

中文摘要

本系统以 STM32F407 为核心控制芯片，对输入的信号相加混合之后，调用 DSP 库中的 FFT 分析频谱成分，之后通过预先设计好的数字 FIR 滤波器，进行分辨和分离处理。最后通过 DAC 还原出两路信号。另外，本系统添加了 TFT-LCD 显示模块，可以直观显示出频谱成分。本系统主要有五个模块组成：加法器电路、采样滤波输出模块、电源电路模块、单片机控制电路及显示模块。其中电源模块达到使用移动电源供电要求，由两节干电池供电。

关键词：FFT; FIR 数字滤波器; ADC 采样; DAC 还原; DSP 库

1 系统方案

1.1 方案比较与选择

(1) 加法器设计

方案一：根据叠加定理，当有多路信号输入时，反相或同相放大电路可构成加法电路。其中同相加法器的输入阻抗大，输出阻抗小；输出电压反相，需要负电源。且由于运放同相端电位不为 0，同相加法电路存在共模电压，将会在输入信号间引入串扰，从而影响输出精度。

方案二：反相加法器，输入阻抗小，输出阻抗大，且由于运放反相端为虚拟地，可保证输入信号间不会发生串扰。同时为了避免直流电源噪声的影响，我们使用电池配合线性稳压管为加法器电路供电。

综合考虑，本设计选用方案二。

(2) 分离电路设计

方案一：该方案主要使用了锁相环（PLL）的工作原理。首先采样混频信号，计算 FFT，得出频率成分。再通过 PD 鉴相器和环路滤波器，反馈控制信号的频率和相位。由 VCO 压控振荡器进行频率合成。其中的输入信号源由混频周期信号通过施密特整形再分频析出，确保输入输出信号的同源。该方案难于控制相位。

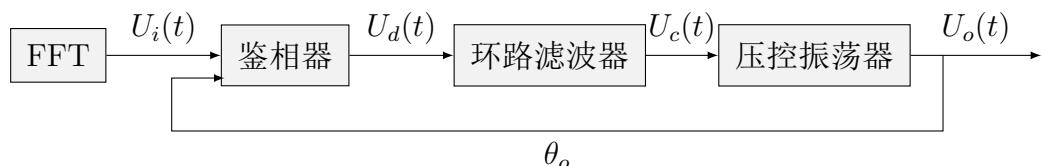


图 1: 分离电路方案一

方案二：该方案主要使用了 DDS 的工作原理，DDS 的晶振由混频周期信号通过施密特整形、分频、倍频后提供。由 FFT 分析出混频信号频率成分后由 DDS 输出。通过 DDS 的 PA 相位累加器可以生成一系列以 5kHz（或 10kHz）为基波的正弦或三角波，通过控制延迟产生可控的相位差。硬件电路复杂，软件需要大量的调试校准。

方案三：通过设计一系列数字带通滤波器，对输入的混频信号进行滤波处理。滤波可以保证信号同源，可以稳定显示波形。通过 AD 采样再用 DAC 还原出信号，实现信号的分离。该方案需要首先通过 FFT 测量频率成分，选择匹配的数字滤波器系数从而滤波。通过数字滤波器还可以产生相移。该方案对于含有奇次谐波的三角波较难实现滤波效果。该方案硬件电路较为简单，易于实现。

综合考虑，本设计选用方案三。



图 2: 分离电路方案三

1.2 方案总体描述

本系统主要有五个模块组成：加法器电路、采样滤波输出模块、电源电路模块、单片机控制电路及显示模块。系统总体框图如图 3 所示。

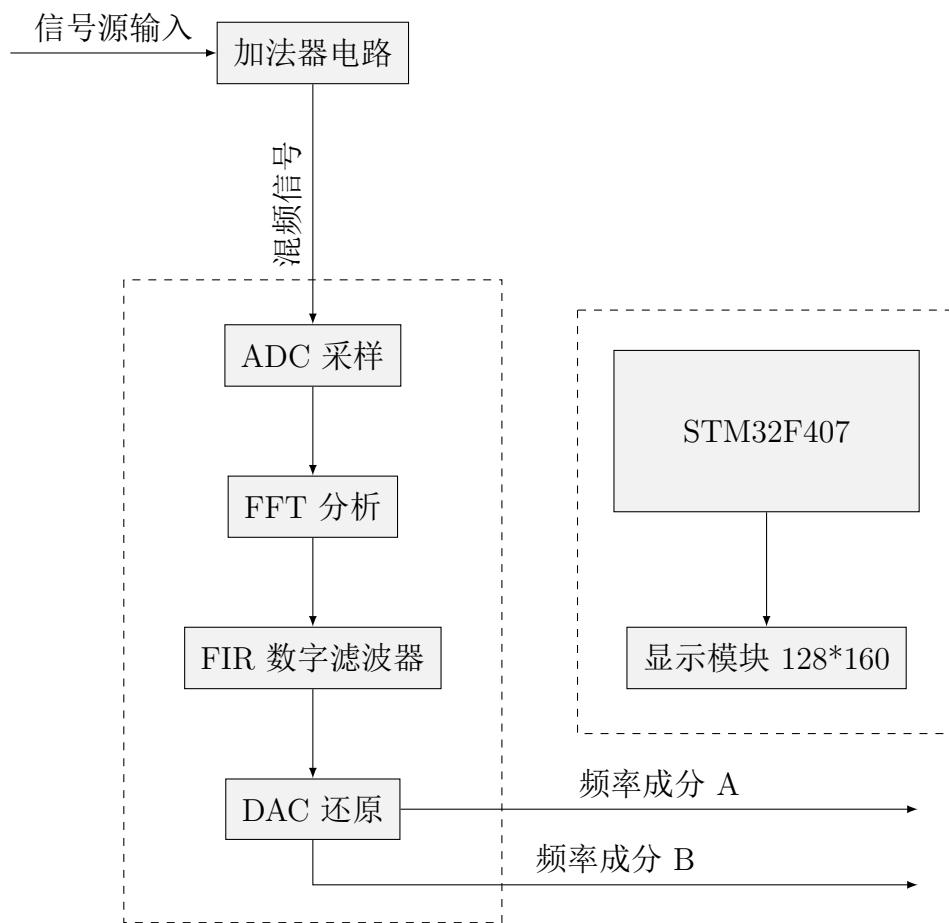


图 3: 系统框图

2 理论分析与计算

2.1 加法器电路分析与计算

加法器有同相和反相两种接法，由于同相加法器输入阻抗高，两个信号可能会互相影响。当选用反相加法器时，因为加法器输入阻抗低，不管是 A 端，还是 B 端信号，更容易流入加法器，而不会影响其它支路的正常使用。故此处选用选择反相加法电路，如图 4。

根据题目要求 $C=A+B$ ，增益为 1，由公式 1 可以计算得出 $R_2 = R_3 = R_4$ ；在实际测试中发现电阻太小时 C 端输出失真严重，故增大电阻到 51k。

$$u_o = -\frac{R_4}{R_2}u_1 + \frac{R_4}{R_3}u_2 \quad (1)$$

由于此处题目要求使用移动电源供电，相比较于充电宝造成大的噪声影响来说，干电池在此处更加适合，并且此处通过线性稳压器 LM317 和 LM7905 将干电池的电压稳定到了正负 5V，避免了电源波动造成的影响。

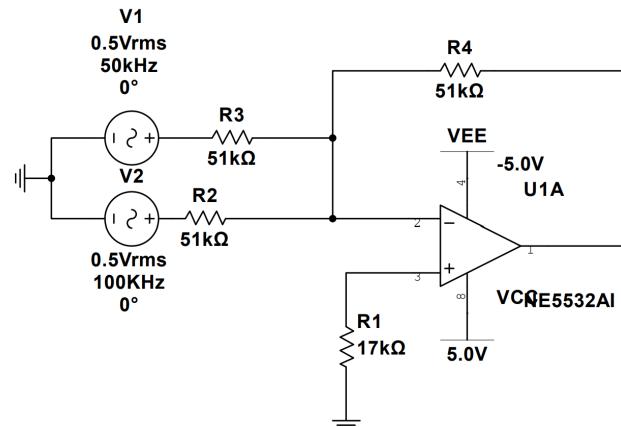


图 4: 加法器电路

2.2 数字滤波器分析

数字滤波器可以处理 AD 采样得到的数字信号。与模拟滤波器相比，数字滤波器更容易设计、更加精确和稳定。数字滤波器可以在单片机或 DSP 芯片中进行编程实现。其中的 FIR 数字滤波器阶数高，可以保持线性相位，滤波效果好。

采样时，需要满足采样定理，在本题中要求频率达到 100kHz，所以采样频率至少需要达到 200kHz。在实际工程中，采样频率要达到 500k 左右才能满足设计要求。

采样的分辨率公式如式 2，所以在采样率尽可能大的情况下，我们需要尽可能多地增加采样点数。这又与单片机 ROM 内存小的实际情况相冲突。所以在这种情况下，选择合适的窗函数就对滤波的实际情况有很大影响，滤波器的参数指标选择并非理想滤波效果越优异越好。

$$\text{采样率} = \frac{\text{分辨率}}{\text{采样点数}} \quad (2)$$

在本题中，信号之间的频率差异较小，模拟滤波器很难实现，故采用数字滤波。通过 MATLAB 生成指定阶数的 Kaiser 窗带通滤波器系数，通过时域卷积从而滤波，得到的结果再通过 DAC 还原成原始的模拟值。

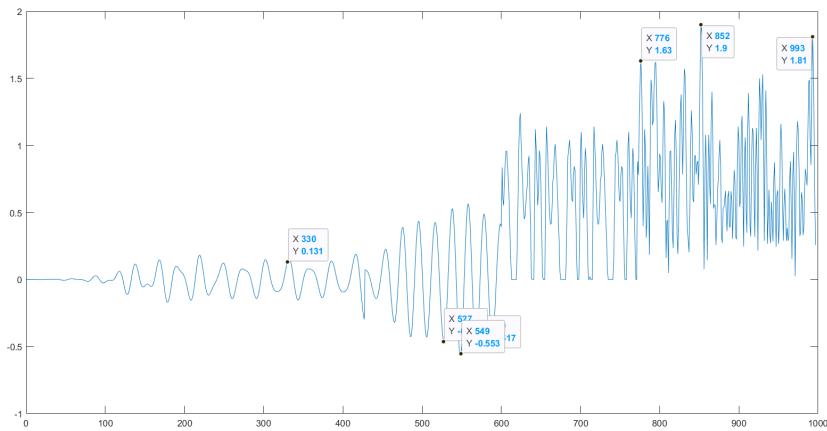


图 5: 窗函数示例

3 程序设计

频率域分析是将信号从时域（时间域）转换到频域（频率域）的过程。对于两个不同频率的正弦波，它们在频率域上的频谱图上会出现两个峰值，分别对应两个不同的频率成分。通过频率域分析，我们可以提取出这两个频率成分，从而分离两个不同频率的正弦波。

对于混合信号，我们使用 stm32 单片机官方的 DSP 库对其进行 FFT 运算，从而得到这两个的频率，要完成这个功能主要需要使用到的函数有：

```
arm_rfft_fast_instance &S;
//定义结构体 S;
arm_rfft_fast_init(&S,int a);
//初始化结构体，a 为 fft 点数;
arm_rfft_fast_f32(&S,float32_t *iinput,float32_t *output,ifftflag);
```

```

//进行 fft 运算;
arm_cmplx_mag_f32(float32_t *output, float32_t *mag, a/2);
//进行频谱的幅值运算;

```

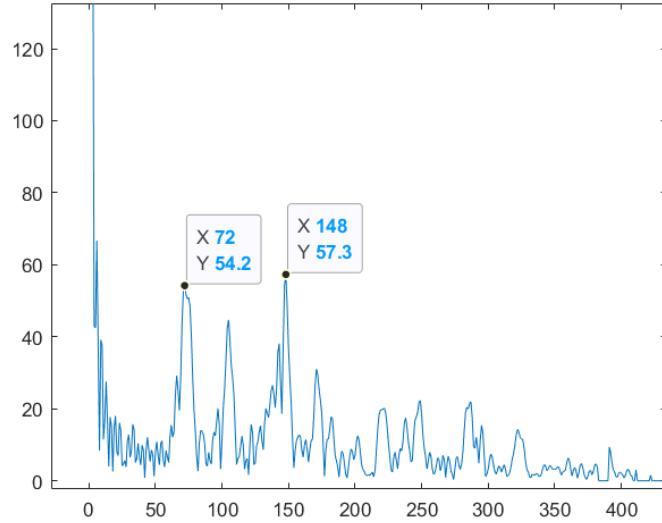


图 6: FFT 运算结果

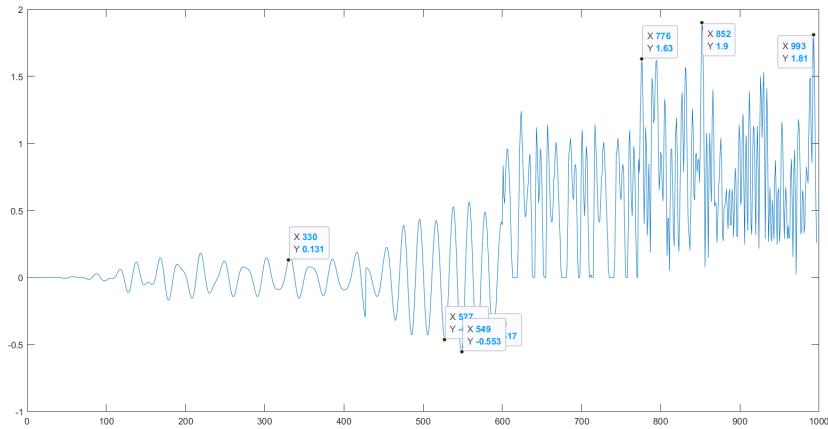


图 7: 窗函数滤波结果

对得到的 mag 数组取最大峰和次大峰可以得到进入的混合信号的频率，从而选择合适的窗函数。对于两个正弦信号，可以使用取峰值的函数得到频率，而三角波由多次谐波组成，需要更复杂的判断函数进行判断。

而对于数字滤波器，我们可以使用 matlab 应用中的 filterDesigner 工具设计窗函数，并将其导出.h 文件，将文件导入到 IAR 函数中，在 FFT 得到频率大小后，就可以判断使用哪一个窗函数进行滤波，滤波的主要函数如下：

```

arm_fir_instance &S;
//定义结构体;
arm_fir_init_f32(&S, int BL,float32_t *B,float32_t *pState,int block);
//初始化结构体;
arm_fir_f32(&S,float32_t *input,float32_t *output,block);
//滤波函数

```

4 测试方案与测试结果

4.1 测试仪器清单

测试仪器清单如表 1 所示。

| 序号 | 仪器名称 | 型号 | 指标 | 生产厂家 | 数量 |
|----|---------|-----------|--------|----------|----|
| 1 | 数字示波器 | MSO2302A | 300MHz | RIGOL | 1 |
| 2 | 函数信号发生器 | DG4162 | 160MHz | RIGOL | 1 |
| 3 | 直流稳定电源 | GPS-4303C | 30V/3A | GWINSTEK | 1 |

表 1: 测试仪器清单

4.2 加法器功能测试

4.2.1 测试方法与测试条件

用函数信号发生器输出两路不同频率、峰峰值为 1V 的正弦波信号，将两路信号接入到加法器的 A、B 输入端口，之后将示波器接到输出的 C 端口测试点，观察输出的波形情况。

4.2.2 测试数据

测试不同频率的正弦波叠加后的信号的频率，测试结果如表 2 所示。

| 信号 A 频率 | 信号 B 频率 | 信号 C 频率 | 信号 A 频率 | 信号 B 频率 | 信号 C 频率 |
|---------|---------|----------|---------|---------|----------|
| 50kHz | 100kHz | 50.25kHz | 50kHz | 60kHz | 10.08kHz |
| 30kHz | 70kHz | 34.20kHz | 80kHz | 20kHz | 20.11kHz |
| 40kHz | 30kHz | 9.96kHz | 40kHz | 20kHz | 19.84kHz |

表 2: 测试仪器清单

4.2.3 测试结果分析

经过对题目给定的系列频率的系列测试，输出波形稳定，呈现周期性波形特征；无明显失真，基本符合设计要求。

4.3 数字滤波器功能测试

4.3.1 测试方法与测试条件

用函数信号发生器输出两路不同频率的正弦波，通过加法器电路合成混频信号，由单片机进行 ADC 采样、FFT、FIR 滤波、DAC 还原。设置信号 A 或 B 为示波器的触发源，调节水平扫描速度使得示波器上显示 48 个周期的信号 A 波形，观察信号 A' 的波形是否与信号 A 同频率、不失真、稳定显示不漂移。

4.3.2 测试结果分析

通过多次测试发现结果不太理想，在多次调试代码后仍未达到预期效果，我们推测是对单片机的 ROM 内存没有恰当使用，导致栈溢出。我们多次调节窗函数的阶数和采样点数，想要找到一个合适的窗和采样数组，在保证其分辨率满足要求的前提下，尽可能彻底地滤除杂波。在四天的实践中，我们成功对一个进入单片机的混频信号实现了软件自动识别其频率功能，但在后续增加滤波功能时，单片机的内存基本不能满足要求。之后我们会继续改进。