

# 开关电流滤波器的设计与实现

胡沁春<sup>1</sup>, 郭迪新<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412008; 2. 湖南理工学院 计算机与信息工程系, 湖南 岳阳 414006)

**摘要:** 提出基于开关电流技术的滤波器设计与实现。开关电流技术是基于电流模的模拟数据采样信号处理技术, 它符合集成电路的标准数字工艺, 具有更高的工作频率, 因而成为开关电容技术的替代技术。通过开关电流一阶节、二阶节的级联, 可以实现高阶开关电流滤波器。仿真结果证实了开关电流滤波器的良好特性。

**关键词:** 滤波器; 开关电流; 开关电容

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2009)01-0092-04

## Design and Implementation of Switched-Current Filter

Hu Qinchun<sup>1</sup>, Guo Dixin<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Info. Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China;

2. Dept. of Computer and Info. Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang Hunan 414006, China)

**Abstract:** The design and implementation of switched-current (SI) filter is proposed. SI technique is a new analogue sampled-data signal processing in the current mode, which aims to replace switched-capacitors (SC) by offering superior digital process compatibility and the potential for higher operating frequencies. SI filter can be implemented by using the cascade of the first order and second order section. Simulated results indicated a good performance for SI filter.

**Key words:** filter; switched-current; switched-capacitors

## 0 引言

目前, 开关电容(Switched-capacitors, 简记为 SC)技术是模拟集成滤波器的主要实现技术。20 世纪 70 年代问世的开关电容滤波器, 比早期的有源 RC 滤波器精度更高、集成密度更大, 一直以来在电压域模拟取样数据信号处理领域中占主导地位。然而, 随着集成电路工艺向深亚微米发展, 开关电容的局限性逐渐显露<sup>[1,2]</sup>: 1) 集成高质量的线性浮置电容须采用双层多晶硅, 因而与标准数字工艺不能完全兼容; 2) 随着集成工艺的发展, 电源电压从 5 V 下降为 3.3 V, 现在正向 2.5 V 甚至 1.5 V 的方向发展, 在如此低的电源电压下, SC 滤波器要获得高速度和大动态范围就很困难。在这种背景下, 对开关电流 (Switched-current, 简记为 SI) 滤波器的研究得到迅速发展, 且在模拟取样数据

处理领域有着取代 SC 滤波器的趋势。开关电流电路是基于电流模的电路, 它用离散时间的取样数据系统处理连续时间的模拟信号, 具有以下优点<sup>[1]</sup>: 1) 高频特性好、适于低电压工作、动态范围大; 2) 同开关电容滤波器相比, 开关电流滤波器不使用运放, 从而电路简单、不存在运放带来的限制和误差, 且与标准的 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 工艺完全兼容, 便于电路的大规模集成。

本文运用开关电流技术实现滤波器的设计, 并进行仿真验证。开关电流滤波器的时间常数仅由 MOS 管的宽长比 (MOS 管沟道尺寸的比值) 和时钟频率确定, 具体参见文献<sup>[1]</sup>。利用此特性, 调节时钟频率可实现开关电流滤波器截止频率 (带宽) 比例变化, 扩展了开关电流滤波器的应用范围, 具有良好实用价值。

收稿日期: 2008-09-25

作者简介: 胡沁春 (1976-), 男, 湖南溆浦人, 湖南工业大学工程师, 博士, 主要从事电子信息技术, 神经网络和小波变换理论与应用方面的研究, E-mail: huqinc@163.com

## 1 开关电流滤波器的设计

滤波器有低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器、带阻滤波器4种。一般说来,有关滤波器的讨论大多数是围绕归一化低通的结构进行的,但这并不表示它们是最通用的滤波器。实际上,这样限定讨论的原因是:1)归一化低通滤波器是最容易实现的;2)大多数的带通、带阻、高通及别的低通滤波器易从归一化低通滤波器通过频率变换得到。故本文只讨论低通滤波器的设计与实现方法。

连续时间滤波器的设计,一般是先寻求一个 $s$ 域的传输函数,使其频率特性满足滤波器的设计要求,然后用具体电路去实现这个传输函数。这些技术都很成熟,不仅有许多表格可查,也有现成的软件可用。开关电流滤波器属于离散时间系统,其设计与连续时间滤波器相似:1)根据目标滤波器的设计要求,确定连续时间滤波器 $s$ 域的传输函数,将目标滤波器的 $s$ 域传输函数正确地转换成 $z$ 域传输函数;2)用开关电流电路综合实现 $z$ 域传输函数。其中,把 $s$ 域的有理传输函数转换成 $z$ 域传输函数是非常重要的。用于网络综合的 $s$ 域到 $z$ 域变换有4种:前向差分变换、后向差分变换、无损离散积分变换和双线性变换。其中,无损离散积分变换和双线性变换属于完善的变换,但双线性变换最为完善<sup>[3]</sup>。如果用 $\omega_{RC}$ 表示 $s$ 域的频率,而用 $\omega_{SC}$ 表示 $z$ 域的频率,则只有在 $\omega_{RC} = \omega_{SC}$ 时,变换所得的开关电流滤波器的频率特性才会与模拟的相同。对于双线性变换有:

$$\omega_{RC} = \frac{2}{T} \tan\left(\frac{\omega_{SC} T}{2}\right) \quad (1)$$

由式(1)知:随着 $\omega_{SC} T$ 的增长, $\omega_{RC} T$ 的增长变快,当 $\omega_{SC} T$ 等于 $\pi$ 时, $\omega_{RC} T$ 趋于 $\infty$ 。

对于无损离散积分变换有:

$$\omega_{RC} = \frac{2}{T} \left( \sin \frac{\omega_{SC} T}{2} \right) \quad (2)$$

在开关电流滤波器的设计中,只有考虑了连续域与离散域频率间的非线性关系,才能得到正确的设计结果。为了消除这种非线性影响,可对原型模拟滤波器的频率特性进行预翘曲,以补偿变换中引入的频率非线性畸变<sup>[3]</sup>。经过预翘曲补偿后,开关电流滤波器的带宽符合设计要求。双线性开关电流滤波器的过渡带比模拟滤波器更陡,滤波特性优于原型滤波器。无损离散积分变换开关电流滤波器的过渡带的下降比模拟滤波器原型缓慢,即过渡区的特性比模拟原型滤波器的差。为了满足应用要求,需增加阶数。

## 2 开关电流滤波器的实现

滤波器的综合实现可用电路级联方式实现,这种

方式具有模块性和简易性等优点,在基于开关电流技术的集成滤波器设计与实现中有着良好的应用。若滤波器有 $n$ 阶传输函数,当 $n$ 为偶数时,滤波器可以用 $n/2$ 个二阶节的级联实现;当 $n$ 为奇数时,滤波器可以用 $(n-1)/2$ 个二阶节同一个一阶节的级联实现。

### 2.1 开关电流一阶节

通用一阶节的传输函数为:

$$H(s) = \frac{i_o(s)}{i_i(s)} = \frac{k_1 s + k_0}{s + \omega_0} \quad (3)$$

将式(3)变换得:

$$i_o(s) = \frac{1}{s} \left[ -(k_1 s + k_0) i_i(s) + \omega_0 i_i(s) \right] \quad (4)$$

可见,对式(4)可用一个开关电流反相积分器来构成。图1中, $J$ 代表恒流源电流, $M$ 代表MOS管, $a_1 \sim a_3$ 为系数(MOS管宽长比),MOS管 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_4$ 的宽长比为1, $M_3$ 的宽长比为 $a_3$ 。

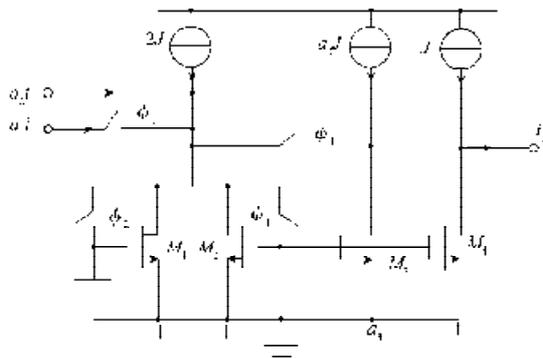


图1 开关电流一阶节电路

Fig. 1 First order section of switched-current

由图1得到的一阶节的 $z$ 域传输函数为:

$$H(z) = \frac{(a_1 + a_2)z - a_3}{(1 - a_3)z - 1} \quad (5)$$

为求得式(5)的系数,对式(3)进行双线性变换,即将 $s \rightarrow \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$ 代入,整理后得到 $z$ 域的传输函数为:

$$H(z) = \frac{((2k_1 + k_0 T)/A)z - (2k_0 - k_0 T)/A}{((2 + \omega_0 T)/A)z - 1} \quad (6)$$

其中, $A = 2 - \omega_0 T$ 。将式(5)同式(6)相比,得到:

$$a_1 = 2k_0 T / A \quad (7)$$

$$a_2 = (2k_0 - k_0 T) / A \quad (8)$$

$$a_3 = (2 + \omega_0 T) / A - 1 \quad (9)$$

由式(7)~(9)可确定图1中各MOS管的宽长比。

### 2.2 开关电流二阶节

通用二阶节的传输函数为:

$$H(s) = \frac{i_o(s)}{i_i(s)} = \frac{k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s^2 + (\omega_0 / Q) s + \omega_c^2} \quad (10)$$

对式(7)进行双线性变换,整理后得到 $z$ 域的传输函

数（传输函数分解方法的不同将导致产生不同的电路结构，所以该结构不是唯一的实现）为：

$$H(z) = \frac{\left( \frac{4k_2 + 2k_1T + k_0T^2}{D} \right) z^2 + \left( \frac{2k_1T^2 - 8k_2}{D} \right) z + \left( \frac{4k_2 - 2k_1T + k_0T^2}{D} \right)}{\left( \frac{\omega_0^2 T^2 + 2\omega_0 T / Q + 4}{D} \right) z^2 + \left( \frac{2\omega_0^2 T^2 - 8}{D} \right) z + 1} \quad (11)$$

其中： $D = \omega_0^2 T^2 - 2\omega_0 T / Q + 4$ 。

对于式（10）所示的传输函数可用反相无损积分器来综合，其传输函数如式（12）。图2为基于第二代开关电流积分器的二阶节电路实现，图2中，MOS管  $M_3$ 、 $M_7$ 、 $M_8$  的宽长比分别为  $a_3$ 、 $a_2$ 、 $a_4$ ，其余 MOS 管的宽长比均为 1。

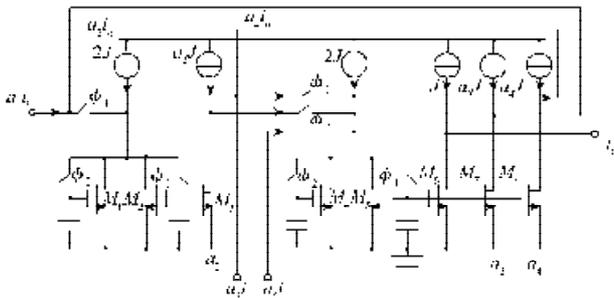


图2 开关电流二阶节电路

Fig. 2 Second order section of switched-current

$$H(z) = \frac{i_o(z)}{i_i(z)} = \frac{(a_5 + a_6)z^2 + (a_4 a_2 - a_5 - 2a_6)z + a_6}{(1 + a_4)z^2 + (a_2 a_3 - a_2 - 2)z + 1} \quad (12)$$

比较式（11）、（12）的系数，可得如下关系式：

$$a_1 a_3 = 4k_1 T^2 / D, \quad (13)$$

$$a_2 a_2 = 4\omega_0^2 T^2 / D, \quad (14)$$

$$a_4 = 4\omega_0 T / (QD), \quad (15)$$

$$a_5 = 4k_1 T / D, \quad (16)$$

$$a_6 = (4k_2 - 2k_1 T + k_0 T^2) / D. \quad (17)$$

如取  $a_3$  任取一值（常取 1），则可由式（13）~（17）求得  $a_1 \sim a_6$  的值，各 MOS 管的宽长比即可确定。因此，开关电流滤波器可由开关电流一阶节、二阶节级联而得。

### 3 电路仿真

为验证所提出的开关电流滤波器的设计与实现方法的有效性，将用开关电流一阶节、二阶节为基本单元来综合实现一个具有切比雪夫响应（0.5 dB 等纹波）的五阶低通滤波器。采用 10 kHz 的时钟频率，其 -3 dB 截止频率为 2.5 kHz。

五阶切比雪夫低通滤波器的传输函数可通过查表而得<sup>[4]</sup>。用一个开关电流一阶节、两个二阶节的级联

可实现该五阶切比雪夫低通滤波器。在对传输函数去归一化后，根据式（7）~（9）、（13）~（17）可求得开关电流一阶节、二阶节的参数。求解各节参数时要注意  $s$  域到  $z$  域变换要进行频率预翘，以保证得到的开关电流低通滤波器的频率特性同模拟低通滤波器的频率特性相同。

本文采用 ASIZ (Analysis of Switched-current Filters in Z Transform) 仿真软件<sup>[5]</sup>进行仿真（用 Pspice 做开关电流滤波器的 MOS 管级仿真，不能直接得到其幅频特性，只能在不同的频点下逐点仿真，然后再合成出来，因此本文没有用 Pspice 进行仿真）。ASIZ 仿真软件可对开关电流、开关电容电路仿真，获得频率响应、极点和零点、瞬态响应和灵敏度。

用 ASIZ 仿真软件对开关电流五阶切比雪夫低通滤波器电路进行仿真，图3为时钟频率分别设定为 10 kHz、15 kHz 和 20 kHz 时获得的幅频响应，其 -3 dB 截止频率分别为 2.5 kHz、3.75 kHz 和 5 kHz。图3中上端所示数据为 ASIZ 对滤波器仿真获得的截止频率 ( $F_c$ ) 及该频率处的增益 ( $G_a$ ) 与相移 ( $P_h$ )。

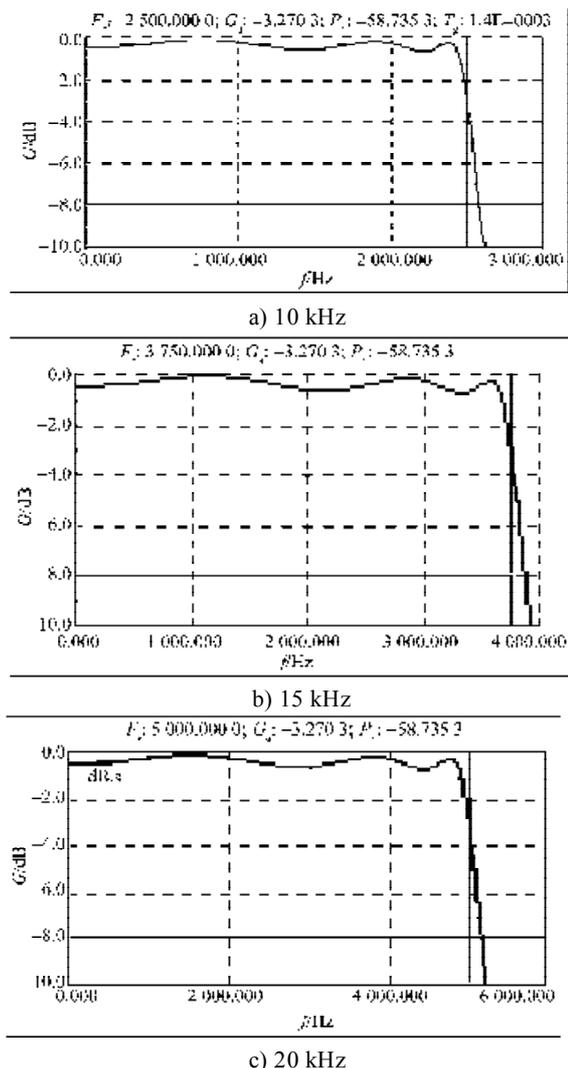


图3 低通滤波器的幅频响应

Fig. 3 Frequency response of low-pass switched-current filter

从图3可看出: 开关电流电路实现的五阶切比雪夫低通滤波器具有比较理想的频率响应, 达到了设计要求。此外, 调节时钟频率可使开关电流滤波器的截止频率(带宽)随时钟频率比例变化, 这一良好特性扩展了开关电流滤波器的应用范围。

## 4 结语

本文提出了基于开关电流技术的滤波器设计与实现。开关电流技术是基于电流模的模拟数据采样信号处理技术, 它符合集成电路的标准数字工艺, 具有更高的工作频率, 可实现低电压、低功耗的数/模混合电路。通过级联开关电流一阶节、二阶节, 可以实现高阶开关电流滤波器。仿真结果证实了用本文方法实现开关电流滤波器的良好性能。

### 参考文献:

[1] Toumazou C, Hughes J B, Battersby N C. 开关电流—数字工艺的模拟技术[M]. 姚玉洁, 刘素馨, 张培东, 等译. 北京: 高等教育出版社, 1997.

Toumazou C, Hughes J B, Battersby N C. Switched-Currents: An Analogue Technique for Digital Technology[M].

Translators: Yao Yujie, Liu Suxing, Zhang Peidong, et al. Beijing: Higher Education Press, 1997.

[2] 胡沁春, 何怡刚, 李宏民, 等. 基于开关电流的连续小波变换实现[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2005, 32(5): 66-70.

Hu Qinchun, He Yigang, Li Hongmin, et al. Implementation of Continuous Wavelet Transform Based on Switched-Current [J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2005, 32(5): 66-70.

[3] 秦世才, 高清运. 现代模拟集成电子学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

Qin Shicai, Gao Qingyun. Modern Analog Integrated Electronics[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[4] 丁士圻. 模拟滤波器[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2005.

Ding Shiqi. Analog Filters[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2005.

[5] Querioz A C M, Pinheiro P R M, Caloba L P. Nodal Analysis of Switched-Current Filters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 1993, 40(1): 10-18.

(责任编辑: 廖友媛)

(上接第91页)

Zhejiang Science and Technology Press, 1985: 9-37.

[8] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

Chen Boshi. Automatic Control System for Electric Drive [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1999.

[9] 贺益康. 交流电机的计算机仿真[M]. 北京: 科学出版社, 1990.

He Yikang. Computer Imitation of AC Motors[M]. Beijing: Science Press, 1990.

[10] 董改花, 冯浩. 双极性SPWM波形生成法开关点计算及其谐波分析[J]. 电气传动自动化, 2005(3): 23-25.

Dong Gaihua, Feng Hao. Calculation of On-Off Switching Points for Ming Bipolar SPWM Wave and Its Harmonic

Analysis[J]. Electrical Drive Automation, 2005(3): 23-25.

[11] 孙云鹏. 单相异步电动机及其应用: 合成电流分析法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

Sun Yunpeng. Single-Phase Asynchronous Motor and Its Applications: Synthesis of Current Analysis[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987.

[12] 施阳. MATLAB语言精要及动态仿真工具SIMULINK [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1997.

Shi Yang. MATLAB Language Essence and Dynamic Simulation tool SIMULINK[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1997.

(责任编辑: 廖友媛)