

一种高Q值单频水声信号放大提取电路的设计

李明勇, 魏爱娟, 兰江

(中国船舶重工集团公司第七一〇研究所, 湖北宜昌 443003)

摘要 针对水声信号所处环境复杂、背景噪声源多的特点,提出了一种基于JFET的超低噪声放大电路,该电路选用两片低噪声的场效应管2SK170作为第一级放大器件,经过CR高通滤波连接到同相放大电路,整体电路增益可达70 dB;为进一步提升接收信号信噪比,结合双T滤波器特点优化设计出一种高Q值选频电路;通过Multisim14仿真表明,设计的电路在1 Hz处的电压噪声密度仅为 $2.4 \text{ nV/Hz}^{0.5}$,滤波器Q值可达25.6,结合实际电路测试结果表明,设计的电路能够满足水声测量要求。

关键词 水声信号;放大电路;噪声;Multisim;滤波

中图分类号 TJ61 文献标识码 A

Design for Amplifying Extracting Circuit of a High-Q Single Frequency Underwater Acoustic Signal

LI Mingyong, WEI Aijuan, LAN Jiang

(No. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

Abstract Aiming at the characteristics of complicated environment and multiple noise sources for underwater acoustic signal, an ultra-low noise amplifying circuit based on JFET is proposed. This circuit adopts 2 low noise JFETs 2SK170 as the first stage amplifiers, which is connectd to in-phase amplifying circuit through CR high-pass filtering, and the gain of overall circuit is up to 70 dB. In order to further enhance SNR of received signal, a high-Q frequency selective circuit is optimized and designed in combination with the characteristic of dual-T filter. The Multisim14 simulation results show that the voltage noise density of the designed circuit under 1 Hz is only $2.4 \text{ nV/Hz}^{0.5}$, and the filter's Q value can reach 25.6. Combined with actual test results, the designed circuit is proved to meet underwater acoustic measurement requirements.

Key words underwater acoustic signal; amplifying circuit; noise; Multisim; filtering

0 引言

水声信号的检测与提取在水中目标探测与识别、水声通信、遥测、海洋资源勘探等军民领域有着广泛应用。水声信号的检测与提取是水声信号处理的非常关键一步,只有可靠、准确地检测出水声信号,后续的定向、定位、参数估计、目标识别、跟踪和态势估计等方可有效开展。然而水声信号所处

的环境复杂,背景噪声源众多,如何将这种水声信号进行探测和提取成为研究热点和难点^[1,6]。吴光文等提出了一种基于小波变换的水声信号滤波方法,提高了水声信号的特征^[2];吴剑明等设计了一种两级程控增益的水声信号放大电路,有效避免了不同幅值信号造成信号饱和问题^[3];邓秀华等对水声信号的检测与处理提出了分析与处理方法^[4];肖鹏斌等采用运放LM382搭建了一种水声

信号预处理电路,检测精度良好,工作较为稳定,抗干扰能力强^[5]。童峰、马定坤等分别在水声信息延估算法和接收机设计方面做了研究工作^[7-8]。文中设计了一种 JFET 型超低噪声前置放大电路,并提出了一种高 Q 值选频电路,有效抑制了水声信号中的背景噪声并提高了信噪比。

1 JFET 型超低噪声放大电路

1.1 JFET 型超低噪声放大电路设计

在某型水下探测设备中需要发射和接收特定频率的信号,通过检测回波信号对目标进行探测和辨识,发射机发射的频率 80 Hz。由于在水中背景噪声源多、海况复杂,接收机探测到的信号噪声多、干扰大,如何对信号的放大、提升信噪比对前置放大器提出苛刻要求。另一方面,JFET 具有输入阻抗大、电压噪声低等优点,适合用于第一级放大电路。结合两者的特点,设计了如图 1 所示的 JFET 型超低噪声放大电路。

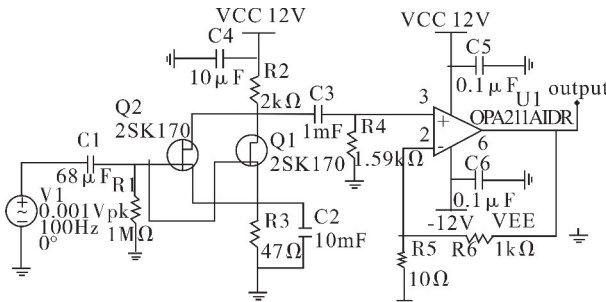


图 1 JFET 型超低噪声放大电路

Fig. 1 JFET-type ultra-low noise amplifying circuit

图中 C_1 和 R_1 构成高通滤波,滤除水声信号中的直流偏置,第一级放大采用 2 只超低噪声 JFET 管 2SK170 ($\leq 0.9 \text{ nV}/\text{Hz}^{1/2}$) 并联,通过并联的方式能够有效降低管子噪声。理论上讲, n 只管子并联可将管子等效噪声降低为 $1/n^{1/2}$,但综合考虑功耗、放大器尺寸、成本等因数,管子不宜选的过多。放大方式采用典型的共源级放大, R_3 为自偏置电阻,保证 JFET 管在工作时 $U_{gs} < 0$; C_2 可保证交流通过,提高第一级电路增益; R_2 为连接漏极,此级电路放大倍数为

$$A_1 \approx g_m R_2 \quad (1)$$

第 2 级放大电路采用低噪声运算放大器

OPA211,连接方式为同相放大。其中 C_3 、 R_4 组成高通滤波,滤除第一级放大电路的直流成分,截止频率 $f = 1/(2\pi C_3 R_4) \approx 0.1 \text{ Hz}$, R_5 、 R_6 构成反馈网络,此级放大电路增益满足

$$A_2 = 1 + \frac{R_6}{R_5} = 101 \quad (2)$$

过第一级和第二级放大,总体增益可达 70 dB。

1.2 JFET 型超低噪声放大电路噪声分析

图 2 为 JFET 型超低噪声放大电路噪声示意图,其中 U_{in} 为信号源, R_s 为信号源阻抗, C_{in} 为折算后的等效输入电容, R_b 为 JFET 的 g 极和 s 极之间的电阻。 i_{n1} 和 i_{n2} 为 JFET 的电流噪声, e_{n1} 、 e_{n2} 、 e_{n3} 为 JFET 的电压噪声, e_{ntotal} 为等效后的总噪声。

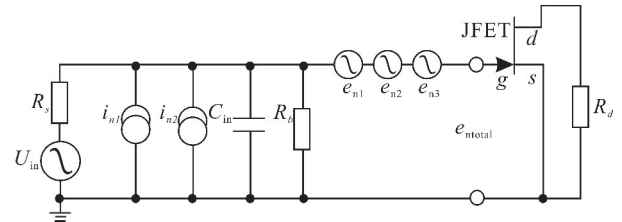


图 2 JFET 放大电路噪声示意图

Fig. 2 Schematic diagram of noise of JFET amplifying circuit

下面对总噪声 e_{ntotal} 进行计算, i_{n1} 为电流冲击噪声,与 JFET 的 g 极和 s 极间的泄露电流 I_c 有关,具体如下

$$i_{n1} = \sqrt{2qI_c B} \quad (3)$$

式中: q 为单位电荷; I_c 为泄露电流; B 为带宽。

i_{n2} 为 g 极经电容 (C_{gd}) 从沟道电流耦合的电流大小,当 C_{gd} 较小且沟道电流也较小时可以忽略。因此,电流噪声产生的电压噪声满足

$$e_{ia} = \sqrt{i_{n1}^2 + i_{n2}^2} \left(R_s \parallel \frac{1}{C_{in}s} \parallel R_b \right) \quad (4)$$

e_{n1} 为 JFET 沟道热噪声,由载流子随温度变化引起; e_{n2} 为 gs 极间电阻 R_b 的热噪声; e_{n3} 为 JFET 的 $1/f$ 噪声,可以通过 JFET 数据手册直接获取; e_{n1} 、 e_{n2} 分别满足

$$e_{n1}^2 = \frac{i_{nd}^2}{g_{fs}^2} = 4kTBR_n, R_n = \frac{A}{g_{fs}} \quad (5)$$

$$e_{n2}^2 = 4kTBR_b \quad (6)$$

式中: i_{nd} 为 JFET 沟道电流噪声; g_{fs} 为 JFET 跨导系

数; k 为波耳兹曼常数; T 为绝对温度; A 为 JFET 类型参数, 对于 N 沟道 JFET, $A \approx 0.67$ 。至此, 可以估算出 JFET 型超低噪声放大电路噪声如下

$$e_{n\text{total}} = \sqrt{e_{ia}^2 + e_{n1}^2 + e_{n2}^2 + e_{n3}^2} = \sqrt{(i_{n1}^2 + i_{n2}^2)(R_s \parallel \frac{1}{C_{in}s} \parallel R_b)^2 + 4kTB(R_n + R_b) + e_{n3}^2} \quad (7)$$

2 高 Q 值选频电路设计

由于 JFET 型超低噪声放大电路放大的信号含有多种频率的噪声, 为了进一步提升检测信号的灵敏度, 需要设计带通滤波电路。由于采用传统的 Sallen-Key 型或 MFP 型结构设计 80 Hz 左右的带通滤波电路效果并不理想, 文中设计了一种高 Q 值选频电路, 其电路结构如图 3 所示。

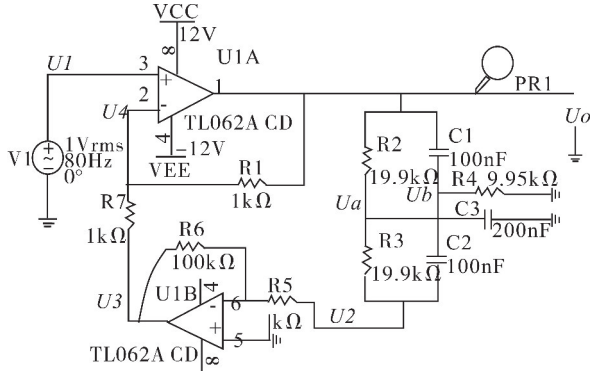


图 3 高 Q 值选频电路

Fig. 3 High-Q frequency selective circuit

结合图 3, 对高 Q 值选频电路工作原理说明如下: 令 $C = C_1 = C_2 = C_3/2$, $R = R_2 = R_3 = 2 \times R_4$, U_1 为信号输入, U_o 为信号输出, 节点电压用 U_a 、 U_b 、 U_2 、 U_3 、 U_4 表示, 根据节点电压法和运算“虚短”、“虚断”特点, 可列出以下方程

$$\begin{cases} U_1 = U_4 \\ \frac{U_3 - U_4}{R_7} = \frac{U_4 - U_o}{R_1} \\ U_b(Cs + Cs + \frac{2}{R}) = U_oCs + U_2Cs \\ U_a(\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + 2Cs) = U_o\frac{1}{R} + U_2\frac{1}{R} \\ U_2(\frac{1}{R} + Cs) = U_a\frac{1}{R} + U_b\frac{1}{Cs} \\ \frac{0 - U_2}{R_5} = \frac{U_3 - 0}{R_6} \end{cases} \quad (8)$$

经过计算可得到高 Q 值选频电路的传递函数满足

$$\Phi(s) = \frac{R_5(R_1 + R_7)(C^2R^2s^2 + 4CRs + 1)}{R_1R_6(C^2R^2s^2 + 1) + R_5R_7(C^2R^2s^2 + 4CRs + 1)} \quad (9)$$

参照图 3 中的参数, 取 $C = 100 \text{ nF}$, $R = 9.95 \text{ k}$, $R_1 = R_7 = R_5 = 1 \text{ k}$, $R_6 = 100 \text{ k}$, $s = j\omega = j2\pi f$, 那么式 (9) 可简化为

$$\Phi(f) = \frac{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j4\frac{f}{f_0}\right]}{50 \times \left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right] + \left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j4\frac{f}{f_0}\right]} \quad (10)$$

3 仿真与试验结果

3.1 仿真

利用 Multisim14 根据图 1 搭建仿真电路, 并对电路的自噪声进行分析, 得到如图 4 的结果。

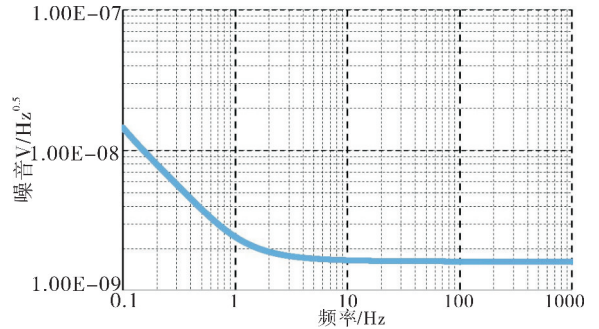


图 4 JFET 型超低噪声放大电路的仿真噪声

Fig. 4 Simulation noise of JFET-type ultra-low noise amplifying circuit

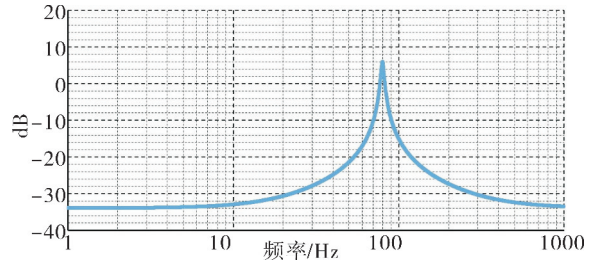


图 5 高 Q 值选频电路的仿真幅频响应

Fig. 5 Simulation amplitude and frequency response of high-Q frequency selective circuit

通过仿真结果表明, 设计的 JFET 型超低噪声放大电路的自噪声在 1 Hz 处仅为 $2.4 \text{ nV/Hz}^{0.5}$, 在 10 Hz 处的噪声仅为 $1.7 \text{ nV/Hz}^{0.5}$, 能够满足水声信号探测的要求。

再利用 Multisim14 根据图 3 搭建高 Q 值得选频仿真电路,得到如图 5 的仿真结果。

通过图 5 可以看出,设计的选频电路具有优良的选频性能,在中心频率 80 Hz 处,信号增益约为 6 dB,在远离中心频率处信号增益仅为 -34 dB。将仿真数据导出后,可以得到 -3 dB 的频率 $f_L = 78.4$ Hz 和 $f_H = 81.5$ Hz,带通滤波器带宽仅为 3.1 Hz,其 Q 值可达 $f_c / (f_H - f_L) = 25.8$ 。

3.2 试验

为了进一步验证仿真结果,设计了如图 6 所示的电路,该电路包括信号放大、信号调理和信号采集功能,测试试验中仅焊接放大和信号调理部分。



图 6 试验验证电路

Fig. 6 Test verifying circuit

由于输出噪音主要受运放的第一级影响,测出系统的总的输出噪音后,即可反推出系统的输入噪声大小。在低频段, JFET 型放大电路噪声以 $1/f$ 噪声为主,因此可根据公式推导出其在 1 Hz 的噪音大小。具体测量方法如下:

- 1) 将 JFET 放大电路的输入端接地;
- 2) 将输出端连接增益为 30 dB 的 0.1 ~ 10 Hz 带通滤波器;

3) 将滤波后的信号接入示波器,观察输出信号的峰峰值,并转换为有效值,转换关系为 $U_{p-p} \approx 6U_{rms}$;

4) 计算输入噪声,由于总增益为 70 dB + 30 dB = 100 dB,即 100 000 倍,输入噪声为

$$E_n = \frac{U_{rms}}{100000} \quad (11)$$

5) 推算出 E_n 后,即可估算在 1 Hz 处的输入噪声功率密度谱大小。估算方式如下

$$e_n = \frac{E_n}{\sqrt{\ln \frac{10 \text{ Hz}}{0.1 \text{ Hz}}}} \quad (12)$$

图 7 为示波器测量的输出信号峰峰值,时间档位 1 s/格,电压档位 5 mV/格,信号峰峰值为 4.8 mV,表 1 为多次测量结果。

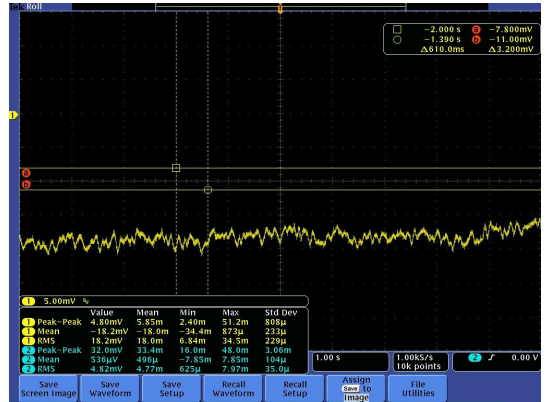


图 7 输入短路增益 100 dB, 0.1 ~ 10 Hz 输出信号
Fig. 7 Output signal 0.1 ~ 10 Hz under input short circuit gain 100 dB

表 1 输入短路情况测试结果

Table 1 Test results under condition of input short circuit

测量次数	示波器/ V_{pp}/mV	折算 V_{rms}/mV
1	3.5	0.530
2	4.8	0.727
3	4.1	0.621
4	3.7	0.561
平均值	4.025	0.610
@ 1Hz 功率谱密度	-	2.84 nV/Hz ^{0.5}

4 结束语

文中采用“JFET+同相放大”电路结构作为水声信号的前置放大级,在双 T 滤波器特点基础上优化设计出一种高 Q 值选频电路;分析了前置放大电路输入噪声计算方法并推导出高 Q 值选频电路工作原理。通过 Multisim14 仿真表明:设计的电路在 1 Hz 处的电压噪声密度仅为 2.4 nV/Hz^{0.5},滤波器 Q 值可达 25.6。实际电路的测试结果表明:1 Hz 处的电压噪声功率谱密度为 2.84 nV/Hz^{0.5},与仿真

结果接近,整体电路能够满足水声信号的测量要求。

参考文献

- [1] 余湖清. 水雷总体技术[M]. 北京,国防工业出版社, 2004:24-35.
- [2] 吴光文,王昌明,张爱军. 基于小波变换的水声信号滤波方法[J]. 测试技术学报,2015(29): 299-302.
- [3] 吴剑明,张小康,黄身钦,等. 两级放大反馈自动增益控制电路设计[J]. 仪表技术与传感器,2016(5):97-100.
- [4] 邓秀华,黄凡,张恒. 浅水声信号分析及处理探讨[J]. 水雷战与舰船防护,2016,24(3):1-4.
- [5] 肖鹏斌,孙伟玮. 水声信号预处理电路的设计与实现[J]. 四川兵工学报,2012,33(9):87-88,96.
- [6] 张国光. 采用 ZigBee 和模糊 PID 控制的水声信号采集系统[J]. 舰船电子工程,2015,255(9):156-159.
- [7] 童峰,许肖梅,方世良. 一种单频水声信号多径时延估算法[J]. 声学学报,2008(33):62-68.
- [8] 马定坤,张效民,罗建. 一种水声接收机数字 AGC 控制方法[J]. 鱼雷技术,2012,20(4):267-270.