

心电信号处理电路设计仿真实验报告

引言

要设计心电信号处理电路，首先要了解心电信号的特点。心电信号主要特点如下：

- 微弱性。至多为mV量级，最小在 μ V量级。
- 低频特性。心电信号的能量在几百赫以下。
- 高阻抗特性。人体作为信号源，阻抗可达几十千欧。

所以在测量上具有以下难点：

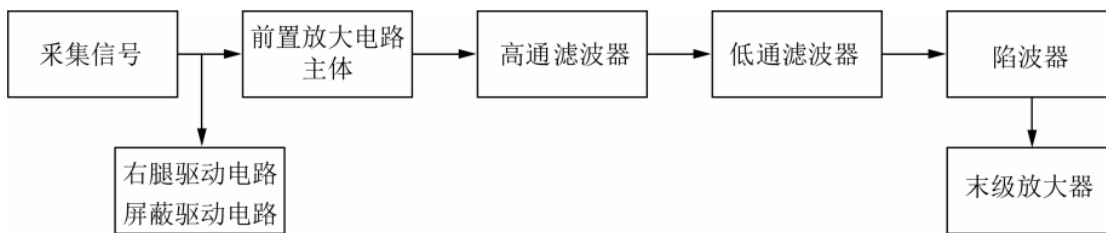
- 干扰强。测量心电信号会有来自生物体内的，如肌内干扰、呼吸干扰等；来自体外的，如工频干扰、因不良接地等引入的其它外来串扰等。
- 干扰信号与心电信号本身频带重合(如工频干扰)，无法直接使用带通滤波去除干扰，故需使差分放大器的共模抑制比高。
- 近场检测。离开体表微小距离就基本上检测不到信号。
- 电极极化电压引起基线漂移。测量电极与生物体之间会产生直流电压，引起基线漂移，所以在前置放大电路中增益不能过大。

电路设计

电路指标

- 电压放大倍数：1000，误差 $\pm 5\%$ ；
- 3dB低频截止频率：0.05Hz；
- 3dB高频截止频率：100Hz，误差 $\pm 10\text{Hz}$ ；
- 频带内响应波动：在 $\pm 3\text{dB}$ 以内(不包含 $50\text{Hz} \pm 5\text{Hz}$)；
- 共模抑制比：大于80dB(含1.5m长的屏蔽导联线，共模输入电压范围： $\pm 7.5\text{V}$)；
- 差模输入电阻：大于 $5\text{M}\Omega$ 。

电路架构

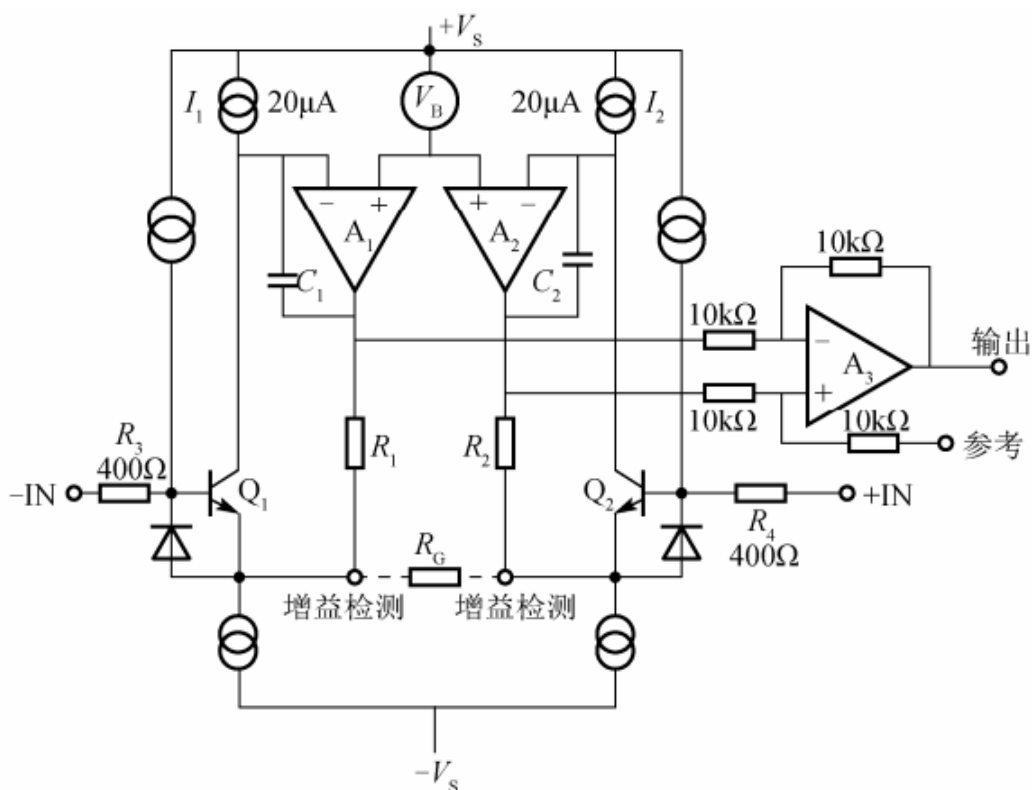
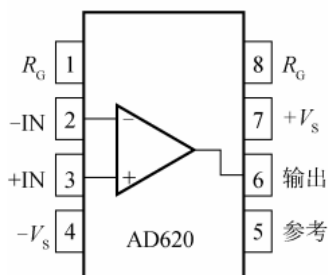


- 采用二级放大方案（因为前端电压放大系数过大会导致基线漂移，一般将放大倍数选为10，所以有必要再增加一个末级放大器）；
- 以仪表放大器为主体，同时伴有右腿驱动电路、屏蔽驱动电路的前置放大器架构以抑制共模，提高共模抑制比；
- 采用高通滤波器来滤除电极之间的直流偏置信号；
- 采用低通滤波器滤除高频噪声成分；
- 采用陷波器滤除电源线干扰。

电路元件

AD620

将分立的三运放集成到一块芯片上。



$$\text{差分增益 } G_d = 1 + \frac{R_1 + R_2}{R_G}$$

增益电阻R1和R2被精确确定为24.7kΩ

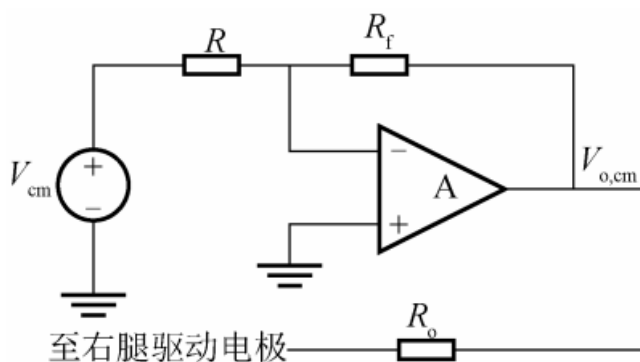
$$G_d = 1 + \frac{49.4\text{k}\Omega}{R_G}$$

AD620具有以下优点：

- 使用方便：增益只须通过一个外部电阻设置；
- 低功耗，最大工作电流1.3mA；
- 出色的直流性能：如共模抑制比高：93dB(min;G=10)；
- 出色的交流特性：120kHz(G=100)带宽；0.01%建立时间为15μs；
- 噪声电压低：0.28μVpp(0.1 ~ 10Hz)。

右腿驱动电路

用以降低人体体表的共模干扰电压。



右腿驱动电路对受到共模干扰的心电信号共模分量采样，放大并反相，再反馈到体表，以降低体表的共模干扰电压。

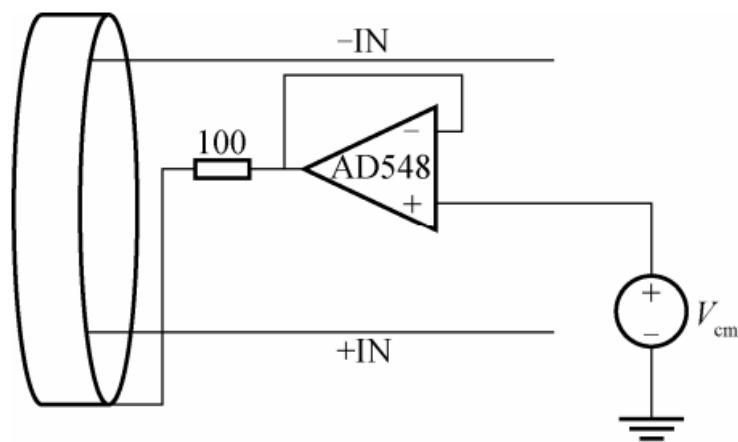
$V_{o,cm}$ 表示采样得到的反映人体体表共模干扰电平的信号。

该信号反相放大器放大，再反馈到右腿驱动电极。此反馈电压与原体表电压反相，如果反相放大器增益大小适当，原体表电压就被反馈电压抵消，从而大大降低了体表共模干扰电压的电平。

共模屏蔽驱动电路

体表电极与前置放大器（或者缓冲放大器）之间是由多股细而柔软的单芯屏蔽导联线连接的，常把导联线的屏蔽层接地。

图中 V_{cm} 表示采样得到的反映人体体表共模干扰电平的信号（即右腿驱动电路的输出电压）。该共模信号经同相放大器放大后驱动导联线的屏蔽层。



信号通过导联线传输时，在导联线的中芯线与屏蔽网之间存在着一定数量的分布电容，其造成的差分相移将影响前置放大器的共模抑制比(CMRR)。所以只要同相放大器增益大小适当，屏蔽层共模电位等于芯线共模干扰电位，则屏蔽层与芯线间没有电位差，就大大减小电缆电容和杂散电容造成的差分相移，从而保证前置放大器有高的共模抑制比(CMRR)。

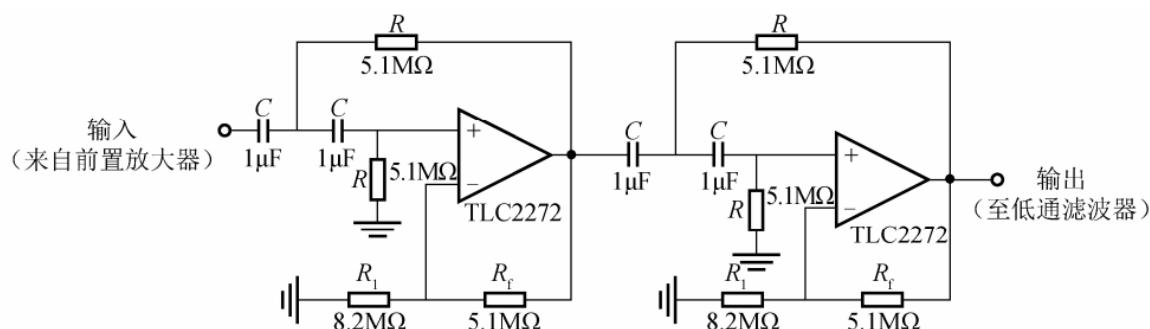
高通滤波器

带内电压增益 $A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1}$

截止频率 $f_p = \frac{1}{2\pi RC}$

品质因数 $Q = \frac{1}{3-A_v}$

取 $Q = 0.707$, 求出 A_v 。进而确定 $\frac{R_f}{R_1}$, 选取 R_1 , 再定 R_f 。选定 C , 由 f_p 决定 R 。



取 $Q = 0.707$, 则 $A_v = 1.568$, 由此得 $\frac{R_f}{R_1} = 0.586$ 。

取 $R_1 = 8.2M\Omega$ 考虑到常用电阻基值, 取 $R_f = 5.1M\Omega$ 。

R 和 C 的选择要满足截止频率为 $0.03Hz$ 。取 $C = 1\mu F$, 考虑到常用电阻基值, $R = 5.1M\Omega$ 。

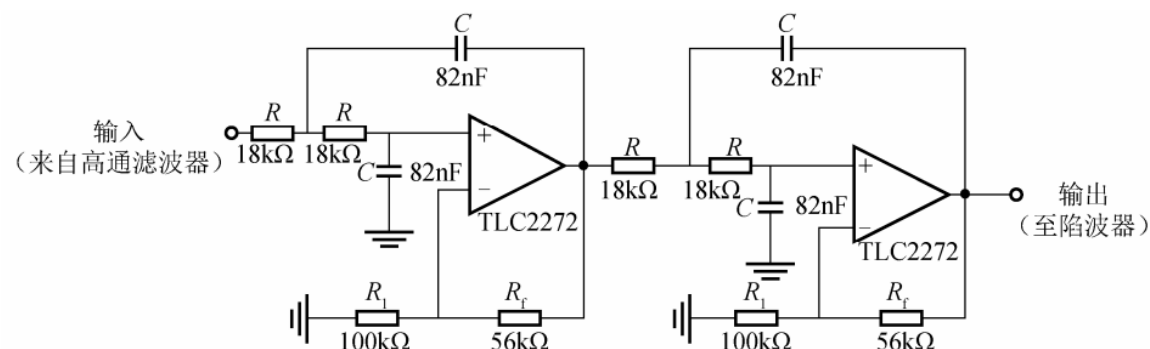
低通滤波器

带内电压增益 $A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1}$

截止频率 $f_p = \frac{1}{2\pi RC}$

品质因数 $Q = \frac{1}{3-A_v}$

取 $Q = 0.707$, 求出 A_v 。进而确定 $\frac{R_f}{R_1}$, 选取 R_1 , 再定 R_f 。选定 C , 由 f_p 决定 R 。

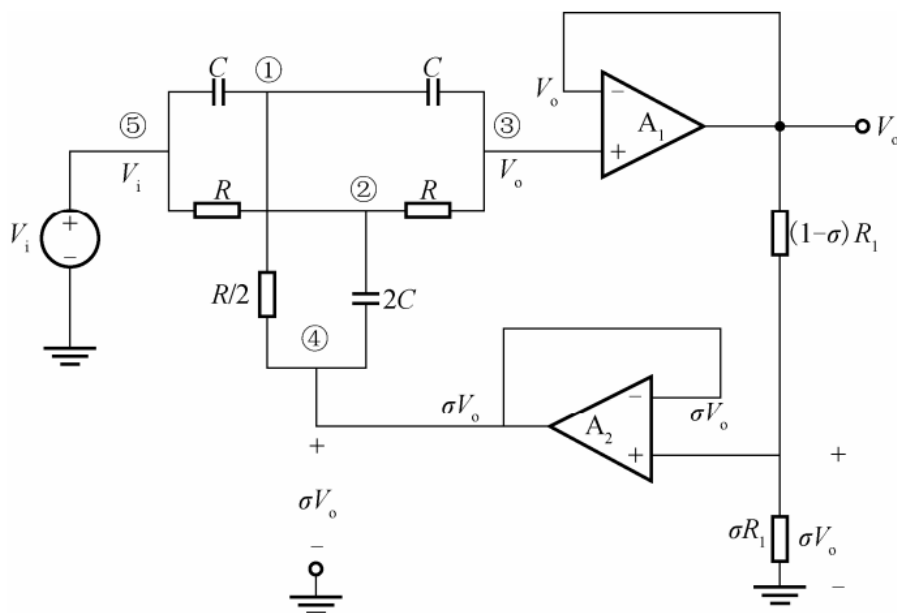


取 $Q = 0.707$, 则 $A_v = 1.568$, 由此得 $\frac{R_f}{R_1} = 0.586$ 。

取 $R_1 = 100k\Omega$ 考虑到常用电阻基值, 取 $R_f = 56k\Omega$ 。

R 和 C 的选择要满足截止频率为 $100Hz$ 。取 $C = 82nF$, 考虑到常用电阻基值, $R = 18k\Omega$ 。

陷波器

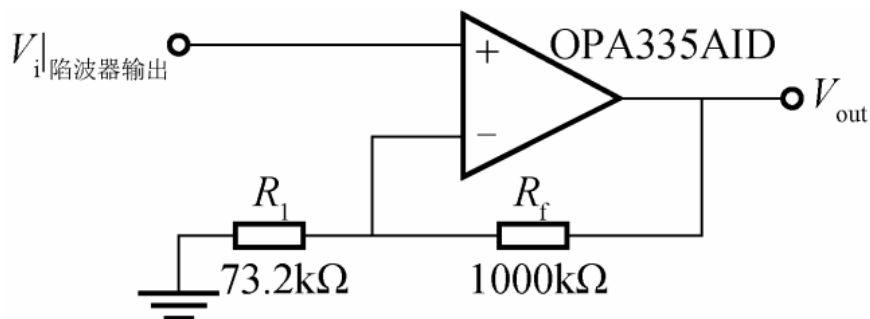


$$H(j\omega) = \frac{-\omega^2 R^2 C^2 + 1}{-\omega^2 R^2 C^2 + 4j\omega RC(1-\sigma) + 1} = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 - 4j\omega\omega_0(1-\sigma)}$$

取电容 $C = 47nF$, 零点频率 $f_z = 50Hz$, 考虑到常用电阻基值取 $R = 68k\Omega$, $\sigma = 0.9$

级连的带通滤波器带内增益为16.1dB, 低频截止频率 $f_{pL} = 0.04Hz$, 高频截止频率 $f_{pH} = 84Hz$

末级放大器



前置放大电路的增益设为10.8, 由级连的低通和高通滤波器构成的带通滤波器, 通带功率增益为16.1dB, 电压放大系数则为6.38。所以这两部分提供的电压放大倍数为68.904倍。

系统设定的整体放大倍数为1000, 故末级放大电路的电压放大倍数应为 $1000/68.904 = 14.5$ 倍。

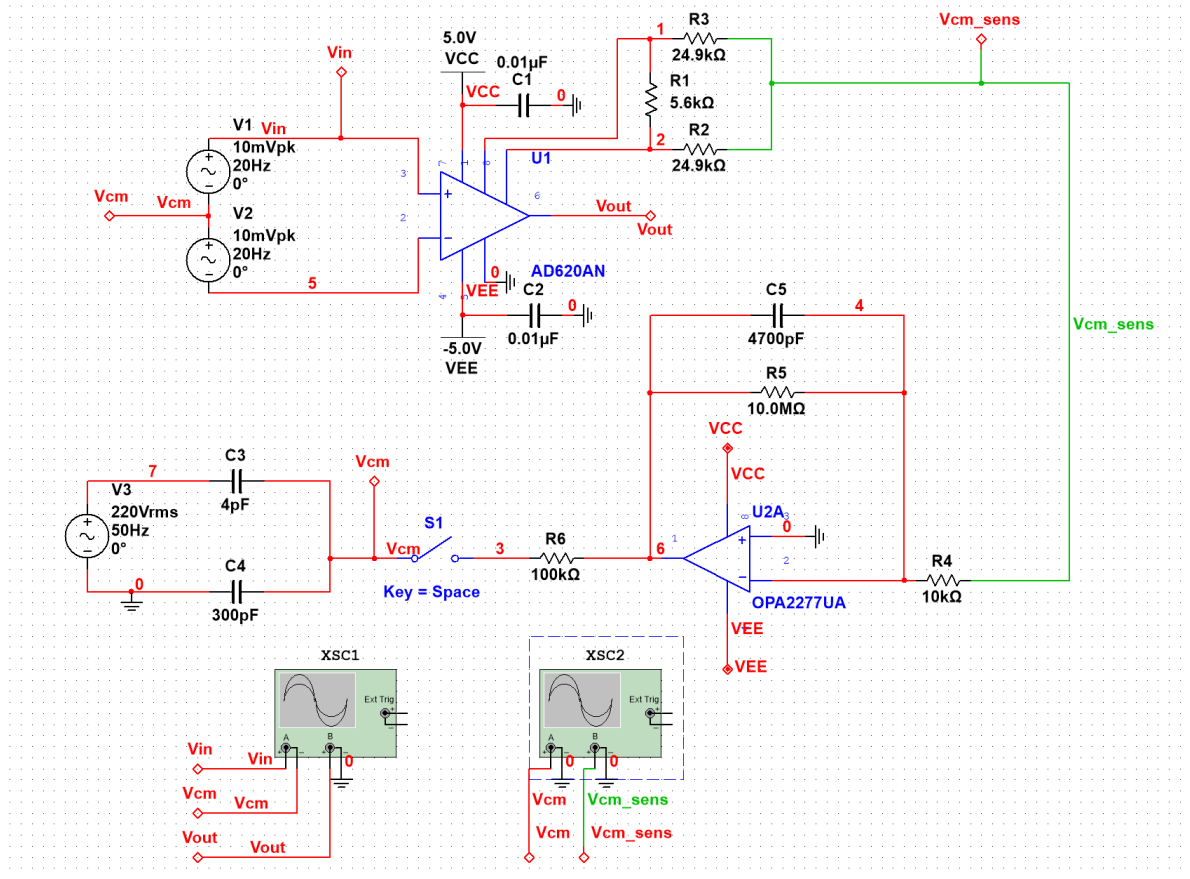
末级放大器取同相放大器结构, 如选 $R_f = 1000k\Omega$, $R_1 = 73.2k\Omega$, 则理想情况下末级放大系数为14.7倍 (实际末级放大系数要小一些)。

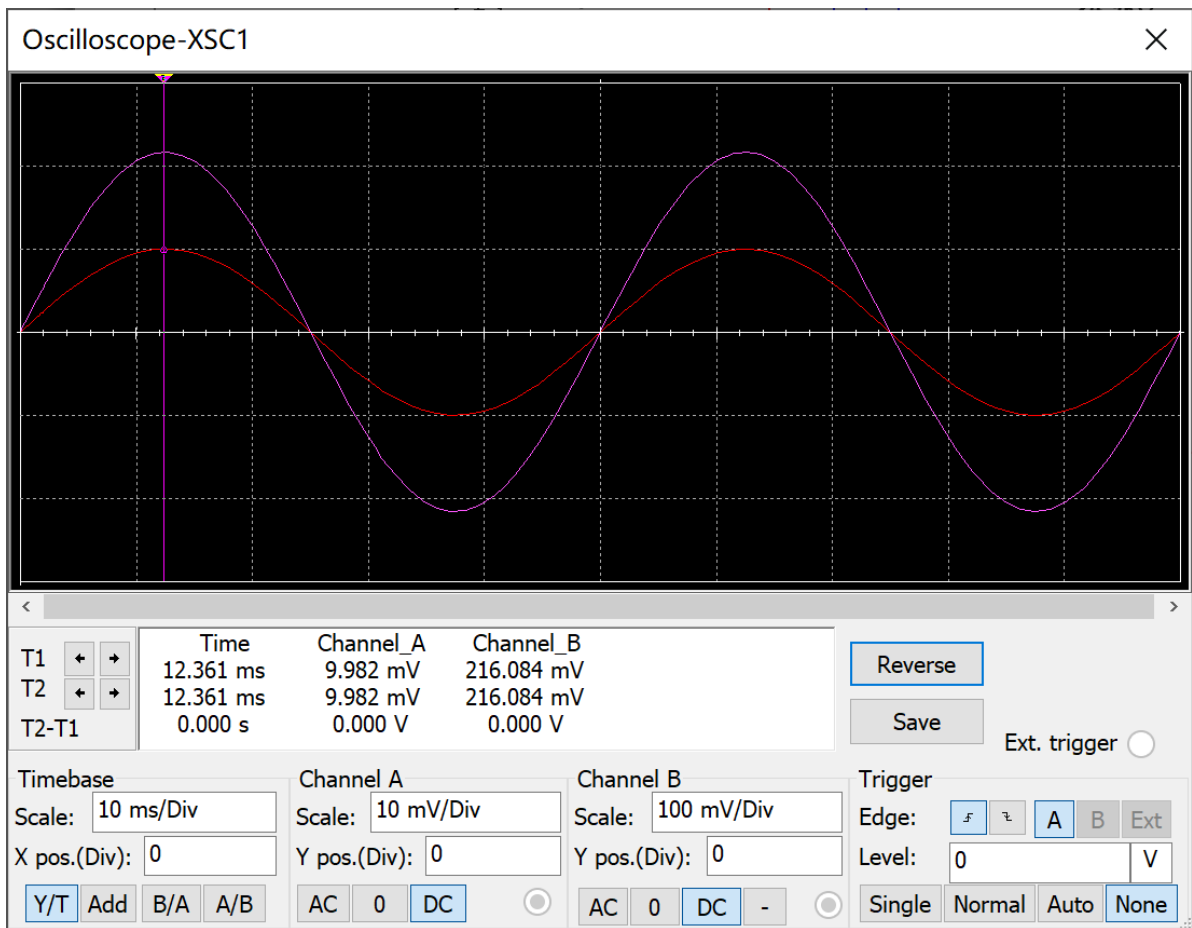
电路仿真

前置放大器

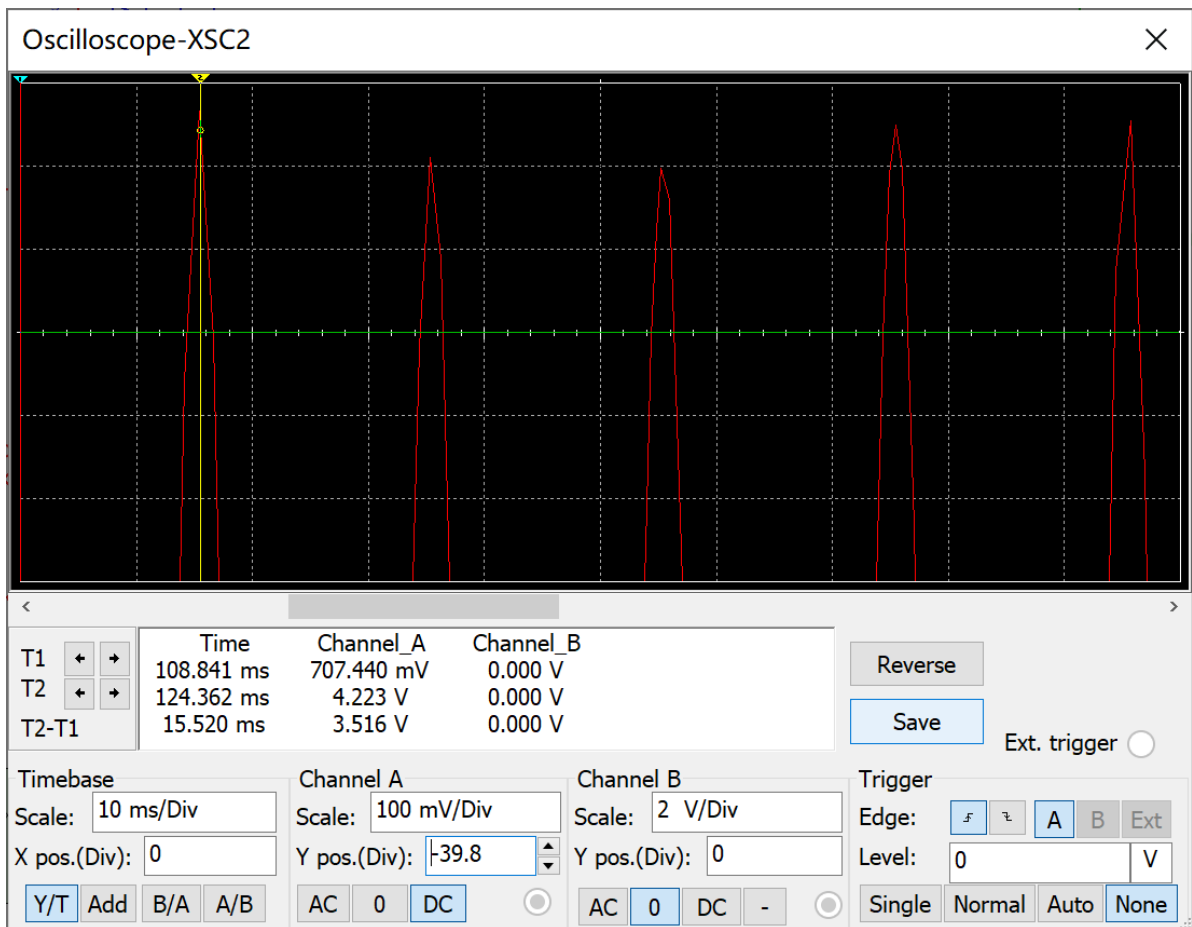
仿真如图，心电信号用峰值为10mV 的信号源替代。

分压输出的共模干扰电压为 $311 \times \frac{4}{300+4} \approx 4.09V$ ，比模拟的心电信号大 46.21dB



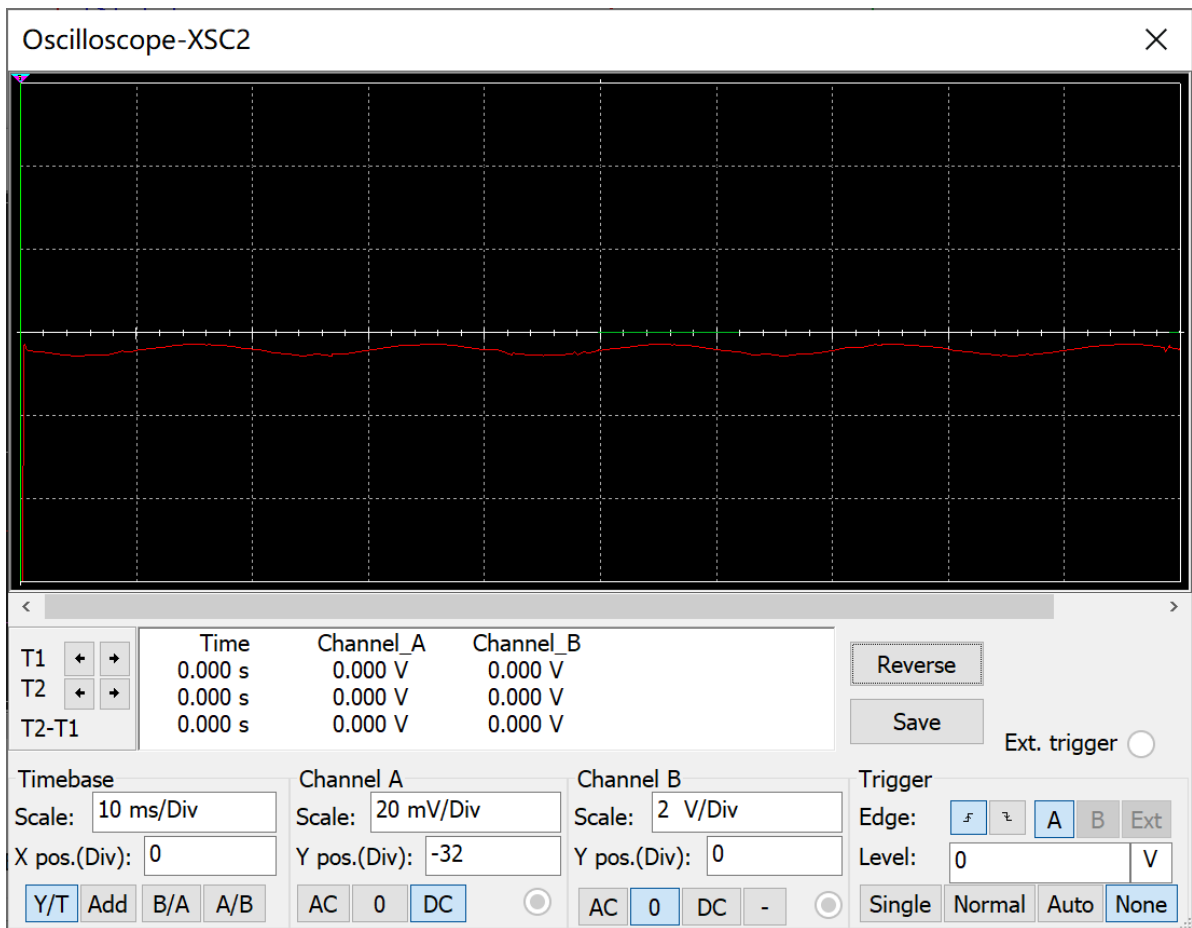


心电信号被放大，峰值约为216.084V。

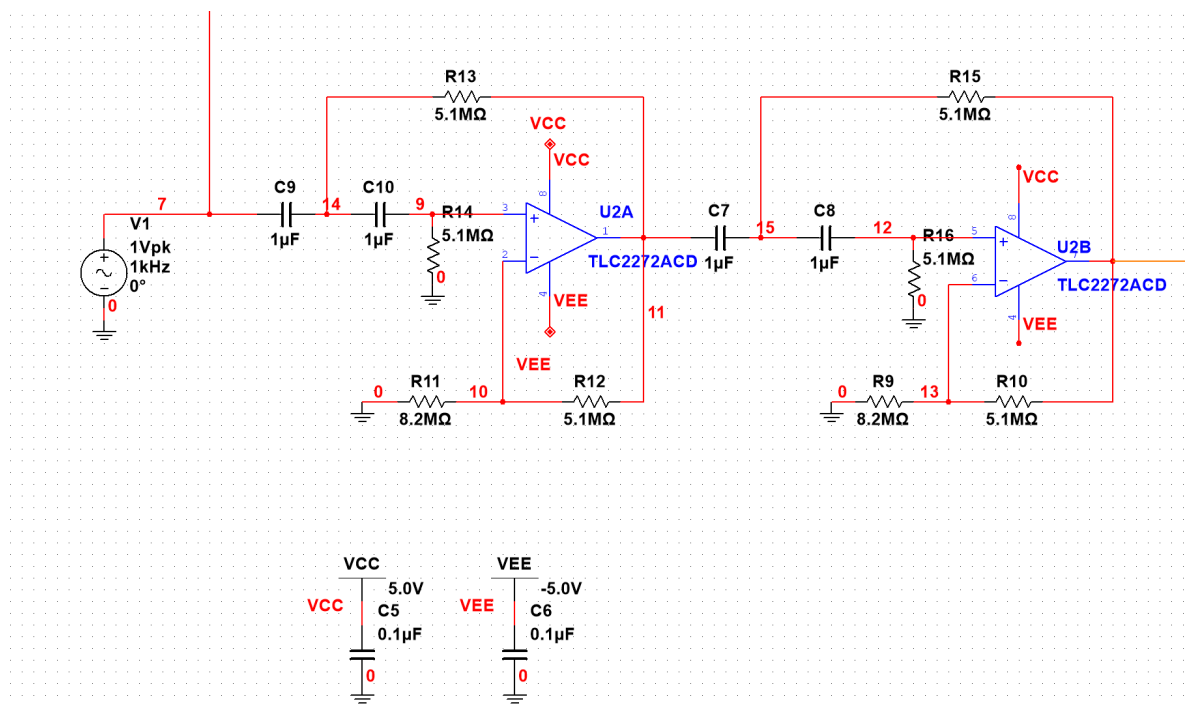


可以看到，当S1断开时，以共模输出为主。

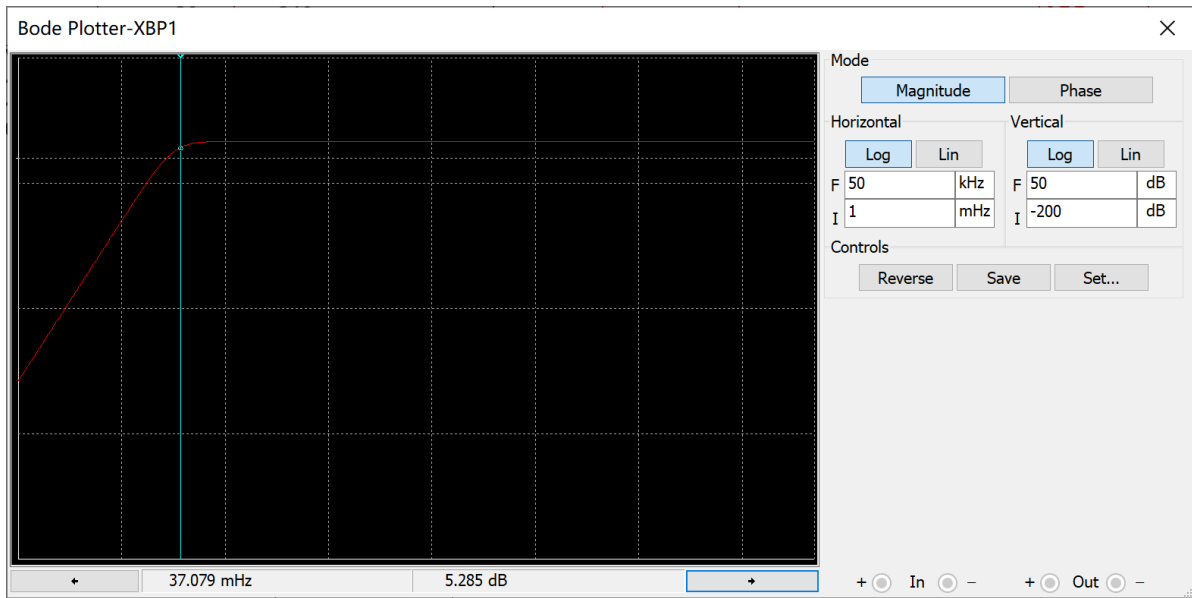
当S1闭合，即接入右腿驱动电路后，输出基本为正弦波，共模分量得到抑制，差模分量放大。



高通滤波器

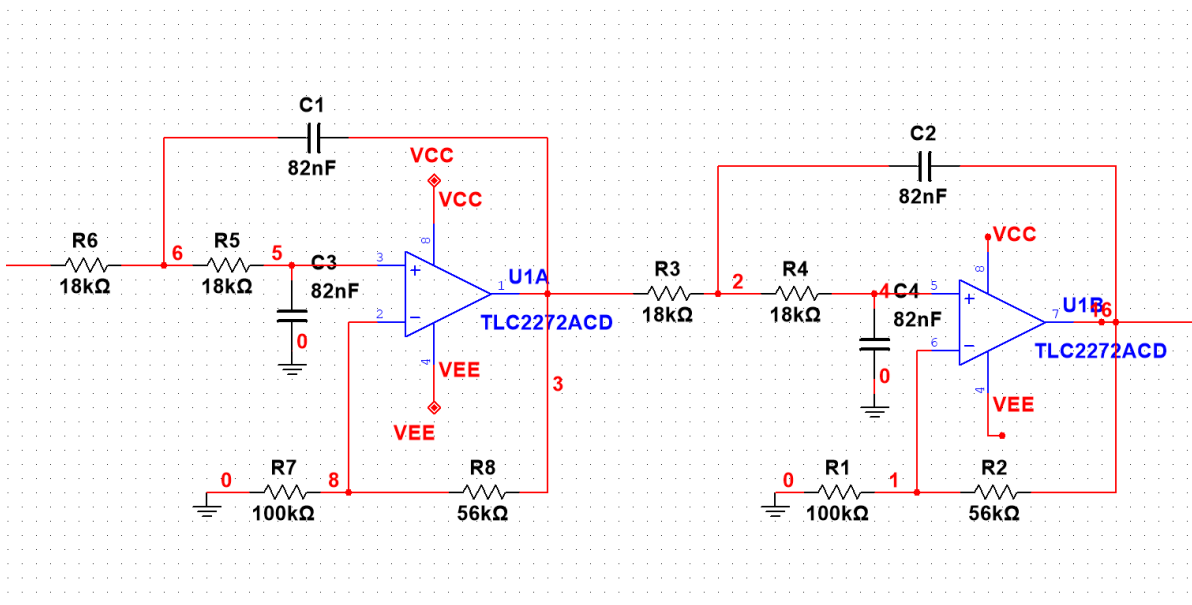


高通滤波器的增益最大约为8.3dB，如图，截止频率约为0.037Hz。

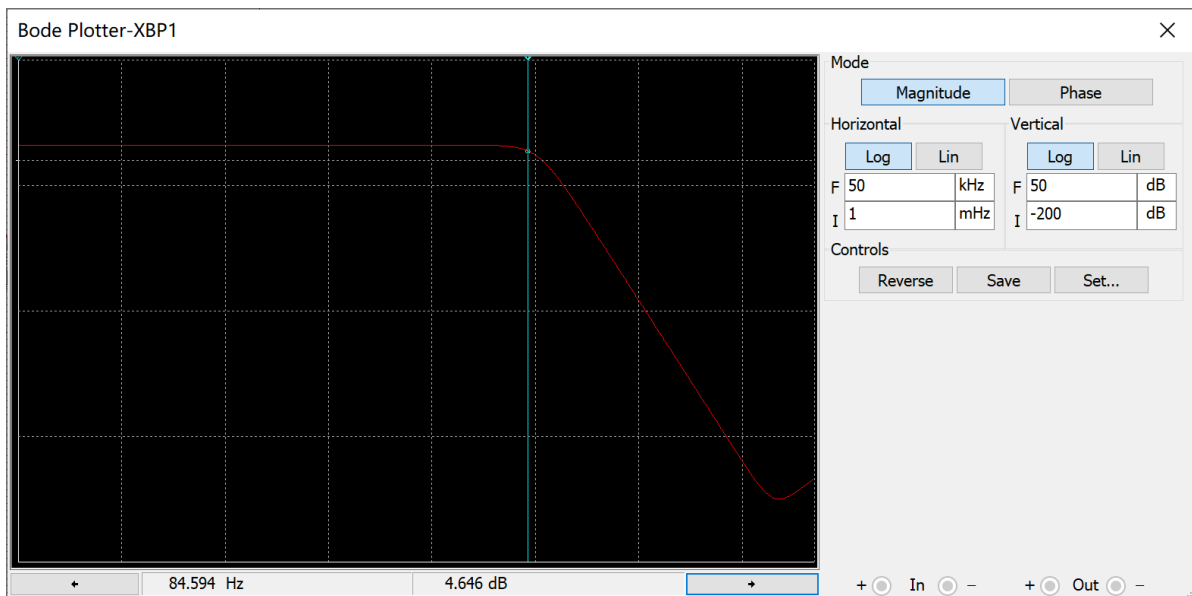


低通滤波器

(VCC与VEE同上)

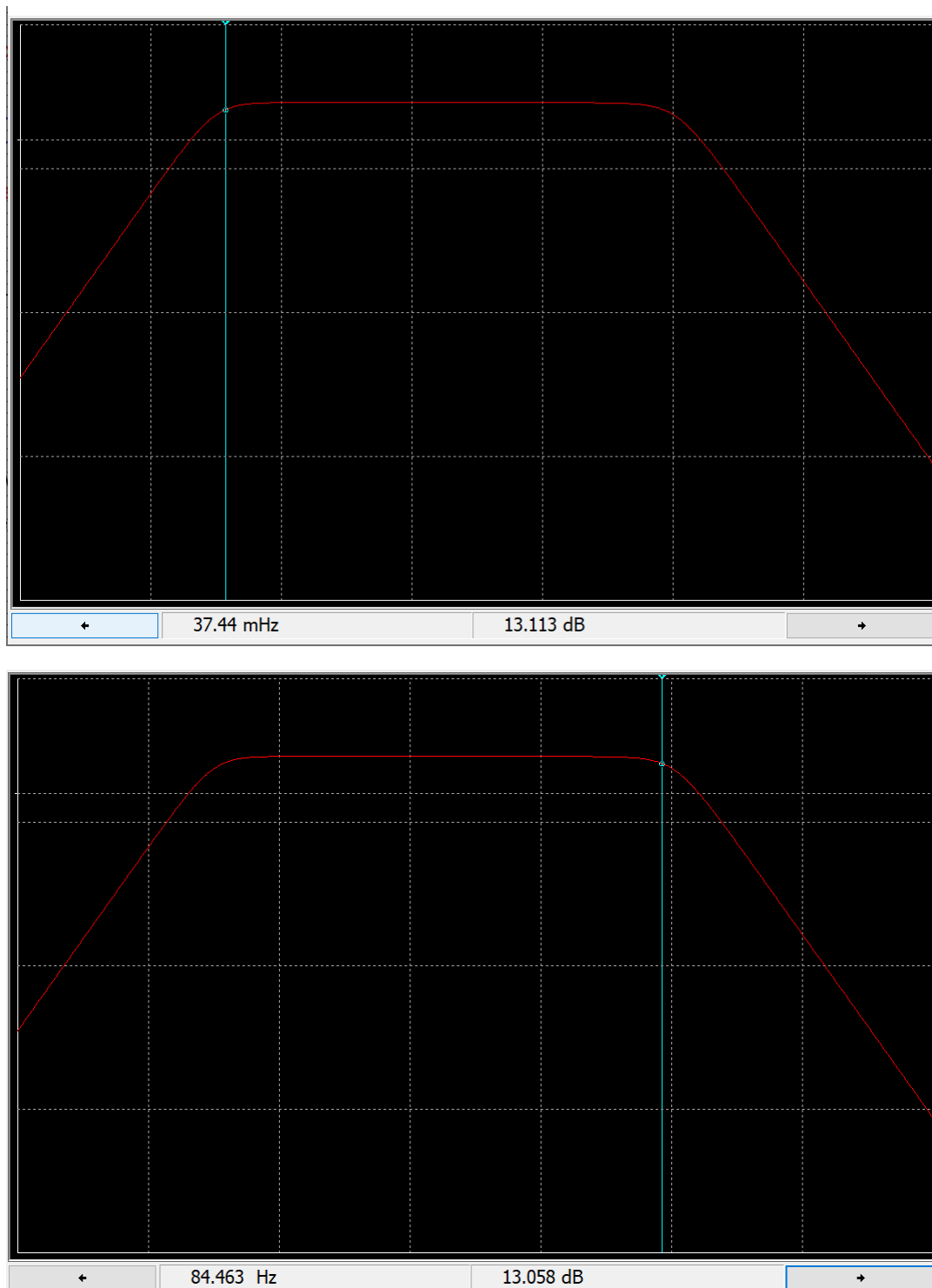


低通滤波器的增益最大约为7.7dB，如图，截止频率约为84.5Hz。



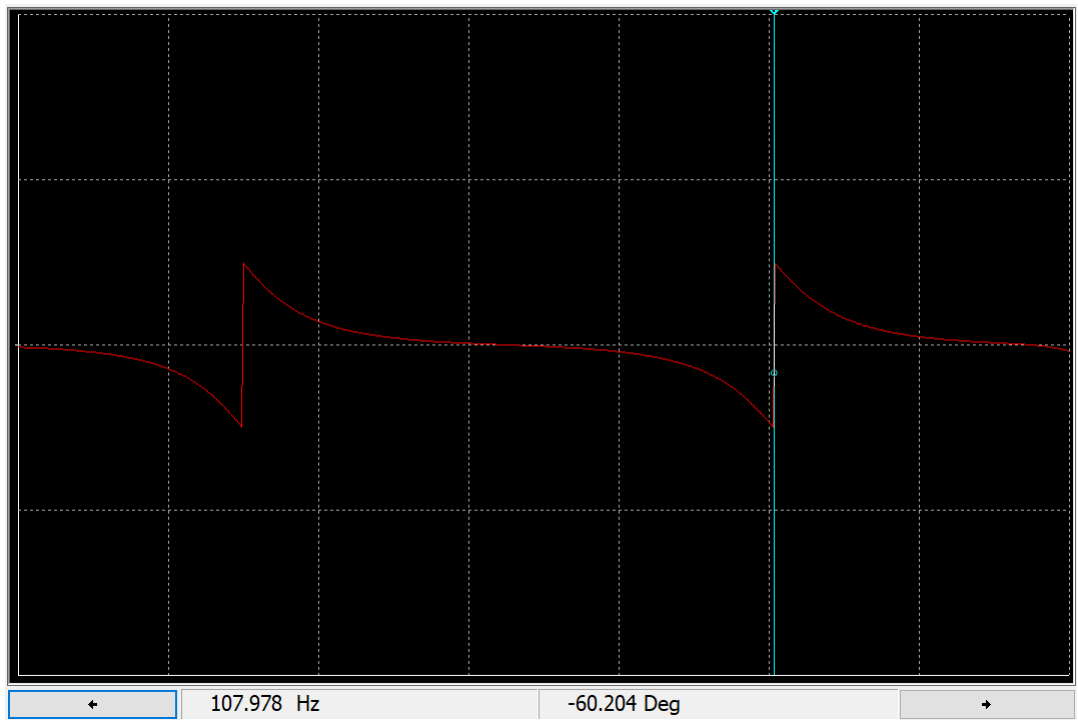
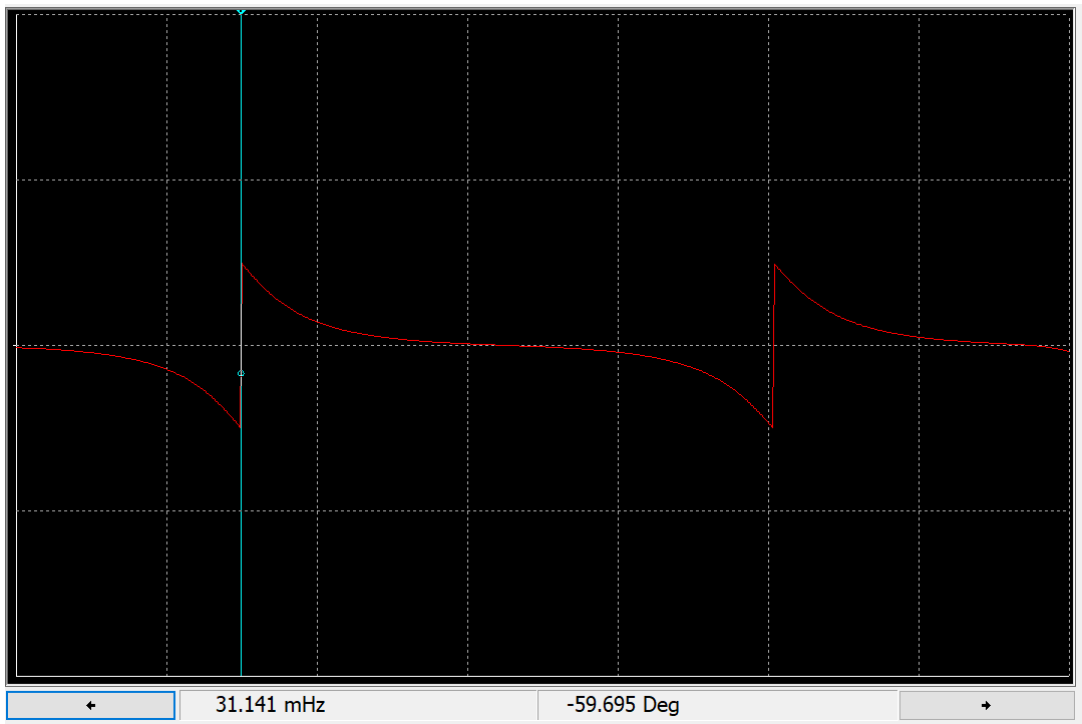
带通滤波器

将高通滤波器与低通滤波器串联，得到波特图如图所示。

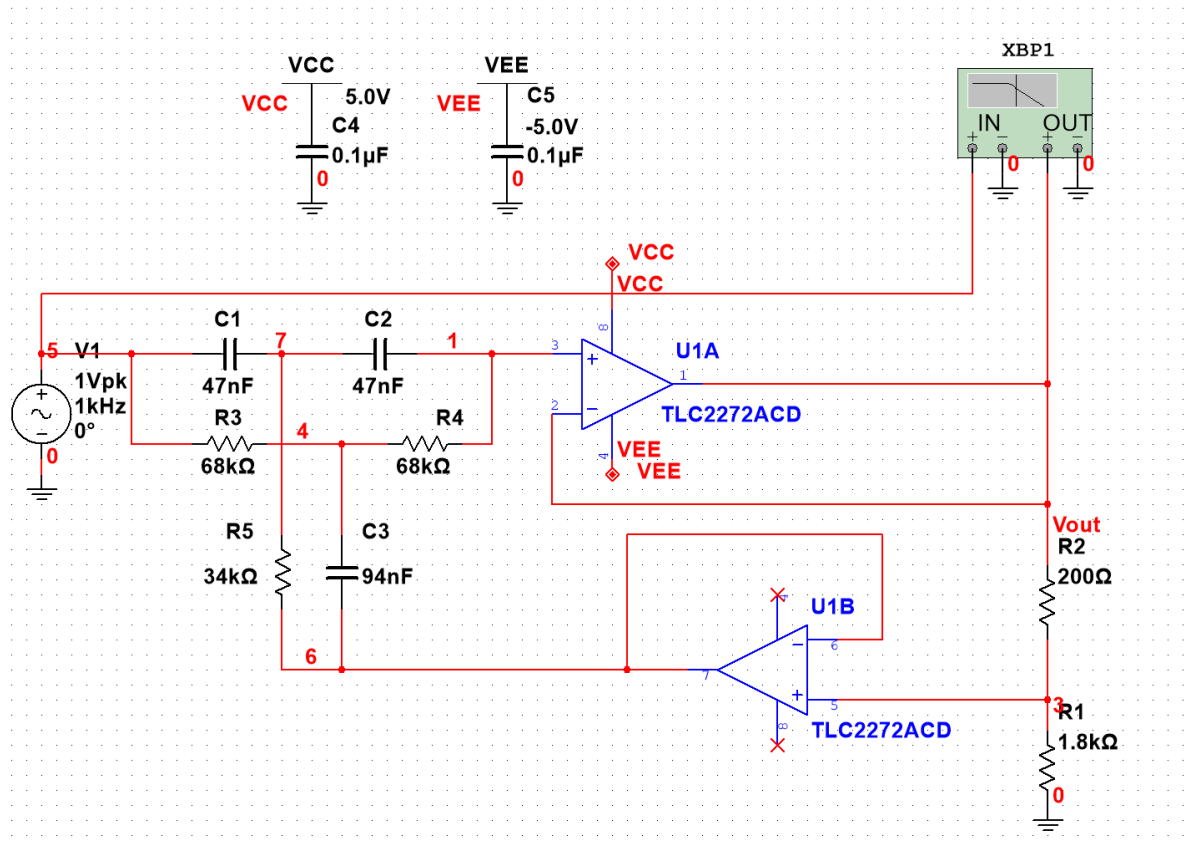


带通范围约为0.037Hz~84.5Hz，带内增益为16.1dB。

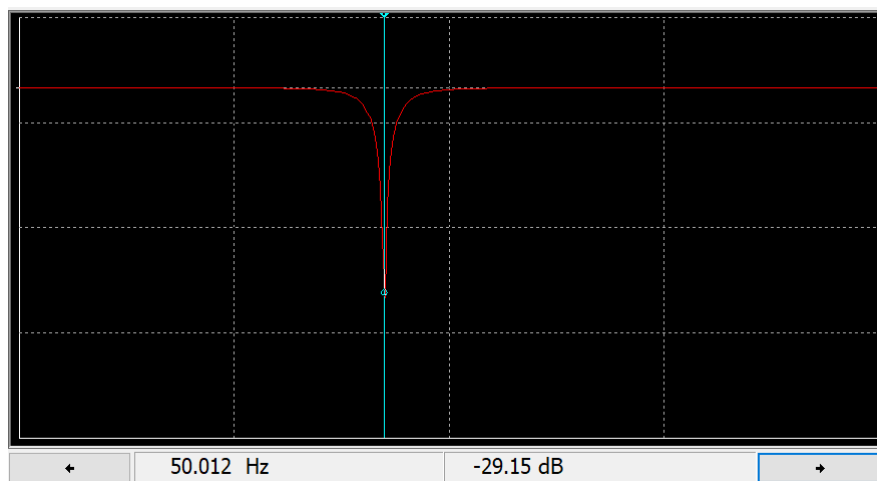
相频特性



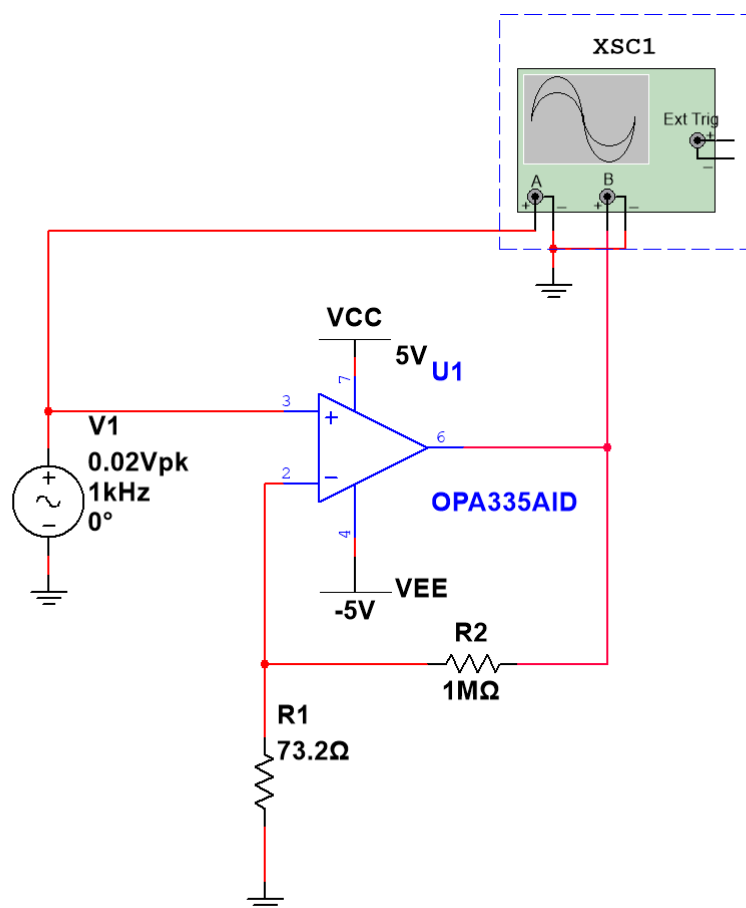
陷波器



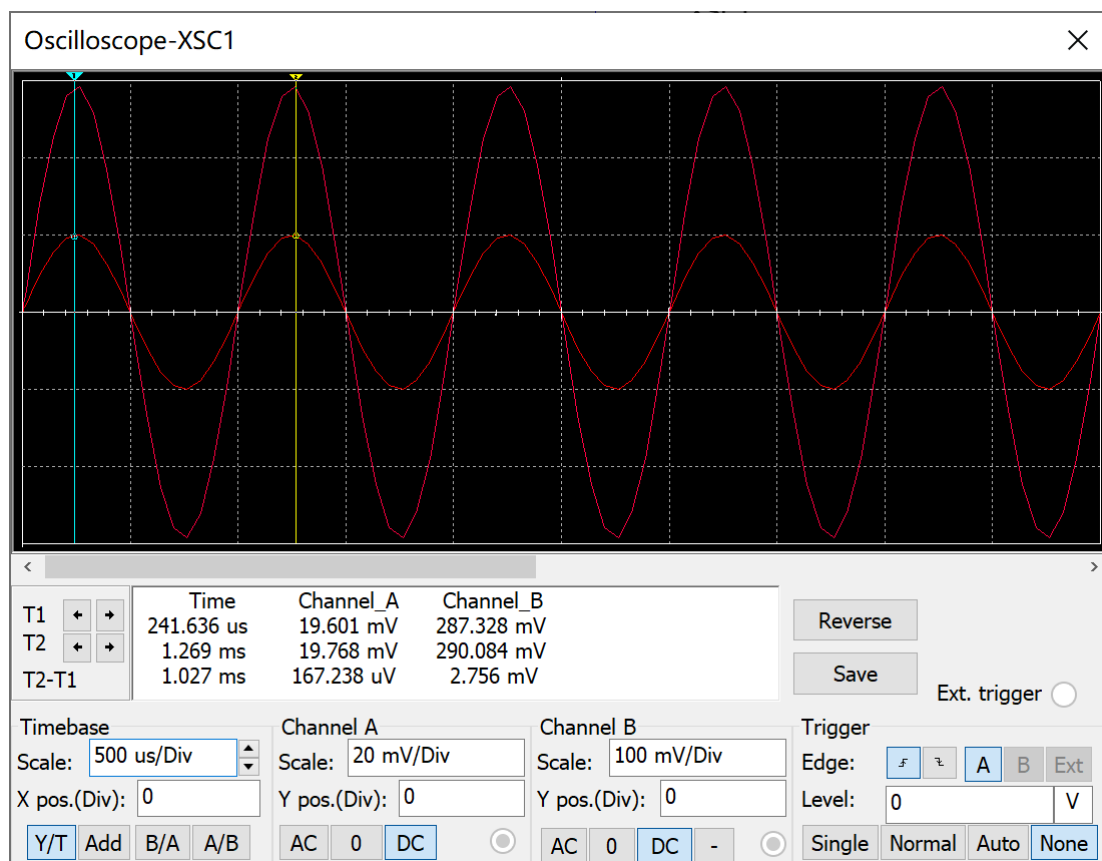
波特图如下，对50Hz的工频有-29.18dB的衰减。



末级放大



输出时域波形如下图，放大倍数 $A_v = \frac{290.084}{19.768} = 14.67$



结论

本电路以仪表放大器为主体，通过右腿驱动电路和屏蔽电路抑制共模信号、高通滤波器和低通滤波器串联组成带通滤波器滤除噪音、陷波器去除50Hz的工频信号干扰、前后端两次放大减少基线漂移，一定程度上能够测出人的心电信号，实现微弱信号的放大。

通过仿真设计和分析，我更加清楚地认识到各种元件在电路中的用途。但是写仿真的过程中我发现自己对具体参数的设置并不是非常了解，在查阅课本等资料后逐渐理解了这些元件参数取值的原理。通过这次实验，我对较大的电路搭建有了一个较为具体的认知。以自上而下的角度看，将设计要求和处理信号的几个难点拆分成不同模块的功能，再去具体细化每个小功能，这种电路组织的方式思路清晰。

因为时间和水平限制，本次实验还是基于对现有资料的理解，缺少自己优化的部分，以后还可以试着有所创新，看能否做一些改进。