



登记号 _____

北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

数字信号处理实验七

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 5 月

实验七 FIR 数字滤波器设计与应用

一、实验目的

1. 掌握数字心电图信号（ECG）的读取方法，掌握数字与模拟心电图信号下标之间的对应关系，掌握模拟频率与数字频率的对应关系。
2. 掌握基于 Hamming 窗口设计 FIR 数字滤波器的基本方法，掌握数字滤波器幅度响应的计算与表示方法。
3. 掌握利用设计的 FIR 数字滤波器对数字心电信号进行频域滤波方法，掌握滤波后信号的恢复方法。

二、实验内容

数字心电图信号是心电图机记录的心脏活动时心肌激动产生的生物电信号（心电信号），可以为心脏的临床诊断和科学研究提供有效地依据。在数字心电图信号的采集过程中，通常会受到 60 Hz 及其谐波的干扰（实验数据来自 MIT），给临床诊断带来不必要的麻烦，因此需要设计数字低通滤波器对谐波干扰进行抑制。

本次实验共 4 个学时，主要包括：1）读取含谐波干扰的数字心电图信号，并分析心电信号的频谱；2）基于 Hamming 窗设计 FIR 数字滤波器，并分析设计过程，3）对心电图信号进行频域滤波，并恢复出滤波后的信号

1、读取含噪声的数字心电信号

（1）读取数字心电信号

本次实验中的心电图机记录的工作频率为 360 Hz、采样时间为 60 s，获取的受干扰的数字心电图信号的存储文件为 Ecginf.txt。在 Matlab 环境下从文件 Ecginf.txt 中读取数字心电图信号，绘制以离散时间 n 为下标的心电信号波形 $x[n]$ ；将离散下标 n 转化为连续时间 t ，绘制以为下标的 t 心电信号波形 $x_c(t)$ 。

（2）计算心电信号的频谱

利用离散傅里叶变换（DFT）计算数字心电图信号 $x[n]$ 的幅度 $|X[k]|$ 及其分贝表示形式 $20\log_{10} |X[k]|$ ；根据 DFT 计算结果近似地得到离散时间傅里叶变换（DTFT）的幅度

谱 $|X(e^{j\omega})|$ 及其分贝表示形式 $20\log_{10}|X(e^{j\omega})|$ ；根据 DFT 计算结果近似地得到连续时间傅里叶变换（CTFT）的幅度谱 $|X(f)|$ 及其分贝表示形式 $20\log_{10}|X(f)|$ ；分析数字心电信号的频谱特点。

2、基于 Hamming 窗设计 FIR 数字滤波器

人类的心脏跳动产生的最高频率分量一般不超过 25 Hz，而受干扰的谐波频率为 60 Hz。本次实验基于 Hamming 窗设计长度为 67 的 FIR 数字滤波器，它的截止频率 ω_c 对应于原始心电信号中的 45 Hz 频率分量。

（1）确定长度为 N 的 Hamming 窗口序列

利用 Matlab 语言编写生成长度为 N 的 Hamming 窗口函数，并调用该函数得 $N=67$ 的窗口序列 $w[n]$ ，绘制 $w[n]$ 的波形及其幅度谱 $20\log_{10}|W(e^{j\omega})|$ (dB)。

（2）基于 Hamming 窗设计 FIR 数字滤波器

根据 45 Hz 截止频率及其心电图机的工作频率（采样频率）360 Hz，确定数字滤波器的截止频率 ω_c ；根据截止频率 ω_c 确定理想数字滤波器的单位脉冲响应 $h_d[n]$ 并绘制其波形；使用第（1）步获得的 Hamming 窗对 $h_d[n]$ 进行加窗运算，得到数字滤波器的单位脉冲响应 $h[n]$ ；绘制 $h[n]$ 的幅度谱 $|H(e^{j\omega})|$ 与 $20\log_{10}|H(e^{j\omega})|$ (dB)，并对设计过程即结果进行必要的分析与讨论。

3、利用 FIR 滤波器对数字心电信号滤波

（1）利用 FIR 滤波器进行频域滤波

利用实验内容 2 以 Hamming 窗为基础设计的 FIR 数字滤波器，利用离散傅里叶变换（DFT），实现对数字心电图信号的频域滤波；对比滤波前后的 DFT 频谱（包含分贝形式），并对频谱变化情况进行分析与讨论。

（2）滤波后的数字心电信号恢复

利用离散傅里叶逆变换（IDFT），恢复出滤波后的心电信号波形；比较绘制滤波前后数字心电信号波形；比较滤波前后的数字心电信号波形，并对滤波结果进行必要的分析与讨论。

三、实验要求

1、读取含噪声的数字心电信号

(1) 读取数字心电信号

在绘制以离散时间 n 与连续时间 t 为下标的心电信号图形时，利用 `subplot` 函数将两幅图形绘制在同一窗口中，注意横纵坐标标注完整。本项内容共 2 幅图，且绘制在 1 个窗口之中。

(2) 计算心电信号的频谱

在绘制数字心电信号 $x[n]$ 的离散傅里叶变换 $X[k]$ 与离散时间傅里叶变换 $X(e^{j\omega})$ 时，需要利用 `subplot` 函数将它们的幅度谱包括（分贝表示形式）绘制在同一窗口中。本项内容共 4 幅图，且绘制于 2 个窗口之中。注意：由于直流分量太大，绘制频谱时暂不考虑直流分量。

给出关于心电信号幅度频谱不少于 100 字的分析或讨论。

2、基于 Hamming 窗设计 FIR 滤波器

(1) 确定特定长度的 Hamming 窗口序列

不能使用 Matlab 提供的 Hamming 窗口函数或将 “hamming” 作为参数的 `window` 生成方法，要求本人编写生成 Hamming 序列的函数；利用 `subplot` 函数将窗口序列 $w[n]$ 与幅度谱 $20\log_{10}|W(e^{j\omega})|$ (dB) 绘制在同一窗口中。

(2) 基于 Hamming 窗设计 FIR 数字滤波器

利用 `subplot` 函数将理想数字滤波器的单位脉冲响应 $h_d[n]$ 、FIR 数字滤波器的单位脉冲响应 $h[n]$ 绘制在同一窗口中；将数字滤波器的幅度谱 $|H(e^{j\omega})|$ 及 $20\log_{10}|H(e^{j\omega})|$ (dB) 绘制在同一窗口中，注意横坐标、纵坐标要标注完整。

对数字滤波器设计过程给出不少于 50 字的分析与讨论。

3、数字心电信号的频域滤波与信号恢复

(1) 数字心电信号的频域滤波

利用 `subplot` 函数滤波前后的心电信号 DFT 结果 $|X[k]|$ 与 $|X_f[k]|$ 绘制在同一窗口中，以及它们的分贝形式 $20\log_{10}|X[k]|$ 与 $20\log_{10}|X_f[k]|$ 绘制在同一窗口中，注意横坐标、

纵坐标要标注完整。

（2）滤波后的数字心电信号恢复

利用 subplot 函数将原始心电图信号 $x[n]$ 与滤波后的心电信号 $x_f[n]$ 绘制在同一窗口中，注意横坐标、纵坐标要标注完整。

给出关于数字滤波结果的不少于 100 字的分析与讨论。

四、实验原理

1、读取含噪声的数字心电信号

（1）读取数字心电信号

利用 Matlab 提供的函数 fscanff，可以将数字心电信号从存储文件中读取出来，读取数据个数等于采样频率与采样时间的乘积，即 $N = F_s \cdot \Delta T$ 。

（2）计算心电信号的频谱

长度为 N 的有限长序列 $x[n]$ 的离散傅里叶变换 $X[k]$ ，可以看作是离散时间傅里叶变换 $X(e^{j\omega})$ 的等间隔采样，即 $X[k] = X(e^{j\omega})|_{\omega=2\pi k/N}$ 。当采样点数足够多时，可以用 $X[k]$ 的包络近似地认为是 $|X(e^{j\omega})|$ （注意下标要进行对应转换）。

2、基于 Hamming 窗设计 FIR 滤波器

（1）确定 Hamming 窗口函数

Hamming 窗是最常用的窗口函数： $w[n] = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$ ， $0 \leq n \leq N-1$ 。

（2）基于 Hamming 窗设计 FIR 滤波器

设计截止频率为 ω_c 的 FIR 数字滤波器，需要将 Hamming 窗口序列 $w[n]$ 与理想滤波器的单位脉冲响应 $h_d[n]$ 相乘，得到 FIR 数字滤波器的单位脉冲响应 $h[n] = h_d[n]w[n]$ ，其中

$h_d[n]$ 可以表示为 $h_d[n] = \frac{\sin[\omega_c(n-\alpha)]}{\pi(n-\alpha)}$ ， $-\infty < n < \infty$ 。

3、基于 DFT 的数字滤波与信号恢复

将第（2）步所设计的 FIR 数字滤波器用于心电信号 $x[n]$ 的频率滤波，可以按照如下

顺序进行：a) 计算长度为 N 的心电信号 $x[n]$ 的离散傅里叶变换 $X[k]$ ；b) 计算补零的数字滤波器单位脉冲响应 $h[n]$ 的离散傅里叶变换 $H[k]$ ；3) 计算 $X[k]$ 与 $H[k]$ 的乘积 $Y[k] = H[k]X[k]$ ；4) 对 $Y[k]$ 进行离散傅里叶反变换 (IDFT)，得到滤波后的数字心电信号 $y[n]$ 。

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，实验报告的 Word 版需在 1 周内提交到教务处实验系统。