

【成绩】

【教师签名】

【实验目的】

1. 掌握FFT算法的基本原理;
2. 掌握FIR滤波器的原理和窗函数设计法;
3. 掌握用C语言编写DSP程序的方法;
4. 掌握CCS使用观察窗口查看变量及用图形功能查看数据的方法。

【实验原理及内容】

一、快速傅里叶变换(FFT)实现

傅里叶变换是一种将信号从时域变换到频域的变换形式,是信号处理的重要分析工具。离散傅里叶变换(DFT)是傅里叶变换在离散信号系统中的表示形式。但是DFT的计算量非常大,FFT就是DFT的一种快速算法,FFT将DFT的 $N^2$ 步运算减少至 $\frac{N}{2}\log_2 N$ 步。

离散信号 $x(n)$ 的傅里叶变换可以表示为: $X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}$ ,  $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ 式中的 $W_N$ 称为蝶形因子,利用它的对称性和周期性可以减少运算量。一般,FFT算法分为时间抽取(DIT)和频率抽取(DIF)两大类,两者的区别是蝶形因子出现的位置不同,前者出现在输入端,后者出现在输出端。本实验以时间抽取方法为例。

时间抽取FFT是将 $N$ 点输入序列 $x(n)$ 按照偶数项和奇数项分解为偶序列和奇序列。偶序列: $x(0), x(2), x(4), \dots, x(N-2)$ ;奇序列: $x(1), x(3), x(5), \dots, x(N-1)$ 。

二、有限冲击响应滤波器(FIR)实现

数字滤波器是DSP的最基本的应用领域之一。对于许多应用来说,数字滤波一般具有如下的差分方程形式: $y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} a_k x(n-k) + \sum_{k=0}^{L-1} b_k y(n-k)$ 。若式中的所有 $b_k$ 均为零,且通常把系数 $a_k$ 记为 $h_k$ ,则: $y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h_k x(n-k)$ ,即FIR滤波器的差分方程。FIR滤波器最主要的优点是它有反馈回路,因此它是无条件稳定系统。它的单位脉冲响应 $h(n)$ 是一个有限长序列。FIR滤波算法实际上是一种乘法累加运算,它不断地输入样本 $x(n)$ ,经延时 $(n-1)$ ,做乘法累加,再输出滤波结果 $y(n)$ 。

要设计一个FIR滤波器就是要要求它的冲击响应系数 $h(n)$ ,设计方法主要有窗函数法和频率抽样法,本实验要求掌握窗函数法,这也是最基本的方法。

理想的低通滤波器的频率响应 $H_d(\omega)$ 是一个矩形,这意味着它在时域上是无限长的序列,这在实际上是不可能实现的。因此我们要采取某种方法截断 $H_d(n)$ ,可用一个有限长的窗函数序列 $w(n)$ 与之相乘。这个窗函数序列的形状和长度都会对最后系统的频率响应特性产生影响,因此对窗函数的分析和选择是设计FIR滤波器的关键问题所在。



## 【实验设备】

1. 一台装有CCS软件的计算机:

2. ~~DSP~~

## 【实验方案及步骤】

### 一、快速傅里叶变换(FFT)实现.

1. 在CCS环境下打开本实验的工程(Ex4-3.pjt);
2. 编译并重建".out"输出文件,然后通过仿真器把执行代码装载到DSP芯片中;然后运行该程序;
3. 观察原程序的输入信号序列的波形(单位指数函数),以及经DFT变换后的输出序列"y.re"的波形;
4. 更改代码,  $N$ 仍然取256, (将输入)分别观察输入信号  $x$  分别为余弦函数(幅度为1, 频率为  $f_s/64$ )、混合信号(含有幅度为2的直流信号, 幅度为3频率为  $f_s/64$  的余弦信号, 幅度为1.5频率为  $f_s/8$  相位为  $180^\circ$  的余弦信号)、三角波函数(幅度为1, 频率为  $f_s/64$ )、方波函数(幅度为1, 频率为  $f_s/64$ )的波形, 记录输出序列"y.re"波形的前3个 ~~采样值~~ 的坐标点, 并记录理论值, 与实验值相比较.

### 二、有限冲击响应滤波器(FIR)实现.

1. 在CCS环境下打开本实验的工程(Ex4-5.pjt);
2. 编译并重建".out"输出文件, 然后通过仿真器把执行代码装载到DSP芯片中; 然后运行该程序, 观察原程序的图形;
3. 从1-5依次修改  $m$  的值, 依次观察  $hd$ 、 $h$ 、 $w$ 、 $db$ 、 $dd$  的图形 ( $hd$ 、 $h$ 、 $w$  数据块大小取21,  $db$ 、 $dd$  数据块大小取300,  $dd$  为新增变量, 便于作线性对比);
4. 在main函数外增加输入和输出序列的定义: `float x[300]; float y[300];`
5. 在main()函数中对  $x$  和  $y$  赋值: ( $nc = \text{截止频率}/(f_s/2)$ ) 下面的  $x$  即为截止频率  $nc$  和  $4$  倍截止频率的两个幅度均为1的信号的重叠;
6. 用FIR滤波器对输入信号  $x$  进行滤波, 输出信号为  $y$ ;
7. 查看输入信号  $x$  和输出信号  $y$  的波形及其频谱 (看频谱与看波形的操作相似, 只是"Display Type"项选"FFT (Mag) Magnitude");
8. 改变输入信号  $x$  中的第二个分量的频率分别为:  $2$  倍截止频率、截止频率、 $\frac{1}{2}$  截止频率, 观察滤波效果.



## 【实验电路图】

### 【实验数据处理及分析】

1. 为观察幅度为1, 频率为 $\frac{1}{32}$ 的余弦函数的输入序列波形及经DFT变换后的输出序列“y\_re”的波形, 需要改其原代码为“x\_re[i]=2+3\*cos(pi\*i/32)+1.5\*cos(pi\*i/4+pi);”, 观察频谱图的前3个直流分量的频率与幅度分别为: 频率0, 幅度2; 频率 $\frac{1}{32}$ , 幅度3; 频率 $\frac{1}{8}$ , 幅度1.5, 相位 $180^\circ$ .

实验值=理论值:  $f_1=0, V_1=512 \times \frac{1}{256}=2; f_2=4 \times \frac{1}{256}=\frac{1}{64}, V_2=384 \times \frac{2}{256}=3; f_3=32 \times \frac{1}{256}=\frac{1}{8}, V_3=-192 \times \frac{2}{256}=-1.5$ .

2. 修改输入信号为三角波: 3. 修改输入信号为方波:

```
if((i/32)%2==0)
{x_re[i]=(float)(16-i%32)/32;}
else
{x_re[i]=(float)(16-i%32)/32;}
if((i+16)%32==0)
{x_re[i]=0;}
else if((i+16)%64<32)
{x_re[i]=0.5;}
else
{x_re[i]=-0.5;}

```

前3个直流分量频率与幅度的理论值分别为: 实验值

实验值分别为: ①  $f_1=4 \times \frac{1}{256}=\frac{1}{64}, V_1=51.9181 \times \frac{2}{256}=0.4056$ ; ②  $f_1=4 \times \frac{1}{256}=\frac{1}{64}, V_1=31.4219 \times \frac{2}{256}=0.6361$   
 ③  $f_2=12 \times \frac{1}{256}=\frac{3}{64}, V_2=5.8059 \times \frac{2}{256}=0.0454$ ; ④  $f_2=12 \times \frac{1}{256}=\frac{3}{64}, V_2=26.9659 \times \frac{2}{256}=-0.2107$   
 ⑤  $f_3=20 \times \frac{1}{256}=\frac{5}{64}, V_3=2.117 \times \frac{2}{256}=0.0165$ ; ⑥  $f_3=20 \times \frac{1}{256}=\frac{5}{64}, V_3=15.9689 \times \frac{2}{256}=0.1248$   
 理论值分别为:  $f_1=\frac{1}{64}, V_1=0.5$ ; ⑦  $f_1=\frac{1}{64}, V_1=1.273; f_2=\frac{3}{64}, V_2=-0.424; f_3=\frac{5}{64}, V_4=0.251$ .

### 【实验结论】

1. 比特反转寻址方式是一种根据特定规则对内存地址进行重新映射的方法，该规则将原始地址的二进制位顺序进行反转。在进行FFT计算时，这种寻址方式与算法内在的数据访问模式相匹配，从而优化了数据访问效率，减少了不必要的数据移动，进而加快了整个FFT运算的速度。
2. 要实现实数序列的FFT，首先需将实数序列转化为复数序列，然后使用常规的FFT算法（如Cooley-Tukey算法、Radix-2等）对转化后的复数序列进行计算，最后由实数序列的FFT结果的特定的对称性进行处理。
3. 实数序列的FFT可以在复数序列的算法基础上再作一些优化，如半精度计算、混合-radix算法、重叠保存与计算、利用流水线技术等。

### 【思考题】

1. 答：①等效。  
②波形图：描述信号的时域特性，显示了信号随时间的变化，可以直观地看到信号的振幅、频率、周期等基本特征，但信号复杂时不利于观察和取值。  
③频域图：描述信号的频域特性，可以分析信号的谱线、频带、功率密度等特点，当信号复杂时，能得到更加精细详尽的频域信息，更便于滤波。
2. 答：①  $\omega_c$  是截止频率 ( $f_s/2$ )，是理想低通滤波器的截止频率，即FIR滤波器的通带和阻带截止频率的中点。  
②  $h(n)$  是冲击响应系数。  
③  $db(\omega)$  是加窗后的幅频响应。