

一种基于双二阶的六阶开关电容滤波器的设计和仿真

林 莉,刘延申

(华中师范大学 物理科学与技术学院,湖北 武汉 430079)

[摘要] 从开关电容滤波器的原理出发,通过 MATLAB 的仿真,在时钟频率与中心频率的比值达到一定数值的时候,把 s 域函数进行变换,用信号流图的方法设计模拟滤波器,从而提高滤波器的精度和可靠性,并在 $0.25\mu\text{m}$ 的 CMOS 电路中实现.

[关键词] 开关电容,滤波器,MATLAB,信号流图

[中图分类号] TM52, [文献标识码] B, [文章编号] 1672-1292-(2004)03-0045-04

1 设计背景

随着市场上对计算机、通信设备、消费电子等手持设备需求的不断增长,低电压、低功耗 IC(集成电路)设计的重要性大大提高.晶体管的栅源电压从 2001 年的 1.5 V 下降到 2003 年的 0.9 V ,这激起了低压 IC 的设计.近几年,由于开关电容滤波器能够实现更高的精度和更低的失真,人们对开关电容滤波器做了大量的研究和开发工作.为此设计了一个基于双二阶的六阶开关电容滤波器,并给出仿真结果.

2 开关电容滤波器的原理

开关电容滤波器是用开关电容网络构成的滤波器,其基本原理如图 1 所示.把一般的有源滤波器的电阻用一个开关电容(即两个模拟开关和一个电容)来代替,当开关 q_1 关闭时,电容被充电 CV_{in} ,然后 q_1 打开, q_2 关闭,电容存储的电荷为 $C(V_{out} - V_{in})$.在一个周期之内,从输入流到输出的平均电流为 $C(V_{out} - V_{in})/T = FC(V_{out} - V_{in})$.输入时钟频率足够高的时候,可以看作是一个连续的过程,输入和输出之间有一个等效电阻 $R_{eq} = 1/FC$.其中中心频率为 $F_0 = 1/2 R_{eq} C_1 = FC/2 C_1$,这样中心频率就由电容比和时钟频率来决定,一般时钟频率和中心频率的比值是 50 1 或者 100 1.与连续有源滤波器相比,用开关电容来代替电阻能够减少芯片面积,电容比能够达到 0.1% 的精度,开关电容滤波器能提供比较精确的中心频率,并且它受温度和工艺的影响很小,能够实现高度匹配,用小电容实现

大电阻.

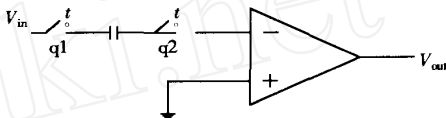


图 1 基本原理图

实现高阶滤波器有两个主要的方法:一是采用双二阶基本单元来实现高阶滤波器,它的结构简单,容易实现.二是采用 LC 梯形网络来实现高阶滤波器.尽管梯型滤波器具有对电容的变化不灵敏的优点,但是因为双二阶在几十 MHz 的范围内比梯形滤波器更有吸引力,并且梯形滤波器包含更多的环路会造成滤波器的速度慢,所以在本文中我们采用双二阶的基本单元来实现高阶滤波器^[1].

3 六阶开关电容滤波器的仿真

一个高阶滤波器函数的实现可以通过一个级联的输出函数和输入函数的比值来实现,前一级的输出不做为后一级的负载.高阶滤波器的实现可以是奇次也可以是偶次.双二阶是一个低阶函数,它的表达式一般为:

$$t_i(s) = \frac{a_{i2}s^2 + a_{i1}s + a_{i0}}{s^2 + b_{i1}s + b_{i0}} \tag{1}$$

式(1)中分子的系数 a_{i2}, a_{i1}, a_{i0} 的一个或是两个可为零,这样就形成了低通、高通、带通滤波器函数.

高阶滤波器函数的表达式可以表示为:

$$T(s) = t(s) \prod_{i=1}^N t_i(s) \tag{2}$$

式(2)中 $t(s)$ 表示一个一阶的滤波器函数,如果是偶次高阶滤波器函数就去掉 $t(s)$.

收稿日期: 2003-11-25.
作者简介: 林莉(1976 -),女,硕士研究生,主要从事开关电容滤波器的学习与研究. E-mail:alice_alice_nc@163.com
通讯联系人: 刘延申(1949 -),教授,主要从事集成电路应用的教学与研究. E-mail:yanshenl@yahoo.com

式(2) 产生一个双二阶的滤波器,级联多个双二阶的基本单元就构成一个高阶滤波器,设计的时候要注意^[2]:

(1) 极点配对的问题,每一个零点和极点配对产生一个基本的双二阶滤波器函数.

(2) 增益在各个双二阶中的分配问题也是一个值得注意的问题.

(3) 每一个双二阶在整个滤波器函数中的位置如何.

很明显,零、极点的配对问题大大影响了整个滤波器函数的动态范围,双二阶函数的排序对整个

滤波器的噪声有重要的影响,高阶滤波器的设计要重点考虑最大动态范围、最大信噪比的问题,其它的还有最小灵敏度、最小通带抑制、最简单调制过程.

根据以上说明,设计一个基于双二阶的高阶低通开关电容滤波器.其指标为: $F_p = 300\text{ kHz}$, $F_s = 600\text{ kHz}$, $F_c = 2.5\text{ MHz}$, $R_p < 0.1$, $R_s = 70\text{ dB}$.

从滤波器的理论出发,用数学工具 MATLAB^[3]按照滤波器的指标对几个原形滤波器进行仿真,得到 BUTTERWORTH、CHEBYSHEV1、CHEBYSHEV2、ELLIPTIC 函数滤波器的频谱关系如图 2 所示.

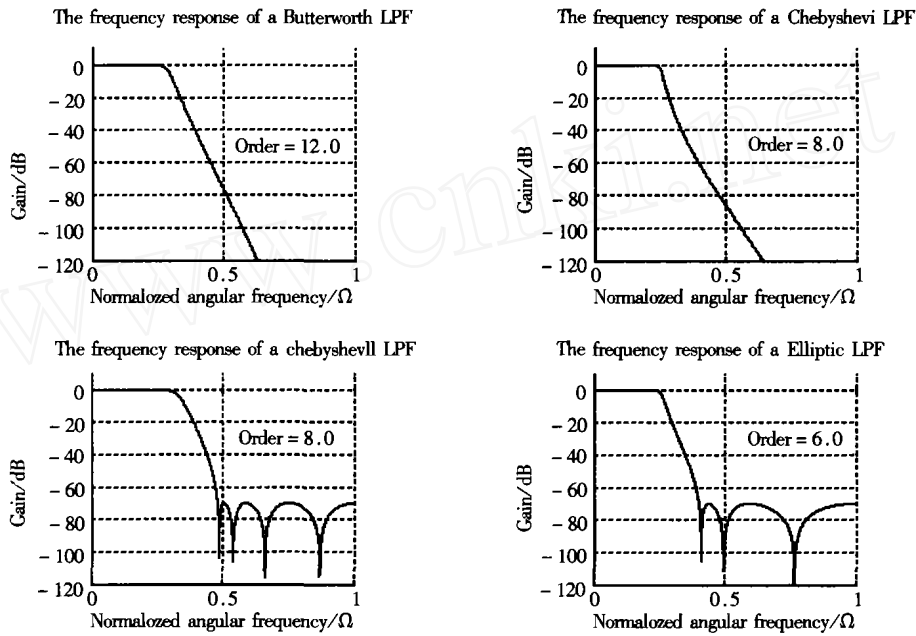


图 2 滤波器的频谱图

从图 2 中可以看出 ELLIPTIC 滤波器的阶数为 6,满足指标的要求.选择六阶的 ELLIPTIC 滤波器来实现所要求的开关电容滤波器,电路比较简单,能够以较少的 CMOS 晶体管来实现传输函数,具有

设计较容易、功耗较小等优点.

确定了滤波器的阶数和类型,得出六阶开关电容滤波器的传输函数为:

$$\frac{0.003\ 030\ 9\ (z^2 + 1.48z + 1)\ (z^2 - 0.567\ 6z + 1)\ (z^2 - 0.033\ 24z + 1)}{(z^2 - 1.316z + 0.465)\ (z^2 - 1.288z + 0.645\ 3)\ (z^2 - 1.315z + 0.877\ 7)} \quad (3)$$

从式(3)的传输函数中可以看到,其直流增益为 0.003 030 9.然后再进行 MATLAB 仿真,根据仿真其传输函数零极点的位置如图 3 所示.

从图 3 的仿真可以得到六阶开关电容滤波器的极点为:

$$\begin{aligned} &0.657\ 34 + 0.667\ 56i \quad 0.657\ 34 - 0.667\ 56i \\ &0.644\ 13 + 0.479\ 95i \quad 0.644\ 13 - 0.479\ 95i \\ &0.657\ 92 + 0.179\ 34i \quad 0.657\ 92 - 0.179\ 34i \end{aligned}$$

零点为:

$$\begin{aligned} &-0.739\ 91 + 0.672\ 71i \quad -0.739\ 91 - 0.672\ 71i \\ &0.283\ 82 + 0.958\ 88i \quad 0.283\ 82 - 0.958\ 88i \end{aligned}$$

0.016 618 + 0.999 86i 0.016 618 - 0.999 86i
根据零极点配对原则:将极点与最接近它的零点相配对,可以得到最大输出动态范围,从而得出如下的双二阶函数:

$$\frac{z^2 - 0.567\ 6z + 1}{z^2 - 1.315z + 0.877\ 7} \quad (4)$$

$$Q_3 = 6.282\ 3 \quad \omega_3 = 2.099\ 8e + 006$$
$$\frac{z^2 - 0.033\ 24z + 1}{z^2 - 1.288z + 0.645\ 3} \quad (5)$$

$$Q_2 = 1.627\ 6 \quad \omega_2 = 1.744\ 3e + 006$$
$$\frac{z^2 + 1.48z + 1}{z^2 - 1.316z + 0.465} \quad (6)$$

$$Q_1 = 0.4183 \quad 1 = 1.1581 \times 10^6$$

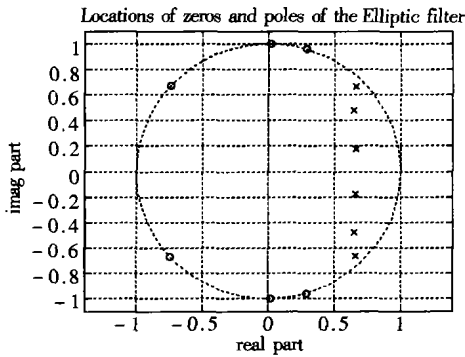


图3 传输函数的零极点分布

高阶滤波器的实现是通过逐渐增大的 Q 值的排序来实现的,因此这个高阶滤波器的实现就是把式(4)、(5)、(6)的双二阶函数按照 Q_1, Q_2, Q_3 的顺序级联来实现.它的直流增益的分配按照均分的原则^[2].

4 基于信号流图的六阶开关电容滤波器的设计

从上面的仿真结果中,我们将式(4)、(5)、(6)所示的双二阶函数,通过信号流图变换方法用开关电容来实现,首先根据双二阶函数的一般表达

式^[4]:

$$H(S) = \frac{-(K_2 S^2 + K_1 S + K_0)}{S^2 + \frac{0}{Q} S + \frac{2}{0}} = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} \quad (7)$$

将公式(7)经过等式变换,得到:

$$S^2 V_{out} = -[K_2 S^2 + K_1 S + K_0] V_{in} - \left(\frac{0}{Q} S + \frac{2}{0} \right) V_{out} \quad (8)$$

$$V_{out} = -\frac{1}{S} [(K_1 + K_2 S) V_{in} + \left(\frac{0}{Q} \right) V_{out} + 0 V_1] \quad (9)$$

其中:

$$V_1 = \frac{1}{S} [(K_0/0) V_{in} + 0 V_{out}] - 0 \quad (10)$$

由式(9)、(10)得出相应的信号流图如图4所示:

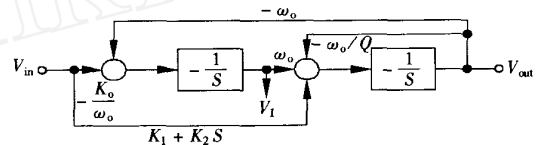


图4 双二阶的开关电容滤波器的信号流图

根据信号流图经过变换得到有源RC电路,再把电阻用开关电容来实现,就可以得到我们想要的双二阶开关电容网络如图5所示:

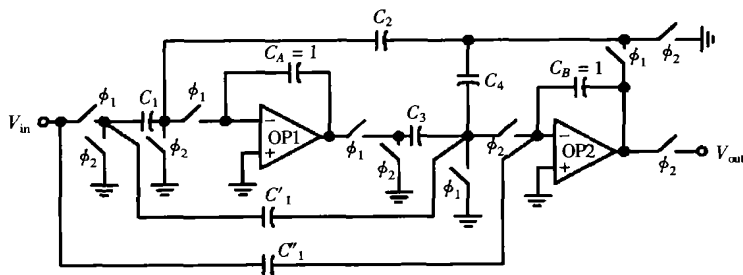


图5 双二阶开关电容网络图

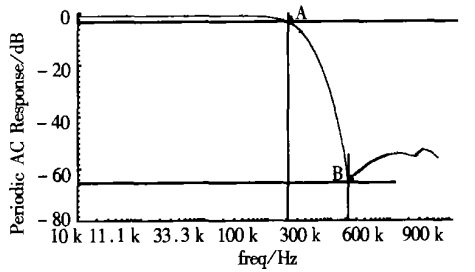
六阶开关电容滤波器由3个双二阶开关网络级联实现,经过计算其各个电容值如下所示:

双二阶1: $C_1 = 1, C_{1-1} = 0, C_{1-1} = 6.1438, C_{2-1} = 0.5663, C_{3-1} = 0.5663, C_{4-1} = 1.1504, C_{A-1} = 1, C_{B-1} = 1.$

双二阶2: $C_2 = 0.8777, C_2 = 0, C_{1-2} = 1.6755, C_{2-2} = 0.7504, C_{3-2} = 0.7504, C_{4-2} = 0.1629, C_{A-2} = 1, C_{B-2} = 1.$

双二阶3: $C_3 = 1, C_3 = 0, C_{1-3} = 2.6441, C_{2-3} = 0.7438, C_{3-3} = 0.7438, C_{4-3} = 0.5498, C_{A-3} = 1, C_{B-3} = 1.$

将3个双二阶级联就可以实现六阶低通开关电容滤波器.其仿真图如图6所示:



A: (298 K -3.380)
B: (601 K -64.532)

图6 六阶低通开关电容滤波器传输函数

其中阻带抑制为 64 dB,跟设计指标有一定的误差,可以通过动态范围尺度变换和阻抗尺度变换等优化方法来进一步满足设计指标,其优化后的传输函数的仿真图如图 7 所示:

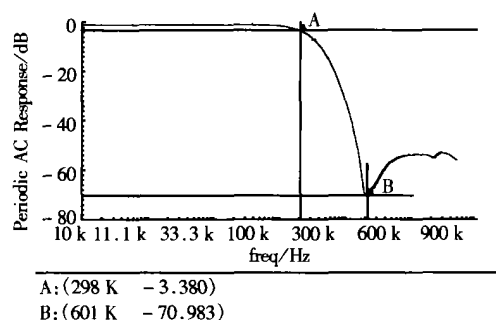


图7 优化后的六阶低通开关电容滤波器传输函数

如上所述,我们介绍了一种实现高阶开关电容滤波器的具体方法,通过从原理出发,利用 MATLAB 的仿真,在 CADENCE 中实现此设计。

[参考文献]

- [1] Ng Wai Hon. Design of Cmos Wide-band Switched-capacitor Bandpass Filter [D]. Hongkong University of Science and Technology, 2002.
- [2] Theodore, Deliyannis, Yi Chuangsun, *et al.* Continues Time Active Filter Design[M]. Hongkong: Chemical Rubber Company Press, 1999.
- [3] 张志涌. MATLAB 教程——基于 6. X 版本[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [4] Johns D A, Martin K. Analog Integrated Circuit Design[M]. New York: Wiley and Sons Inc, 1997.
- [5] Fiex T S, Lee B, Allstot D J. CMOS Switched-current Biquadratic Filters[J]. Proc IEEE Int Symp Circuits Syst, 1990, 71 (8): 2300 ~ 2304.

Design of Six Order Switch Capacitor Filter and Its Simulation Based on Biquard

LIN Li, LIU Yanshen

(School of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The principle of the switch capacitor filter was studied. The transfer of the S domain function was dealt with when the ratio of the clock frequency to the central frequency reached a certain value. The analog filter was designed by adopting the signal graph method to improve the precision and the reliability, with the function realized in the CMOS circuit of 0.25 μm .

Key words: switch capacitor, filter, MATLAB, signal flow graph

[责任编辑:严海琳]

(上接第 44 页)

Modulator and Demodulator of Phase-continuous / 4DQPSK Based on FPGA

KE Wei, YIN Kuixi

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: The phase-continuous / 4DQPSK modulator and demodulator, which are based on the large-scale FPGA, are introduced in this paper. The majority of the functions in the modulator and the demodulator are realized by FPGA resource, which can not only enhance the system's reliability, flexibility and integration, but also reduce its size. Because of the particular phase transformation in phase-continuous / 4DQPSK, double-channel design is employed, generating transition-phase and main phase alternately. To control the sampling-time, the counter is used in the demodulator, which can ensure that the samples locate in the main phase area. The experiment results have shown that the design is feasible.

Key words: phase-continuous / 4DQPSK, FPGA, modulator, demodulator

[责任编辑:刘健]