

## Optimal Design and Research of Small Signal Amplifier with Low Power Consumption

Ji Da-xiong<sup>1,3\*</sup>, CHEN Xiaozhen<sup>2</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, FENG Xi-sheng<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China;

2. Dept of Electronic Science, NJU, Nanjing 210093, China;

3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** For the problems of the small signal which travels from the distance and the limited power of a acoustic receiver underwater, a kind of design for acoustic general amplifier is presented with low power consumption, high gain amplification and low sensitivity to the errors of passive elements. The electro-circuit system is made up of preamplifier and band pass filter which comprises four operational amplifiers in series instead of RC low-pass net. This design is applied to possess capabilities that the high gain amplification of small signal and pre-whitening process of sea noise background. The computation of poles of the transfer function shows that the designed amplifier is stable. Sea test proves that the system has merits of high precision, good adaptability, stable performance and low power consumption.

**Key words:** high gain; pre-whitening; preamplifier; stability; low power consumption

EEACC: 7220

## 一种低功耗微弱信号放大电路的优化设计与研究

冀大雄<sup>1,3\*</sup>, 陈孝桢<sup>2</sup>, 刘 健<sup>1</sup>, 封锡盛<sup>1</sup>

1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;

2. 南京大学电子科学与工程系, 南京 210093;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘 要:** 针对远距离声源发射的水声信号微弱、水声接收设备电源能量有限的特点, 提出一种功耗小、对无源元件误差灵敏度低、高增益放大的微弱水声信号通用放大电路。系统采用场效应管共源单调谐放大器为前置放大级, 由四级级联低功耗运放构成带通滤波放大电路, 省去传统的 R、C 低通网络, 实现了对微弱水声信号的高增益放大和海洋背景噪声的归一化处理。通过计算电路网络传递函数极点证明了电路系统的稳定性。海上使用表明系统具有精度高、适应性强、电路稳定性好、功耗小等优点。

**关键词:** 高增益; 预白化; 前置放大; 稳定; 低功耗

中图分类号: TB52. 4

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2008)04-1303-04

对于由电池供电的水下声学设备, 要求电路功耗小, 满足设备长时间工作需要, 所以必须对接收机电路进行低功耗设计。远距离声源发射的水声信号到达接收设备时已十分微弱, 其在水声换能器产生的电压信号通常只有十几微伏, 往往淹没在背景噪声之中, 因此必须对十几千赫的水声信号进行宽带滤波和无失真放大, 而采用宽带型运算放大器容易带来功耗较高的问题。以往设计有源带通滤波电路

时常把运放假设为理想运放而不考虑实际运放高频相应下的低通特性<sup>[1]</sup>; 或者把运放的有限增益-带宽积作为限制通频带宽的不利因素, 极少利用实际运放的低通特性。本文设计一种应用于定位声纳接收机的低功耗滤波放大电路, 采用四级低功耗运放和 R、C 高通网络相级联。用四级运算放大器代替传统的 R、C 低通网络, 起到带通滤波和高增益放大的双重作用。由于滤波电路的性能对分离元的误差

相当灵敏,所以这种设计还有一个明显好处,它可以避免过多 R、C 分离元件引入电路造成滤波性能下降。为验证系统的稳定性,通过线性系统中的稳定性判定方法证明系统是稳定的。该放大电路由前置放大级和限幅滤波放大电路组成,能够完成对微弱水声信号的宽带滤波、无失真高增益放大和对海洋背景噪声的归一化处理。

## 1 低功耗放大电路优化设计

设信号为正弦波,频率 12.5 kHz,峰值电压 15  $\mu$ V,要求放大到 +5 V,并且能够对海洋背景噪声进行归一化(关于海洋背景噪声的详细论述请参考文献[2-3]),要求放大器静态电流不大于 1.5 mA。

### 1.1 前置放大

前置电路主要功能是对换能器输出电压进行初级放大,隔离信号源与后级放大电路之间的耦合作用。由于换能器输出微弱的电压信号,因此前置放大电路必须具有低功耗、低噪声、高内阻和高抗干扰能力。该设计采用结型场效应管共源单调谐放大器作为前置放大级(如图 1)。选用 3DJ9J 结型场效应管,其跨导大于 3 000  $\mu$ ,栅源电容约为 2.8 pF,饱和漏源电流约 1 mA,具有良好的低功耗、低噪声和宽频带特性。LC 调谐回路作放大器漏极负载,有利于增强放大电路的选频能力,减小电源输出电流,提高放大倍数。电路实验表明,前置放大器放大增益为 35 dB,电路调谐于 12.5 kHz,品质因数为 4。对于最小幅值 15  $\mu$ V 的输入电压,至少可放大到 0.6 mV。实验表明,该电路的调谐频率和品质因数与场效应管的等效参数有较大关系。在实际电路中需要调整外接的 R、L、C 元件的参数。负载电阻  $R_2$  同时也是下级限幅放大器的输入电阻,若过高,在电路输入端容易引入噪声,使信号受到污染,所以应减小  $R_2$ ,即减小下级限幅放大器的输入电阻,这样在使本级选频特性不变的情况下,可较大地改善下一级限幅放大器的性能。

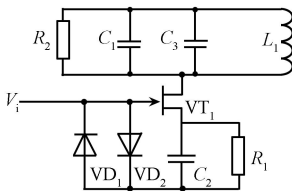


图 1 前置放大电路

$$|A_v| = |A_{v_1} \cdot A_{v_2} \cdot A_{v_3} \cdot A_{v_4}| = \left| \left(-\frac{R_5}{R_4}\right) \left(-\frac{R_7}{R_6}\right) \left(-\frac{R_9}{R_8}\right) \left(-\frac{R_{11}}{R_{10}}\right) \right| = \left| -\frac{2 \times 10^6}{90 \times 10^3} - \frac{270 \times 10^3}{13 \times 10^3} - \frac{270 \times 10^3}{13 \times 10^3} - \frac{390 \times 10^3}{24 \times 10^3} \right| \approx 1.56 \times 10^5 \quad (1)$$

### 1.2 限幅滤波放大

该电路对从前置放大级送来的信号进行滤波和高增益放大。对于由电池供电的水声电路系统,要求电路性能稳定可靠,且功耗较低。选取低功耗运算放大器 OP191,其开环增益为 97 dB,转折频率为 42.86 Hz,单位增益带宽为 3 MHz,40 dB 闭环增益的转折频率约为 12 kHz。一个运算放大器的增益肯定是不够的,通过计算分析需要采用四个放大器。所以对于十几千赫的水声信号,放大电路要采用四级级联运放,每级放大器输入端增加一个 R、C 高通滤波电路,如图 2 所示。运放同相端接 1/2 电源电压,作放大器的直流偏置电压。四运放输入阻抗均为 10 M,增益-带宽积 3 MHz,静态工作电流 0.3 mA,具有高共模抑制比、高输入阻抗、0 dB 开环增益大和低功耗等特点。每个运放器电源端对地均并联一个 0.1 的 CBB 电容,消除电源高频干扰。

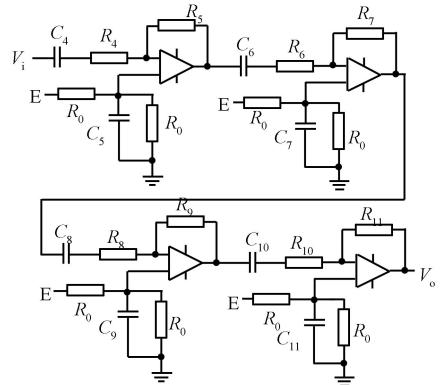


图 2 限幅滤波放大电路

与前置放大电路幅频响应特性不同的是,限幅滤波放大电路中心频率不设在 12.5 kHz,而设在 4 kHz,这样做的目的是将海洋背景噪声功率谱展宽,在通频带内将海洋背景噪声变成平坦的白噪声,有利于信号检测。

### 1.3 增益与频率特性实验分析

微弱信号放大器关键问题在于高增益和频率相应特性。我们对设计的放大器的增益和频率特性在电路实验室分别做了实验。下面对实验结果进行计算分析。

若不发生限幅,电路设计中取  $R_5 = 2 \text{ M}\Omega$ ,  $R_4 = 90 \text{ k}\Omega$ ,  $R_7 = 270 \text{ k}\Omega$ ,  $R_6 = 13 \text{ k}\Omega$ ,  $R_9 = 270 \text{ k}\Omega$ ,  $R_8 = 13 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{11} = 390 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{10} = 24 \text{ k}\Omega$ ,对于 12.5 kHz 正弦波,其放大倍数可估算为

可见当前置放大电路输出为 0.6 mV 时, 只要  $AV > 5000$ , 限幅放大电路的输出就会发生限幅。由(1)式知道, 限幅放大器输出的是近似的方波, 再经过进一步限幅处理, 足以满足极性拷贝相关器所需的方波信号<sup>[4]</sup>。

电路实验表明, 设计的限幅放大器具有 1.8 kHz~13.5 kHz 的通频带, 中心频率约为 4 kHz, 中心频率处的增益约为 83 dB, 12.5 kHz 处的增益约为 72 dB。

对设计的整个微弱信号放大电路进行了电路实验, 根据实验数据用 Matlab 绘图工具绘制幅频响应曲线, 如图 3 所示。放大电路幅频响应曲线在 1.8 kHz 到 13.9 kHz 频带的平均斜率约为 7 dB/倍频程, 与该频带内海洋背景噪声谱线的斜率成反比例关系<sup>[23]</sup>, 能够预先对有色噪声进行白化滤波处理, 满足拷贝相关器对噪声的输入要求<sup>[4]</sup>; 12~14 kHz 频带内的电压增益大于 120 dB, 完全能够将微伏量级的微弱信号放大到数字处理电路需要的电平。

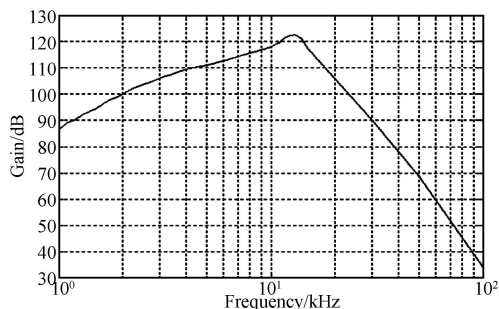


图3 微弱信号放大电路幅频响应曲线

用数字电流表测得放大器静态工作电流为 1.4 mA, 满足了低功耗设计要求。

## 2 放大电路的稳定性

### 2.1 前置放大电路传递函数

为考察电路系统的稳态响应特性, 采用网络传递函数描述电路的输入与输出关系。由于输入信号很小, 并且频率较低, 场效应管工作在线性放大区, 可用小信号模型分析如图所示的共源电路<sup>[1]</sup>。LC 调谐回路作源极负载, 设  $g_m$  是共源小信号低频互导,  $r_d$  场效应管输出电阻, 可以得到:

$$H_{vm}(s) = \frac{v_o}{v_i} = -g_m(R_d // r_d) \quad (2)$$

将  $R_d = \frac{1}{R_2} // \frac{1}{sC_1} // \frac{1}{sC_3} // sL_1$  代入上式得

$$H_{vm}(s) = -\frac{g_m \frac{r_d R_2}{r_d + R_2} \cdot \frac{r_d + R_2}{(C_1 + C_3)R_2 r_d} s}{s^2 + \frac{r_d + R_2}{(C_1 + C_3)R_2 r_d} s + \frac{1}{(C_1 + C_3)L_1}} \quad (3)$$

显然, 这是一个具有电压增益的二阶带通滤波器。由式(3), 得到滤波器的中心频率( $\omega_0$ )和品质因数( $Q$ )分别为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(C_1 + C_3)L_1}} \quad (3)$$

$$Q = \frac{r_d R_2}{r_d + R_2} \sqrt{\frac{C_1 + C_3}{L_1}} \quad (4)$$

### 2.2 限幅滤波放大电路传递函数

以往分析由运放组成的电路时, 几乎都将运放视为理想运放。实际上运放并非表现开环增益无穷大, 当信号频带远小于运放的特征频率时, 运放的频率特性可以表示为一积分单元<sup>[5]</sup>。因此尤其在运放频率特性的高频端, 实际运放与理想运放的频率响应相差很大。将运放模型表示为一个单极点传递函数  $k_0/(1+s\tau_0)$ , 其中  $k_0$  是运放的开环增益,  $\tau_0$  是运放模型的时间常数。对于图 2 所示的第一级运放电路网络, 运放反相输入端  $v_n$  点处的电流方程和运放的电压传输方程分别为:

$$\frac{v_i - v_n}{R_4 + \frac{1}{sC_4}} + \frac{v_o - v_n}{R_5} \quad (5)$$

$$v_o = -\frac{k_0}{1 + s\tau_0} v_n$$

令  $\tau_1 = R_5 C_4$ ,  $\tau_2 = R_4 C_4$ , 联合以上两式得

$$H_1(s) = \frac{v_o}{v_i} = \frac{k_0 \tau_1 s}{(\tau_0 \tau_1 + \tau_0 \tau_2) s^2 + (\tau_0 + \tau_1 + \tau_2 + k_0 \tau_2) s + (1 + k_0)} \quad (6)$$

再令

$$\left. \begin{aligned} A_{VF1} &= \frac{k_0 \tau_1}{\tau_0 + \tau_1 + \tau_2 (1 + k_0)} \\ \omega_{01} &= \sqrt{\frac{1 + k_0}{\tau_0 \tau_1 + \tau_0 \tau_2}} \\ Q_{01} &= \frac{\sqrt{(1 + k_0)(\tau_0 \tau_1 + \tau_0 \tau_2)}}{\tau_0 + \tau_1 + \tau_2 (1 + k_0)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

则有

$$H_1(s) = -\frac{A_{VF1} \frac{\omega_{01}}{Q_{01}} s}{s^2 + \frac{\omega_{01}}{Q_{01}} s + \omega_{01}^2} \quad (8)$$

显然, 这是一个典型的二阶带通滤波器。运用类似方法, 可得到第二、三和四级运放电路网络的二阶传递函数。由图 2 所示, 电路系统能够独立表示成二阶节级联形式。运用基于独立二阶节的电路分析方法, 通过求解电路网络传递函数极点, 分析电路系统的稳定性<sup>[6]</sup>。

## 2.3 稳定性分析

从控制系统角度看,设计的放大电路属于开环控制系统,各级联电路的稳定是系统稳定的充要条件。根据式(3)、式(4)可得到  $r_d = \frac{R_2}{(C_1 + C_3)R_2 \frac{\omega_0}{Q} - 1}$  取  $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $C_1 = 1.2 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 10 \text{ pF}$ ,  $\omega_0 = 12.5 \text{ kHz}$ ,  $Q = 4$ , 并代入上式得  $r_d = 43.7 \text{ k}\Omega$ 。于是式(2)的两个极点分别为  $-9869 \pm i80808$ , 均位于复平面的左半平面,证明前置放大电路是稳定的。

对反馈放大电路进行稳定性分析也是十分必要的。取  $k_0 = 7000$ ,  $\tau = 1/(2\pi \times 42.8 \text{ Hz}) \approx 3.713 \times 10^{-3} \text{ s}$ ,  $C_4 = 1 \text{ nF}$ ,  $R_5 = 90 \text{ k}\Omega$ ,  $R_6 = 2 \text{ M}\Omega$ , 代入式(7)、式(8),得到第一级运放电路网络传递函数的极点为  $-292780.2$  和  $-30809.8$ , 均位于复平面左半平面。对于第二、三和四级运放电路网络,分别把每级网络的 R、C 元件参数及运放一介模型参数代入运放电路网络的传递函数,求出传递函数极点。数值计算表明所有极点的实部均为负值。根据以上计算和分析,可以证明设计的高增益滤波放大电路是稳定的。

## 3 结论

利用运放的低通特性成功代替以往由 R、C 网

络构成的低通滤波器,起到带通滤波和高增益放大双重作用,还可有效地完成对海洋背景噪声的预白化处理。该放大电路已成功应用于某定位声纳的信号预处理,在 2006 年海上试验中,设计的微弱信号放大电路应用于长基线定位系统的海底应答器接收机,最大作用距离大于 10 km,在海底连续工作 7 天,应答器接收数据准确可靠,成功地完成了海上试验。海上应用表明它具有精度高、适应性强、电路稳定性好、功耗小等优点,特别适用于水下目标探测系统微弱信号的检测和预处理。

## 参考文献:

- [1] 康华光. 电子技术基础: 模拟部分(M). 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [2] (美) 乌立克. 洪申译. 工程水声原理(M). 北京: 国防工业出版社, 1972.
- [3] (英) A. D. Waite. 王德石等译. 实用声纳工程(M). 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [4] 冀大雄, 陈孝桢, 封锡盛, 刘健. 水声信号的窄带滤波方法研究[J]. 仪器仪表学报. 2006, 27(6): 1351-1357.
- [5] 陈思远, 陈孝桢. 有源微分电路设计[J]. 电子器件. 2003, 26(2): 155-158.
- [6] Lin Yue-Der, et al. Preamplifier with a Second Order High Pass Filtering Characteristic[J]. IEEE Transaction on Biomedical Engineering. 1999, 46(5): 609-612.

(上接第 1302 页)

的应用领域,尤其适合于阻抗或导纳的测量。

(2) 该方案可以部分地取代矢量型模拟锁相放大器。对待测系统进行检测,信号幅度偏小时,可以在 D/A 后接功率放大器,增大待测系统的激励信号的功率,以期得到精度较高的检测数据。

(3) 本设计的使用频率范围为  $10 \text{ Hz} \sim 5 \text{ kHz}$ , 可以进一步向高低频两端扩展,使之能充分发挥作用。

**致谢** 感谢鲁永康教授在整个过程中给予的指导和帮助!

## 参考文献:

- [1] Qiao RX, Meng XF, Wang YY. Comparison of three Methods of Waveform Recovery in the Presence of Noise[J]. 6th International Symposium on Instrumentation and Control Technolo-

gy, OCT 13-15, 2006.

- [2] Tang YJ, Wang X, Wang YQ, et al. 1st International Symposium on Test Automation and Instrumentation[C]//SEP 13-16, 2006.
- [3] Bi WH, Tang YJ, Yang XL. The Technique of Acquiring Weak Signal in NIR Spectrometer[C]//Conference on Infrared Components and Their Applications, NOV 08-11, 2004.
- [4] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 清华大学出版社, 2002.
- [5] 王江, 杨建宁等. 改善 DDS 输出 LFM 信号谱质的方法[J]. 电子科技大学学报, 2005(6).
- [6] 方俊, 张平. 在 DDS 波形发生器中相位截尾噪声的分析和抑制[J]. 仪器仪表学报, 2003(1).
- [7] 陈炳权, 唐圣学. 基于 EP1K30TC-114 的 DDS 的优化设计与实现[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2005(2).
- [8] 刘朝军, 许人灿等. DDS 输出信号频谱结构的系统分析[J]. 国防科技大学学报, 2005(6).
- [9] 刘兰坤, 潘明海. DDS 的杂散分析及降低杂散的方法[J]. 电子器件, 2007(2).