

自适应滤波器

摘要：本设计实现的自适应滤波器，工作频率为 10kHz~100kHz，采用干扰抵消的方法，滤除特定的干扰信号，并在液晶屏上显示噪声特性。系统由加法器、移相器和自适应滤波器三部分组成，移相器由两级 0° ~ 180° 滞后移相电路级联组成，相移角度可以在 0° ~ 180° 手动可调。系统实现自适应滤波功能，最小可识别频率差为 8Hz 的信号，输出能有效还原有用信号的波形，且频率和幅度误差均小 10%，响应时间小于 1 秒。

关键词：自适应滤波器；噪声对消器；数字滤波器

一、系统方案

1. 方案描述

1.1 总体思路

系统通过前级加法器将干扰信号 B 混入有用信号 A，所得合成信号 C 经移相器进行一定的相移后得到混合信号 D，FPGA 经模数转换器对信号 D 和干扰信号 B 进行采集后，对采集数据计算处理，滤除信号 D 中的干扰信号成分后即可恢复有用信号 A。

1.2 系统框图

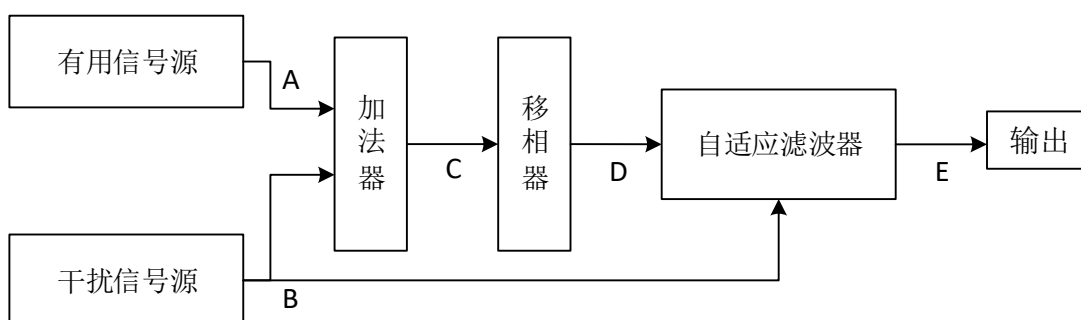


图 1 系统框图

二、理论分析与计算

1. 滤波器理论分析计算

经加法器合成的信号 C 含有有用信号 A 和特定角频率 ω 的干扰信号 B，经过移相器后得到信号 D，设信号 D 中干扰信号分量为 $B_d = |B| \cdot \cos(\omega t)$ ，干扰信号为 $B = |B| \cdot \cos(\omega t + \varphi)$ 。

本系统实现自适应滤波的原理：通过干扰信号 B 和混合信号 D 计算得到干扰信号 B 相对 B_d 的相位差 φ 后，通过数字延时模块对信号 B 延时相角 φ 从而得到与信号 D 中干扰信号分量 B_d 完全相同的信号，最后令信号 D 减去该信号即可还原信号 A。系统原理如图 2 所示。

得到相位差 φ 的算法：将输入信号 B 与输入信号 D 相乘，得：

$$\left[\dot{A} + |B| \cdot \cos(\omega t) \right] \left[|B| \cdot \cos(\omega t + \varphi) \right] = \dot{A} \cdot \cos(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2} |B|^2 \cdot \cos(2\omega t + \varphi) + \frac{1}{2} |B|^2 \cdot \cos(\varphi)$$

对滤波器的要求：本题要求干扰信号与有用信号频率差最小 10Hz，故 B 与 D 相乘后可得到一最低频率 10Hz 的包络信号，这要求直流低通滤波器在 10Hz 处有足够大的衰减。

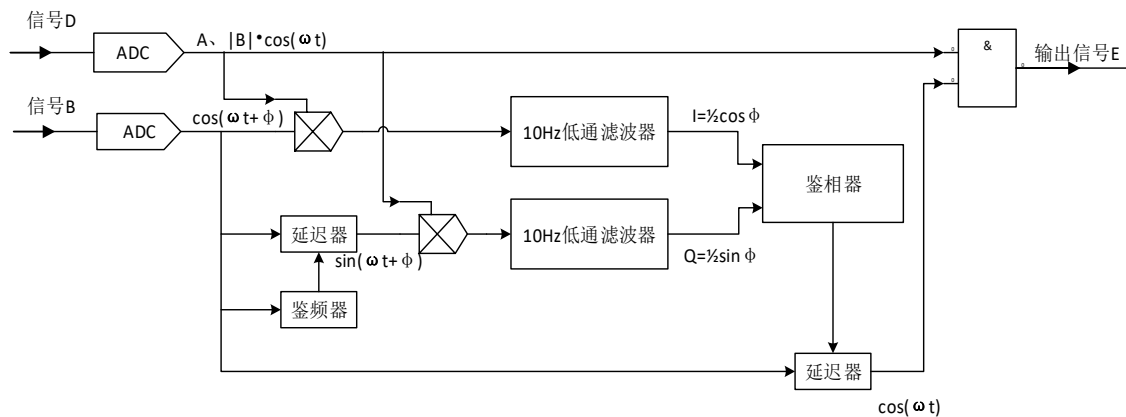


图 2 系统原理图

对 ADC 采样率的要求：本题要求在频率为 10kHz~100kHz 范围内干扰信号幅度衰减小于 1%，故对数字移相器分辨率达到 0.6° ，故对 ADC 采样率要求为：

$$f_s \geq \frac{360}{0.6} \times \frac{1}{10} = 60 \text{ MSPS}$$

本系统使用高速模数转换器 AD9288，采样率为 100MSPS 达到理论要求。

数字延迟器的实现方式：使用 FPGA 内部双口 RAM 实现。

三、 电路与程序设计

1. 加法器电路

加法器电路如图 3 所示。该电路实现 $V_C = V_{in_A} + V_{in_B}$ 功能。加法器运放选用超低噪声，高压摆率运放 OPA1612，该运放带宽增益积为 40MHz，满足 100kHz 信号的要求。由于输入信号频率最高为 100kHz，峰峰值最高为 2V，由 $S_R \geq 2\pi f V_{om}$ ，得 $S_{Rmin} = 0.628 \text{ V}/\mu\text{s}$ ，故 OPA1612 压摆率 $27 \text{ V}/\mu\text{s}$ 符合要求。

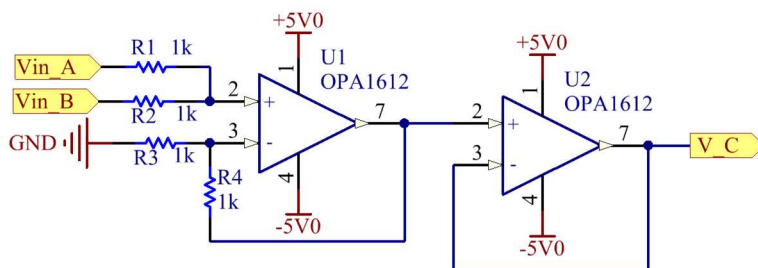


图 3 加法器电路

2. 移相器电路

移相器电路如图 4 所示。因在实际操作中，单级 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 滞后移相电路在边界值 180° 处难以达到，选择将两级 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 滞后移相电路级联构成。对第一级滞后移相电路分析如下：

$$\dot{U}_+ = \frac{1}{1+j\omega R_2 C} \quad , \quad \dot{U}_- = \frac{R_3}{R_1+R_3}\dot{U}_i + \frac{R_1}{R_1+R_3}\dot{U}_o$$

$$\dot{U}_+ = \dot{U}_- \quad , \quad H(j\omega) = \frac{2(1-j\omega R_2 C)}{1+\omega^2 R^2 C^2}$$

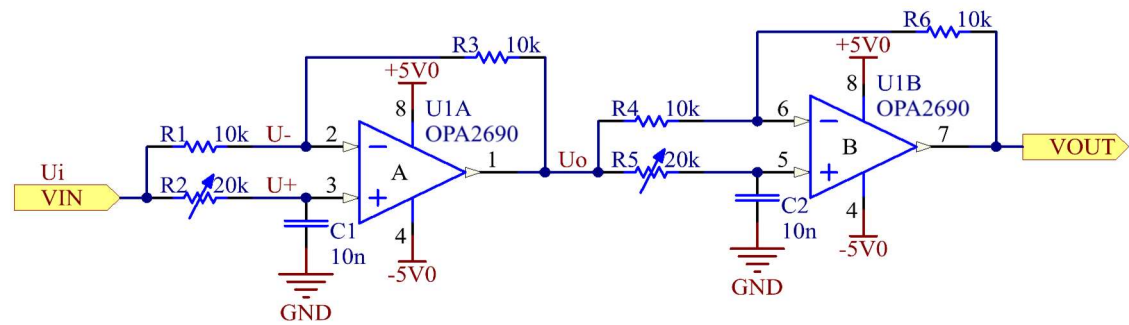


图 4 移相器电路

3. 软件程序设计

本系统主要流程在 FPGA 中完成，使用单片机处理浮点运算和显示系统信息，程序框图如图 5 所示：

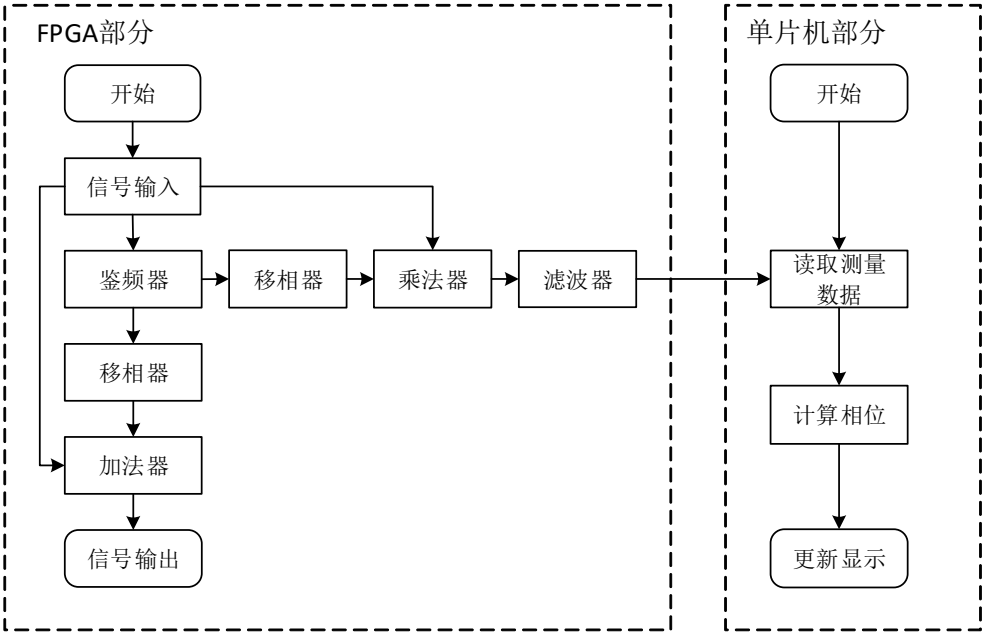


图 5 程序设计流程图

四、 测试方案与测试结果

1. 测试环境

示波器：Tektronix MSO 2002B 数字示波器；
扫频仪：RIGOL DSA1030A 数字频谱分析仪(9kHz~3GHz)；
电 源：DF1731SL1ATA 稳压源。

2. 测试方案

1) 移相器测试方案

断开前级加法器与后级调理电路，输入峰峰值为 4V，频率为 10kHz 的正弦信号，手动调节电位器，观察输出信号与输入信号的相位差检验其是否满足 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 的调节范围。改变输入信号频率和幅值，重复上述操作。测试结果如表 1 所示。

2) 自适应滤波器测试方案

将经加法器和移相器调理后的信号 D 和干扰信号 B 输入自适应滤波器，观察自适应滤波器输出信号 E 的波形，比较信号 E 和有用信号 A 的幅度和频率，计算出误差是否在频率允许范围内。之后断开有用信号 A，测量输出信号的幅度，以检验对 B 信号的衰减是否符合要求，同时降低示波器水平扫描速度，使示波器能够观测 1~2 秒 E 信号包络幅度的变化。测量其从加入信号 B 开始，至幅度衰减 1%的时间，得到滤波器电路的响应时间。测量结果如表 2 所示。

3. 测试结果与数据

3.1 移相器测试

表 1 移相器测试表

输入信号频率 /kHz	输入信号峰峰值 /V _{pp}	输出信号频率 /kHz	输出信号峰峰值 /V _{pp}	增益	最小不失真相位差 Φ_{\min}	最大不失真相位差 Φ_{\max}
10	4	10.08	4.02	1.005	265m°	179.6°
10	2	10.06	2.04	1.020	234m°	179.8°
30	4	30.02	3.98	0.995	365m°	179.4°
30	2	30.01	2.01	1.005	177m°	179.9°
50	4	49.95	3.92	0.980	323m°	179.6°
50	2	49.97	1.96	0.980	252m°	179.2°
70	4	69.89	3.88	0.970	199m°	179.3°
70	2	69.82	1.92	0.960	222m°	179.8°
100	4	99.79	3.79	0.948	78m°	179.5°
100	2	99.81	1.89	0.945	82m°	179.8°

3.2 自适应滤波器测试

表 2 自适应滤波器测试表

输入信号 A 频率 /kHz	输入信号 B 频率 /kHz	输入信号 A 峰峰值 /Vpp	输入信号 B 峰峰值 /Vpp	输出信号 E 频率 /kHz	频率相对误差 /%	输出信号 E 峰峰值 /Vpp	峰峰值相对误差 /%
10	10.001	1	1	10.25	2.5	1.09	9.0
10	10.010	2	2	10.42	4.2	2.12	6.0
30	29.999	1	1	31.25	4.2	1.04	4.0
30	30.010	2	2	32.04	6.8	2.13	6.5
50	49.999	1	1	54.39	8.8	1.05	5.0
50	50.010	2	2	53.46	6.9	2.04	2.0
70	69.999	1	1	75.23	7.5	1.09	9.0
70	70.010	2	2	76.22	8.9	2.18	9.0
90	89.999	1	1	95.21	5.8	1.10	10.0
90	90.010	2	2	94.32	4.8	2.17	8.5
100	99.999	1	1	106.65	6.7	1.09	9.0
100	100.010	2	2	108.82	8.8	2.16	8.0

表 2 自适应滤波器测试表 续表

输入信号 A 频率 /kHz	断开 A 后输出信号幅值/Vpp	对 B 的幅度衰减/%	响应时间/ms
10	0.0082	0.82	725
30	0.0073	0.73	682
50	0.0035	0.35	568
70	0.0164	0.82	658
90	0.0152	0.76	687
100	0.0128	0.64	852

4. 测试结果分析

- 移相器误差：由于一级移相器无法达到理论上的 0~180° 相移，故需两级电路级联。电路规模的增大导致分布参数对系统传递函数的影响变大，致使在通带内系统传递函数无法稳定为 1，在某些频点会有增益或衰减。

- 测试结果分析：由表 1 可以看出加法器设计满足题目要求。由表 2 可以看出在频率范围为 10kHz~100kHz 的各点频上，移相器可实现相位 0~180° 手动调节，且移相器幅度放大倍数控制在 0.945~1.020，满足题目要求。由表 3 可以看出自适应滤波器输出信号 E 能够比较好地恢复信号 A 的波形，信号 E 与 A 的频率和幅度误差均小于 10%。滤波器对信号 B 的幅度衰减小于 1%，符合题目要求。

五、 参考文献

[1]. 严国萍、龙占超，《通信电子线路》，2006 年 2 月，科学出版社；

[2]. 康华光，电子技术基础（模拟部分）（第六版），2005 年 7 月，高等教育出版社。