLAB 及在电子信息课程中的应用[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2003:30-39.

[责任编辑:罗季重]

An Appreciable Audio Filter Based on the MATLAB

LEI Xue-tang, XU Huo-xi

(Department of Physics Science and Technology, Huanggang Normal University, Huanggang, Hubei 438000, China)

Abstract: This paper analyzes the physical significance of the time domain convolution operation and the frequency domain weight algorithm. And by using the MATLAB sound processing function as the data connection, the multimedia players as the interactive contact surface, the MATLAB FDATool as the filter design tool, designs a group of experiments for audio signal filter with the purpose of strengthening the understanding of the digital signal processing by comparing the change of the audio effect before and after the filter.

Key words: MATLAB; digital signal processing; digital filter; audio filter

(上接第 43 页)

The Application of AC4162 to Realize the Interruption Calling and Examine the IO Ports

ZHOU Wei-dong, YANG Yin-gen, XU Wu

(College of Computer Information Engineering, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: It introduces the main capabilities and features of AC4162, and gives attention to programming and hardware in this paper. It has made use of AC4162 to realize the interruption calling and examine the IO ports. With such application, we understand it more deeply.

Key words: AC4162; interruption; calling; interruption controller