

低噪声多级放大信号调理的滤波技术研究

高小花,冯西安

(西北工业大学 航海学院,陕西 西安 710072)

摘要: 针对水下近程目标回波信号接收问题,阐述了一款低噪声多级放大信号调理系统,分析了三级放大电路,并着重研究了带通滤波器的设计,利用滤波器设计软件 filter-solutions 对设计的滤波器进行仿真分析。通过分析滤波器电路底噪声,得出 LC 带通滤波器较其他滤波器具有稳定性高、电路结构简单、底噪声较小等特点,有效提高了调理系统的性能。

关键词: 多级放大;LC 带通滤波器;Filter-solution;热噪声;均方值;总的均方根噪声

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2014)03-0076-03

Research of filter technology of low-noise multistage amplifying signal modulating

Gao Xiaohua, Feng Xi'an

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In this paper, we introduce a kind of multistage amplifier signal modulation with low noise for short-range underwater target echo signal reception, three-stage amplifier circuit is analyzed, and focus on the study of the passive band-pass filter design. We introduce the filter design methods, and then simulate and analyze the designed filter by software filter-solutions. Through the noise analysis, we can know the LC band-pass filter is designed not only more stable, simpler circuit structure, also with a lower noise than other filters, and effectively improve the performance of the modulating system.

Key words: multistage amplification; LC band-pass filter; filter-solution; thermal noise; average mean square value; total rms noise

随着科学技术的发展,人们对水下导航、海洋监测、水下目标定位以及水下通信等领域的兴趣更加浓厚,对声纳接收机的性能也有了较高的要求,声纳接收机性能的优劣直接影响到声纳系统的工作性能。一款简单的接收机就是一个信号调理系统,包含信号的放大级电路、可调增益、滤波等电路单元,将待测信号转换为采集设备能够识别的信号,一个高精度的信号调理机对水下研究具有重要的意义。

本文提出一个低噪声多级放大信号调理机,针对进程目标回波的特点,采用多级放大信号调理,但由于底噪声的污染,对滤波器设计就有更高的要求。为了解决上述问题,本文设计一款低噪声四阶 LC 无源 BPF,实现对多级放大信号滤波。通过对不同滤波器电路噪声进行分析和比较,得出 LC 无源 BPF 具有较好的幅频响应和更低的噪声,更好地改善了接收机的性能。

1 低噪声多级放大信号调理电路

水下信号接收调理电路的基本流程为^[1]:声信号转换为电信号,进行放大、滤波、A/D 转换为数字信号进行处理。图 1 为本系统中信号调理系统的框图。

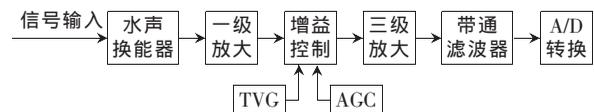


图 1 信号调理系统框图

对弱信号进行检测时,前置放大器是非常重要的,选择合适的参数,以减少放大器自身引入的噪声。本系统采用三级放大形式^[2],信号通过变压器耦合输入降低噪声输入,经过一级放大,采用低噪声集成运放 AD620,增益为 40 dB,用于放大前端接收到的微弱信号;AGC 部分采用 VCA810^[3] 可以使得线性可控增益范围扩大到 -40 dB~+40 dB,用于调节通道放大倍数,压缩信号动态范围,稳定输出信号幅度^[2];TVG 时变增益控制用于

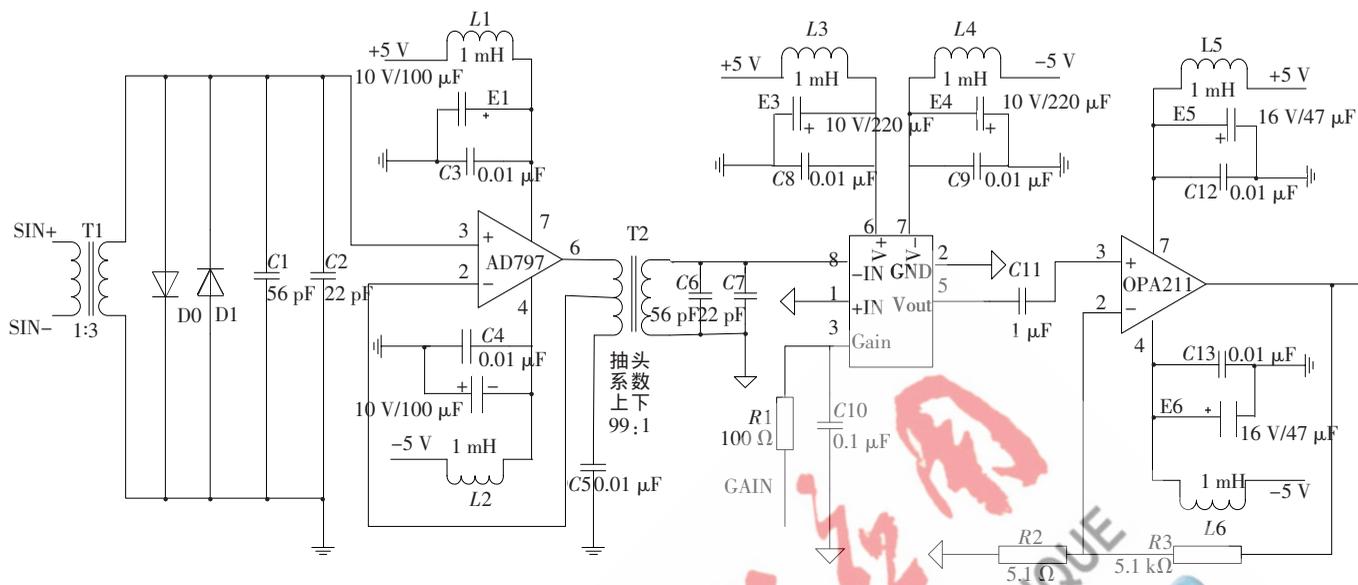


图2 三级放大电路图

控制混响,在近距离探测时保证系统输出稳定;三级放大采用低噪声集成运放 OPA211^[3],增益为 40 dB,用于进一步提高系统整体增益,三级级联放大保证了系统总体增益高达 120 dB,并可在 40 dB~120 dB 范围内自动调节,可以接收小到微伏级的水下弱信号。多级放大电路如图 2 所示。

2 带通滤波器设计

虽然在本系统中采用的是高精度、低噪声集成运放设计的多级放大电路,但仍然不可避免地引入了放大器自身的噪声,对于水下微弱信号的接收,这些噪声对信号的影响也是不能忽视的。本系统设计了一个中心频率 100 kHz,带宽 40 kHz,阻抗 500 Ω 的无源 LC 巴特沃斯带通滤波器。整个设计过程大致可分为两个阶段^[4],前一个阶段是依据归一化 LPF 设计出通带宽度等于待设计 BPF 带宽的 LPF,后一个阶段是把这个通带宽度等于待设计 BPF 带宽的 LPF 转换成 BPF。

2.1 基于 Filter-Solutions 设计的 BPF

Filter-solutions 带通滤波器也是按照如上所表述的原理设计的。基于 Filter-Solution 软件设计的归一化一款中心频率 100 kHz,带宽 40 kHz,阻抗为 500 Ω 的巴特沃斯四阶带通滤波器。如图 3、图 4 所示,分别为无源滤波器和有源滤波器的电路图,它们具有相同的频率、相位及群延迟特性。

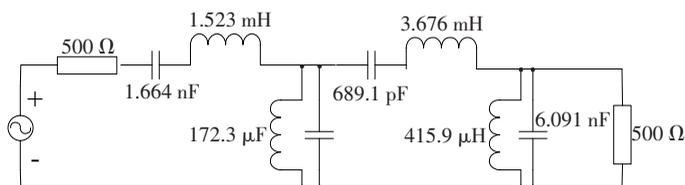


图3 巴特沃斯型无源 BPF

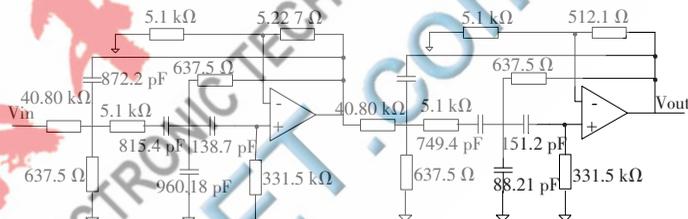


图4 巴特沃斯型有源 BPF

从滤波器的电路图可以看出,与有源滤波器相比较,无源滤波器除本身系统稳定性好,适合高频滤等优点外,其电路结构也比较简单,且理论自噪声为 0。对于水下高频弱信号的接收,是一种比较好的滤波方法。

2.2 LC 无源滤波器的制作

根据滤波器的设计步骤,由归一化 LPF 设计出了与带通滤波器等效的 LPF,然后将其转换为待设计的 BPF。转换原则为:(1)将低通的每个电容并联一个电感,使得谐振频率为中心频率 f_0 。(2)将低通的每个电感串联一个电容,使得谐振频率为 f_0 。而电感与电容的匹配也成为了制作 LC 滤波器的难点。总而言之,在制作过程中,LC 滤波器的制作主要有两个步骤:

(1)电容的选择。由于没有所需要的电容值,因而使用 Agilent 阻抗分析仪在频率为 100 kHz 的条件下测得实际电容值的大小进行选择,通过电容的并联尽量达到电路中电容的要求。

(2)电感线圈的制作。制作外径为 6 mm,内径为 3 mm,高为 3 mm 且磁通量 μ 值为 4 000,磁芯为 3.671 mH 与 1.583 mH 的电感;外径为 7 mm,内径为 4 mm,高为 3 mm 且 μ 值为 2 000,磁芯为 180.1 μ H 与 408.1 μ H 的电感。使用 Agilent 阻抗分析仪在频率为 100 kHz 的条件下测出电感线圈实际的大小及阻抗值。根据计算和实际电路的调试,适当改变电感值,使其与电容值相匹配,

技术与方法 Technique and Method

确保电感与串联或并联的电容谐振频率为 f_0 。

3 滤波器的噪声分析

在电路中最多考虑的是电路中等效电阻产生的热噪声。电压噪声的噪声密度为，

$$S_U(f) = 4kTR \quad k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \quad (1)$$

其中, k 是波尔兹曼常数, T 是电阻温度, 以绝对温度 K 计量。在频带宽度为 BW 内产生的热噪声的电压均方值为

$$e^2 = \int 4kTR df = S_U(f) BW \quad (2)$$

3.1 LC 滤波器电路的噪声

理想的电抗元件不会产生噪声, 因此在理想情况下 LC 滤波器的噪声为零, 对滤波器来说这无疑是最好的。但实际电抗元件是有损耗电阻的, 这些损耗电阻将会产生噪声。在实际情况下, 电感的损耗电阻是不能忽略的, 而电容的损耗电阻一般可以忽略不计^[5]。

采用 Y 参数分析系统函数如图 5 所示, Y_i 参数的表达式如下:

$$Y_0 = \frac{1}{R_1}, Y_1 = \frac{sC_1}{1+s^2L_1C_1}, Y_2 = sC_2 \frac{1}{sL_2}, Y_3 = \frac{sC_3}{1+s^2L_3C_3}, Y_4 = sC_4 + \frac{1}{sL_4} + \frac{1}{R_2} \quad (3)$$

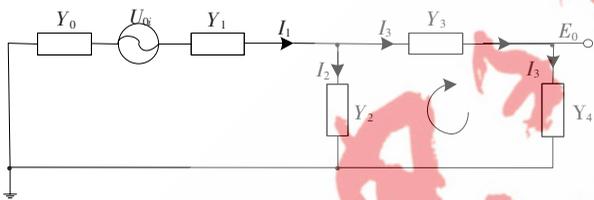


图5 LC滤波器噪声电路的Y参数图(Y_0 为噪声元件)

图5中导纳 Y_0 产生的噪声电压为 U_{0i} , 假定其他元件均为无噪声元件, 计算输出电压噪声 E_0 的电路图 $E_0 = U_{0i}G_0(s)$ 。根据 KCL 和 KVL, 可以得到其传递函数 $G_0(s)$ 为:

$$G_0(s) = \frac{Y_1}{(Y_1+Y_2)(Y_3+Y_4)Y_3Y_4} \quad (4)$$

同理可以假定其他元件为无噪声元件, 如图 6 所示, 得 Y_1, Y_2 产生噪声电压 U_{1i}, U_{2i} , 输出的噪声电压分别为 E_1, E_2 。其传递函数 $G_1(s), G_2(s)$ 为:

$$G_1(s) = G_2(s) = \frac{Y_3}{Y_3+Y_4} \quad (5)$$

而 Y_3, Y_4 的输出传递函数由电路图可知均为 1:

$$G_3(s) = G_4(s) = 1 \quad (6)$$

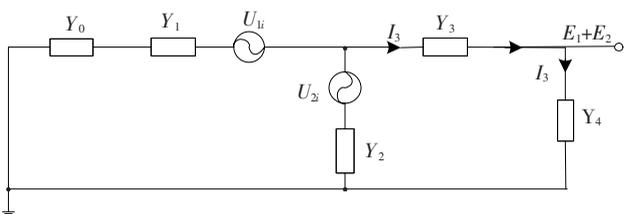


图6 LC滤波器噪声电路的Y参数图(Y_1, Y_2 为噪声元件)

由于电抗元件的损耗电阻与频率、线圈线径、线圈层数等多种因素有关, 因此目前还没有有效的线圈电感阻抗计算公式。最简便的方法就是利用阻抗分析仪测得所制作电感线圈的损耗电阻, 并计算其噪声电压。表 1 所示为实际损耗电阻, 每种电感线圈分别制作了 8 个用以求出平均值。在温度为 27°C (约 300 K)、带宽 40 kHz 计算电阻产生的噪声电压也即热噪声的均方值电压。通过噪声的计算公式(2), 可以得到噪声的电压均方值。使用 Agilent 阻抗分析仪在 100 kHz 下测得线圈的损耗电阻值如表 1 所示。

表 1 电感损耗阻值 (Ω)

	1.583 mH	180.1 μH	3.671 mH	408.1 μH
1	340.52	15.7	797.8	21.3
2	325.44	12.5	723.9	25.4
3	350.34	13.9	810.6	21.5
4	370.15	14.54	739.9	19.9
5	320.45	17.27	800.7	24.0
6	349.73	14.35	719.8	23.2
7	401.14	13.89	690.5	21.5
8	378.54	12.17	740.4	25.0
平均值	354.5	14.3	753.0	22.8
电压噪声均方值	$5.87 \times 10^{-13} \text{ V}^2$	$2.37 \times 10^{-14} \text{ V}^2$		$4.64 \times 10^{-4} \text{ V}$

通过计算得到 $|G_0(s)| < 1$, 因此输入电阻的噪声很小, 可以忽略。 $|G_1(s)| = |G_2(s)| < 1/2, |G_3(s)| = |G_4(s)| = 1$ 。因此计算的最大输出噪声电压均方根值为:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + E_4^2} \approx 1.5 \times 10^{-6} \text{ V} \quad (7)$$

3.2 有源滤波器电路噪声分析

在一般的放大器电路中存在 5 种噪声源^[6]: 散粒噪声、热噪声、闪烁噪声、爆裂噪声和雪崩噪声。对于运算放大器内部的噪声是通过内部等效来描述^[6]: 运算放大器内部可视为一个理想的无噪声运算放大器的同相输入端串联一个噪声电压源 e_n , 同相、反相输入端到地分别串联一个噪声电流源 i_{np}, i_{in} 来表征内部噪声。把噪声模型添加到滤波器电路中, 分析电路产生的噪声, e_1, e_2, e_3 分别为电阻 R_1, R_2, R_3 产生的噪声电压, 如图 7 所示。

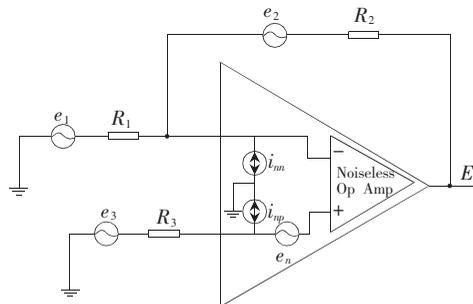


图7 运算放大电路噪声模型

$$e_i^2 = \int 4kTR_i df = S_{U_i}(f) BW \quad (i=1, 2, 3) \quad (8)$$

$$E_1^2 = e_1^2 \left[\frac{R_2}{R_1} \right]^2, E_2^2 = e_2^2 \quad (9)$$

技术与方法 Technique and Method

$$E_3^2 = e_3^2 \left[\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right]^2, E_n^2 = \int \left[e_n \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right]^2 df \quad (10)$$

$$E_{np}^2 = \int \left[i_{np} R_3 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \right]^2 df, E_{nn}^2 = \int i_{nn}^2 R_2^2 df \quad (11)$$

E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_n 、 E_{np} 、 E_{nn} 分别是 R_1 、 R_2 、 R_3 、 e_n 、 i_{np} 与 i_{nn} 产生的噪声电压。所以放大器内部噪声电压的均方根值为：

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + E_n^2 + E_{np}^2 + E_{nn}^2} \quad (12)$$

将运放的噪声模型添加到实际带通滤波器中，并且在实际电路中采用高速、低功耗运算放大器 AD849^[7]，该芯片具有良好高频性能，其噪声参数为电压噪声 3 nV/rtHz，电流噪声 1.5 pA/rtHz，结合实际电路计算出有源滤波器的噪声。经过计算可以得到噪声电压均方根值约为 $1.31 \times 10^{-5} V$ 。芯片工作时由于温度的升高，噪声电压值将会增大。

随着科学技术的提高，现代电子技术的日益成熟，集成电路得到了迅猛发展，所以现在已经有了带通滤波器集成芯片的产生。现代滤波器的芯片类型主要是由 MAXIM 公司推出的 MAX260、MAX267、MAX274 等。可以根据集成滤波芯片设计带通滤波器，但是它所设计的也是一种有源滤波器，与有源滤波器具有相似的噪声分析，因此在这里不做进一步讨论。通过两种滤波器的比较可以得出，无源 LC 滤波器除了本身系统稳定外，而且电路简单易于设计，底噪声较小，可以提高整个电路的性能，从而更好地完成中高频滤波。

水下信号接收是对海洋技术研究的重要基础。而噪声是信号接收机的重要参数，特别是对设计一款精密的信号调理机来说，信噪比决定了灵敏度，噪声越小，信号

接收机的灵敏度越高。本文阐述了一个具有低噪声多级放大电路的信号调理机，并研究了一款具有低噪声的 LC 无源带通滤波器。基于对噪声的分析，给出了系统的测试结果，本系统性能稳定，可靠性高且可控动态范围在 40 dB~120 dB 之间。对于研究自噪声小，动态范围大且精度高的水下接收机具有重要的意义。

参考文献

- [1] 张金利, 景占荣, 梁亮, 等. 微弱信号的调理电路设计和噪声分析[J]. 电子测量技术, 2007, 30(11): 40-42.
- [2] 代明清, 冯西安, 高天德, 等. 多通道声纳信号预处理系统设计[J]. 鱼雷技术, 2012, 20(3): 175-179.
- [3] 赵志刚, 冯西安. 一种水下主动探测系统的模拟预处理机设计[J]. 电声基础, 2009, 33(4): 45-48.
- [4] 森荣二. LC 滤波器设计与制作[M]. 薛培鼎, 译. 北京: 科学出版社, 2005.
- [5] 李明勇, 陈敏, 翟建勇, 等. 高频电感线圈损耗的分析和计算[J]. 电子电力技术, 2007, 41(9): 47-49.
- [6] 何峥嵘. 运算放大器电路噪声分析和设计[J]. 微电子学, 2006, 36(2): 148-153.
- [7] 张乐锋, 张鼎. 运算放大器应用技术手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.

(收稿日期: 2013-10-14)

作者简介:

高小花, 女, 1987 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 数字信号处理、电子技术应用。

冯西安, 男, 1962 年生, 博士生导师, 教授, 主要研究方向: 信号与信息处理、电子技术应用。