

信号分离装置

摘要：本设计实现了一种信号分离装置，具有分离和合成输入信号的功能，同时可以控制分离出的两信号的相位差。系统由主控制器 STM32F407、加法器模块、AD（模数转换）模块、DA（数模转换）模块四部分组成。主控 STM32F407 的 AD 部分输入加法器模块合成的输入信号，然后 STM32 再对混合信号进行 DFT 处理，分析得到两路信号的频率和相位参数；双路 DAC 模块利用主控分析得出的参数，重建输出信号。经测试，本系统能够稳定地对正弦、三角信号进行分离，失真度低，重建信号稳定无漂移，同时初相位可在 $0 \sim 180^\circ$ 范围控制，精度可达 1° 。

关键词： 信号分离；实时信号同步；离散傅里叶变换；DAC 输出

一、系统方案

1. 方案比较与选择

1.1 信号分离方案

方案一：直接使用等精度频率计测得原信号频率，复原其中一个信号后，在此基础上通过位移与信号相减，得到另一频率下的信号。

方案二：首先使用滤波器滤除信号噪声，再采用 FFT（快速傅里叶变换），在频域上分离信号 A 和信号 B 分离得到频率与类型信息，传入 DDS（数字信号合成）模块，将把分离的信号变换到时域，实现输出分离的信号。

方案三：利用 DFT（离散傅里叶变换）直接计算指定频点上的频域值（含幅度谱值和相位谱值），同时利用功率谱判断信号频率，则可以利用相位关系对特定频率的信号实时校准。

方案选择：方案一难以分辨测得的信号类型，且难以复原同相信号进行相减去除处理；方案二，需要抽样频率为信号频率的整数倍，抽样点数包含整周期，要求采样率 f_s 是一个非常精确的小数，实现困难，并且难以校准相位，容易发生漂移；方案三，DFT 对算力要求较低，并且可以准确地对不同频率的信号相位进行实时调节，相位精度较高，不易漂移，并且减少了三角波在奇次谐波上的谐波失真与基频信号的叠加对功率谱的影响。综合考虑，选择方案三进行信号分离。

1.2 信号重建方案

方案一：DDS 重建信号。利用 DDS 模块，直接对寄存器写入采集到信号参数，生成需要的特定频率和波形的信号，同时计算相位关系，控制 DDS 生成信号的相位，抑制偏移现象。

方案二：DAC 重建信号。利用 DDS 模块，利用存储的三角函数值，生成需要的特定频率和波形的信号，同时通过延时控制相位关系，抑制偏移现象。

方案选择：方案一，操作简单，但是需要 DDS 有两路输出，并且对相位精度要求较高；方案二，操作较为复杂，需要控制定时器进行精准延时，但可以准确控制相位，实现相位的对齐。综合考虑，使用方案二。

2. 方案描述

2.1 系统框图

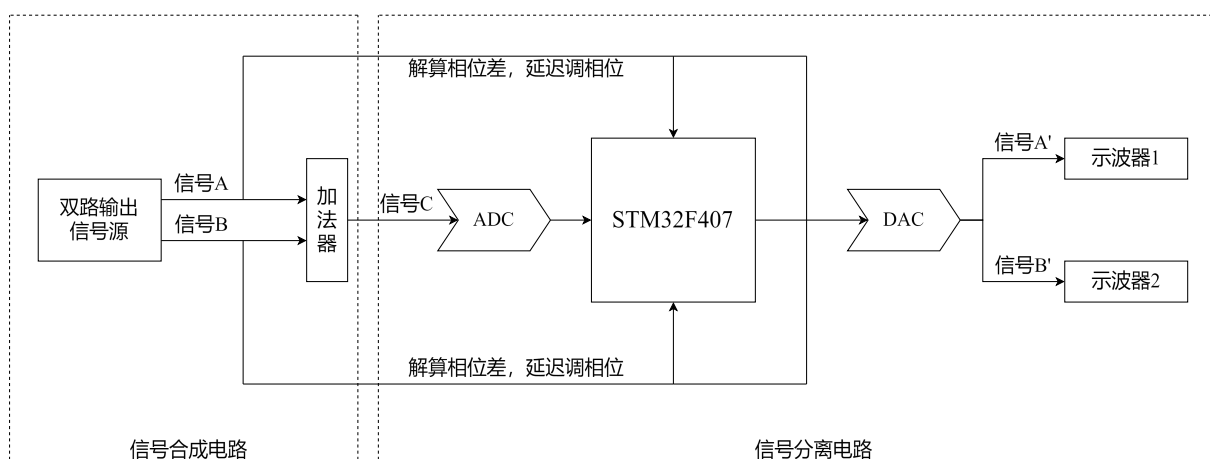


图 1 系统框图

2.2 总体思路

系统框图如图1所示。本系统信号处理部分主控采用 STM32F407。双路输出信号源块输出 2 路周期信号 A 和 B，通过加法器后得到混合信号 C；分离电路中，混合信号 C 经过 STM32F407 内部 ADC 模块转化为数字信号，调用 STM32 中 168M 时钟资源进行数据采集，并进行调理；将得到的信号进行 DFT（离散傅里叶变换），得到特定频谱上的信号，进行分析，得到信号的频率与类型信息，同时确定重建信号 A' 与原信号 A、重建信号 B' 与原信号 B 的相位差，然后利用查表法和 STM32F407 内部 DA 模块生成特定的波形，再将得到的相位差对生成的波形进行相位的矫正，从而实现连续稳定同频显示。

二、理论分析计算

1. 信号分离理论分析

1.1 信号测量理论分析

STM32 以 1MSPS 的采样率进行 AD 和 DA 转换，同时将采样点固定为 1000 个（即采集时长为 1ms 的信号）。由于信号频率只会为 5kHz 的整数，即 5kHz、10kHz、15kHz.....95kHz、100kHz，所以只需要生成十九种正弦信号 $S_{j,i}$ 和十九种余弦信号 $C_{j,i}$ ：

$$\begin{cases} S_{j,i} = \sin(2\pi \times j \cdot 10^3 \times i) \\ C_{j,i} = \cos(2\pi \times j \cdot 10^3 \times i) \end{cases} \quad (1)$$

其中，i 为 0 到 999 之间的整数， $\{S_{j,i}\}$ 是长度为 1000 的频率为 $j \cdot 10^3$ 的正弦序列信号， $\{C_{j,i}\}$ 是长度为 1000 的频率为 $j \cdot 10^3$ 的余弦序列信号。

首先，对 C 信号实施长度为 $L=1000$ 个采样点，历时 1ms 的采样。采样结果记为 $\{T_i\}$ 。其中， i 为 0 到 999 之间的整数， $\{T_i\}$ 为长度为 1000 的混合序列信号。利用采样结果分别与 19 种不同频率的信号进行乘法运算，结果分别记为 SC_j 与 CC_j ：

$$\begin{cases} SC_j = \sum_{i=0}^{L-1} T_i \times S_{j,i} \\ CC_j = \sum_{i=0}^{L-1} T_i \times C_{j,i} \end{cases} \quad (2)$$

然后，计算功率谱 P_j ，最大和第二大的 P_j 所对应的频率 $j \cdot 10^3$ ，即为输入两个信号的频率：

$$P_j = SC_j^2 + CC_j^2 \quad (3)$$

1.2 信号判断理论分析

由于输入的信号确定为三角波或者正弦波，利用三角波在奇次谐波上存在谐波分量的特性，所有选取三次谐波的能量进行计算，并将其与基频功率进行比较，当达到一定比例时就认为这些频点上存在谐波失真，也就是输入是三角波。所以采用 FFT 算法得到奈奎斯特频率以下的所有谱线功率。利用 DMA 控制 A/D 采样的长度增加到 1024. 计算出 FFT 长度为 1024 三次谐波谱线在 FFT 结果中的位置：

由于所需要的频点并不一定在整数点上，所以对频率谱线位置周边 3 个相邻点的功率进行求和。

并且当被测信号 C 中混合的 A、B 两个单频信号中的一个的频率刚好是另一个信号频率的 3 倍时（例如 A 为 10KHz，B 为 30KHz 时），低频信号的 3 次谐波会和较高频率信号的能量混淆在一起，从而使算法是无法判断低频信号是三角波还是正弦波的。所以单独考虑特殊情况，当出现时，再考虑 5 次谐波。

2. 信号重建理论分析

2.1 相位控制理论分析

根据离散傅里叶变换（DFT）理论，由于 $\{S_{j,i}\}$ 和 $\{C_{j,i}\}$ 是正交的，上式两个计算结果之比等于实际信号中频率为 $j \cdot 1000Hz$ 的信号的初始相位 ϕ_i 的正切值。即可以通过下式计算初始相位：

$$\phi_i = \arctan \frac{S_{j,i}}{C_{j,i}} \quad (4)$$

根据该相位即可校准输入信号和重建信号。

表 1 奈奎斯特频率倍数与频率

| 频率 (KHz) | 奈奎斯特频率的倍数 | FFT 所在的位置 |
|----------|-----------|-----------|
| 30 | 0.06 | 30.27 |
| 45 | 0.19 | 46.08 |
| 60 | 0.12 | 61.44 |
| 75 | 0.15 | 76.8 |
| 90 | 0.18 | 92.16 |
| 105 | 0.21 | 107.52 |
| 120 | 0.24 | 122.88 |
| 135 | 0.27 | 138.24 |
| 150 | 0.3 | 153.6 |
| 165 | 0.33 | 168.96 |
| 180 | 0.36 | 168.96 |
| 195 | 0.39 | 184.96 |
| 210 | 0.42 | 199.68 |
| 225 | 0.45 | 215.04 |
| 240 | 0.48 | 230.4 |
| 255 | 0.51 | 245.76 |

三、电路与程序设计

1. 加法器模块电路设计

加法器模块电路如图2所示，保证波形不失真，能够被后端的 AD 模块稳定采集到。

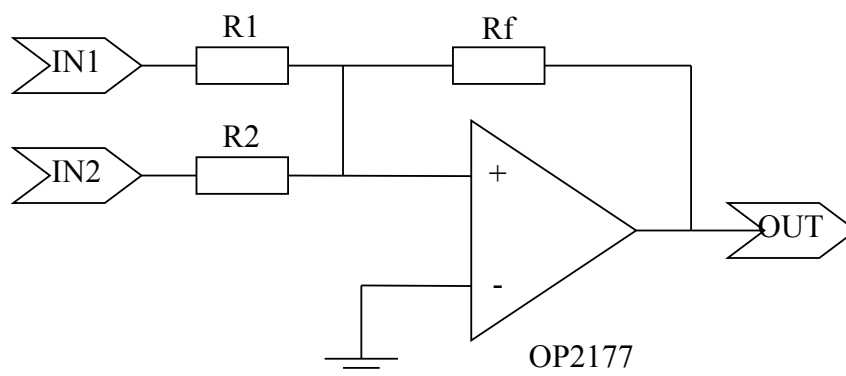


图 2 模拟加法器

2. 软件程序设计

系统框图如图3所示。

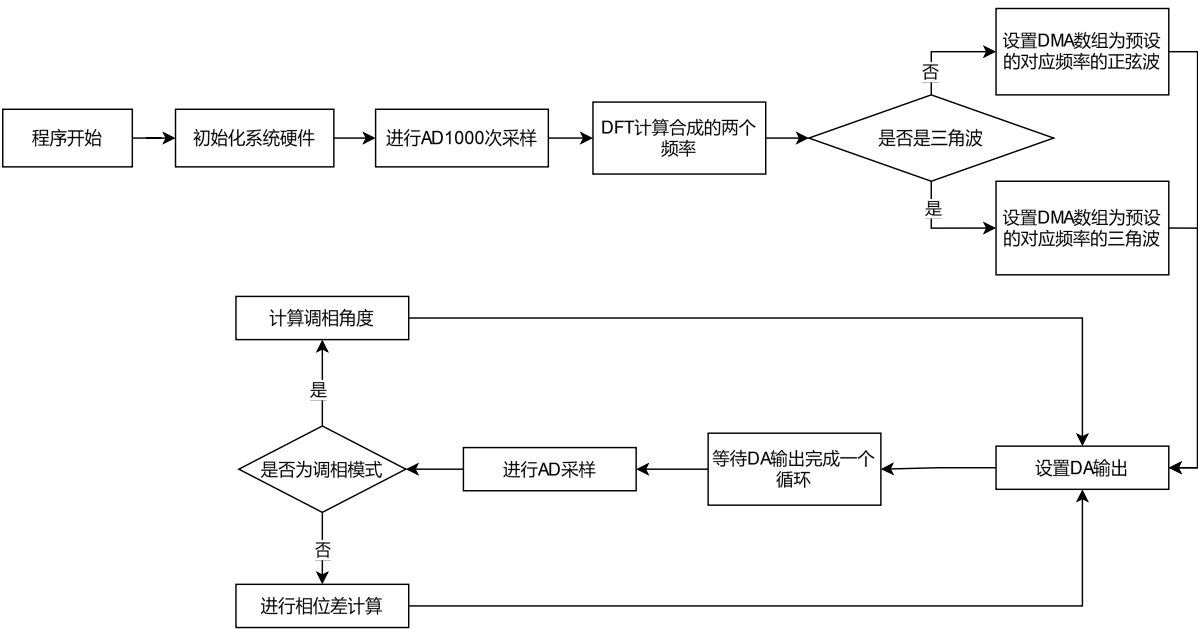


图 3 软件设计流程图

四、测试方案与测试结果

1. 测试环境

| 设备 | 品牌 | 型号 |
|-------|-----------------|------------------------|
| 示波器 | TELEDYNE LECROY | wavesurfer 3054 型数字示波器 |
| 信号发生器 | RIGOL | DG1062 型信号发生器 |
| 电源 | RIGOL | DP832 型稳压源 |

2. 测试方案

2.1 加法器增益测试方案

在频率为 10kHz 到 100kHz 的范围内，信号源产生峰峰值为 1V 的 A、B 两路三角波/正弦波信号，接入加法器输入端，测试输出端口的峰峰值；同时设置一路接地一路输出的测试组，用示波器检测输出信号的频率与峰峰值。

2.2 正弦波分离测试方案

在频率为 10kHz 到 100kHz 的范围内，信号源产生峰峰值为 1V 的 A 、 B 两路正弦信号，满足 $f_A < f_B$ ，且 f_A 、 f_B 为 10kHz 的整数倍，设置信号 A 为示波器触发源，观测信号 A' 波形是否与信号 A 同频率、不失真、稳定显示不漂移，峰峰值是否不小于 1V。

2.3 正弦波、三角波分离测试方案

在频率为 20kHz 到 100kHz 的范围内，信号源产生峰峰值为 1V 的 A 、 B 两路三角波/正弦波信号（不同时为正弦波），满足 $f_A < f_B$ ，且 f_A 、 f_B 为 5kHz 的整数倍，设置信号 A 为示波器触发源，观测信号 A' 波形是否与信号 A 同频率、不失真、稳定显示不漂移，峰峰值是否不小于 1V。

2.4 分离信号相位差控制测试方案

更改两路初始信号的初相位差，设置两路分离信号的相位差，用示波器测试两路分离信号的相位差并于设置的相位差进行比较。

3. 测试结果与数据

3.1 加法器增益测试

表 2 加法器增益测试表

| A 波形 | A 频率 | A 峰峰值 | B 波形 | B 频率 | B 峰峰值 | C 波形 | C 频率 | C 峰峰值 |
|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|----------|---------|
| 三角波 | 30kHz | 1V | 无 | 0 | 0 | 三角波 | 29.98kHz | 1.01V |
| 正弦波 | 50kHz | 1V | 无 | 0 | 0 | 正弦波 | 49.92kHz | 0.99V |
| 正弦波 | 35kHz | 1V | 正弦波 | 70kHz | 1V | \ | 35.02kHz | 2.04V |
| 正弦波 | 45kHz | 1V | 三角波 | 90kHz | 1V | \ | 44.98kHz | 1.98V |

3.2 正弦波分离测试

表 3 正弦波分离测试表

| A 频率 | B 频率 | A' 频率 | A' 峰峰值 | B' 频率 | B' 峰峰值 | 是否同频不漂移 | 是否失真 |
|-------|--------|----------|--------|----------|--------|---------|------|
| 20kHz | 30kHz | 19.98kHz | 1.49V | 30.24kHz | 1.49V | 是 | 否 |
| 50kHz | 70kHz | 50.02kHz | 1.48V | 70.04kHz | 1.51V | 是 | 否 |
| 80kHz | 90kHz | 79.99kHz | 1.53V | 89.98kHz | 1.49V | 是 | 否 |
| 90kHz | 100kHz | 90.03kHz | 1.52V | 99.87kHz | 1.48V | 是 | 否 |

3.3 正弦波、三角波分离测试

表 4 信号 A 正弦波、三角波分离测试表

| A 波形 | A 频率 | A' 波形 | A' 频率 | A' 峰峰值 | 是否同频不漂移 | 是否失真 |
|------|-------|-------|----------|--------|---------|------|
| 正弦波 | 25kHz | 正弦波 | 25.05kHz | 1.51V | 是 | 否 |
| 正弦波 | 85kHz | 正弦波 | 85.10kHz | 1.52V | 是 | 否 |
| 三角波 | 45kHz | 三角波 | 45.06kHz | 1.49V | 是 | 否 |
| 三角波 | 95kHz | 三角波 | 95.10kHz | 1.48V | 是 | 否 |

表 5 信号 B 正弦波、三角波分离测试表

| B 波形 | B 频率 | B' 波形 | B' 频率 | B' 峰峰值 | 是否同频不漂移 | 是否失真 |
|------|--------|-------|----------|--------|---------|------|
| 正弦波 | 35kHz | 正弦波 | 35.01kHz | 1.53V | 是 | 否 |
| 正弦波 | 95kHz | 正弦波 | 94.12kHz | 1.48V | 是 | 否 |
| 三角波 | 55kHz | 三角波 | 55.01kHz | 1.51V | 是 | 否 |
| 三角波 | 100kHz | 三角波 | 99.87kHz | 1.47V | 是 | 否 |

3.4 分离信号相位差控制测试表

表 6 正弦波分离测试表

| 初始信号相位差 | 分离信号相位差设置 | 分离信号相位差实际测试 |
|---------|-----------|-------------|
| 5° | 15° | 15.1° |
| 60° | 35° | 35.2° |
| 90° | 20° | 19.8° |
| 135° | 160° | 159.6° |

4. 测试结果分析

由测试结果可得: 当信号源产生两路范围在 10kHz 到 100kHz 的正弦波/三角波, 能够实现一个增益为 1 的加法器, 即 $C = A + B$; 当初始信号为两路正弦信号, 满足 $f_A < f_B$, 且 f_A 、 f_B 为 10kHz 的整数倍, 能正确分离出两路信号, 且信号 A' 的波形和信号 A 同频率、不失真、稳定显示不漂移, 峰峰值不小于 1V; 当两路信号为三角波/正弦波 (不同时为正弦波), 满足 $f_A < f_B$, 且 f_A 、 f_B 为 5kHz 的整数倍, 能正确分离两路信号且信号 A' 波形与信号 A 同频率、不失真、稳定显示不漂移, 峰峰值不小于 1V; 当设置分离信号的相位差时, 根据测试结果, 分离信号的相位差与初始信号相位差无关, 与设置的相位差值相等。

五、参考文献

- [1] 罗杰. 谢自美. 电子线路. 设计·实验·测试 (第五版), 2015, 电子工业出版社.
- [2] 康华光. 电子技术基础 (模拟部分) (第六版). 2013, 高等教育出版社.
- [3] [美] Bruce Carter. 运算放大器权威指南 (第四版) 2014, 人民邮电出版社.
- [4] 全国大学生电子设计竞赛组委会. 第十一届全国大学生电子设计竞赛获奖作品选编, 北京理工大学出版社.