

电流模式n阶CCCI-C的多输入单输出滤波器设计

宋树祥^① 王卫东^② 曹才开^①

^①(湖南工学院 衡阳 421008)

^②(桂林电子工业学院 桂林 541004)

摘要: 该文提出了一种结构简单的基于MCCCII的n阶多输入单输出电流模式滤波器电路。该滤波器电路包含n个有源器件、n个接地电容元件, 无需接任何电阻元件, 可以产生n阶低通、带通、高通、带阻及全通电流模式滤波。由于仅依靠改变外部输入电流信号的接入数目和方式来实现不同功能的滤波器, 而电路内部结构及器件数目不变, 所以该电路便于单片集成。文中对滤波器进行了PSPICE模拟。

关键词: n阶滤波器; 电流控制传输器; 多输入单输出

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0243-03

n-th Order Current Mode Filter Design with Multiple Inputs and Single Output Based on MCCCII

Song Shu-xiang^① Wang Wei-dong^② Cao Cai-kai^①

^①(Hunan Institute of Technology, Hengyang 421008, China)

^②(Gui Lin Institue of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The paper presents the n-th order current mode filter circuit with multiple inputs and one output based on MCCCII (second generation Current Controlled Conveyor with Multiple outputs). The filter circuit which contains n active elements and n capacitors can produce nth order low-pass, band-pass, high-pass, band-stop filters. Various kinds of filters can be realized just by changing the amount and mode of joining external current signals to the circuit. Internal structure of circuit and amount of elements need not change. So the circuit is convenient to integrated. The paper also makes PSPICE simulation for the filter.

Key words: n-th filter; Current controlled conveyor; Multiple inputs and single output

1 引言

近年来, 在连续时间滤波器的研究中, 基于CCII的电流模式滤波器因比电压模式滤波器具有更宽的信号频带, 更好的线形度和更大的动态范围而备受关注, 各种不同类型的电流模式滤波器被大量提出, 得到了广泛的研究^[1-6]。但由于CCII的x端存在寄生电阻, 所以导致了基于CCII的电路产生传输函数误差, 基于此, Fabre等人利用双极型晶体管的线性跨导(translinear loop)特性实现了电流控制传输器(current controlled conveyor), 且电路结构简单, 从而提高了频响, 降低了功耗。目前, 基于CCCII的电流模式二阶滤波器已有一些报道^[8, 9], 但对用CCCII构成高阶滤波器的研究还不足。文献[10]提出了一种基于CCCII-C的多环反馈电流模式任意阶低通滤波器的系统设计法, 用该方法可以设计多种结构的n阶多环反馈低通滤波器。本文提出一种基于CCCII-C电流模式多输入多输出滤波电路, 只需n个CCCII和n个接地电容元件, 无需接任何电阻元件, 不仅能实现多输入单输出的低通、带通、高通、带阻、全通电流模式滤波器, 而且滤波器的极点角频率可通过调节偏置电流的大小实

现电调谐。电路具有设计简单、灵敏度低和模块化的优点。

2 电路描述

在理想情况下, 电流控制传输器(CCCII)的实现电路及符号如图1所示, 其端口电流、电压的关系可用以下矩阵方程表示

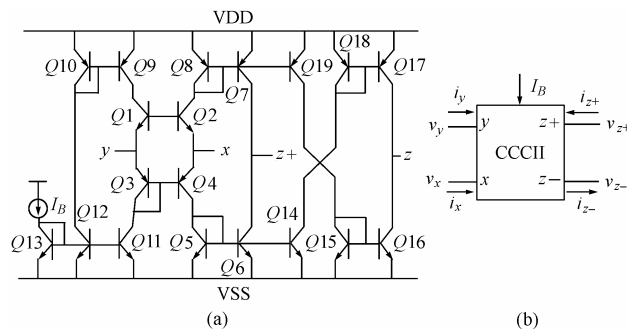


图1 电流控制传输器CCCII

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_{z+} \\ i_{z-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_{z+} \\ v_{z-} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$R_x = V_T / (2I_B)$, $V_T \approx 26 \text{ mV}$ (室温)。电阻 R_x 被偏置电流 I_B

2005-06-02 收到, 2005-09-26 改回

湖南省自然科学基金(03JJY5005)和广西壮族自治区自然科学基金(D200111)资助课题

控制。在多输出端MCCCII-中, $i_{21-} = i_{22-} = i_{23-} = -i_x$, $z-$ 表示反相输出。本文提出的基于MCCCII的多功能电流模式滤波器电路如图2所示。

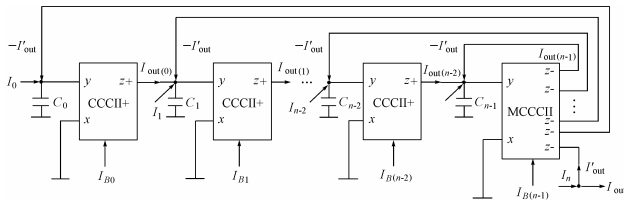


图 2 多输入单输出 n 阶滤波器结构图

$$\left. \begin{aligned} (I_0 - I'_{out})(k_0/s) &= I_{out}(0) \\ [I_1 - I'_{out} + I_{out}(0)](k_1/s) &= I_{out}(1) \\ &\vdots \\ [I_{n-2} - I'_{out} + I_{out}(n-3)](k_{n-2}/s) &= I_{out}(n-2) \\ [I_{n-1} - I'_{out} + I_{out}(n-2)](k_{n-1}/s) &= I'_{out} \end{aligned} \right\} (2)$$

从式(2)可得出:

$$I'_{out} = \left[I_{n-1} - I'_{out} + [I_{n-1} - I'_{out} + [\dots + [I_0 - I'_{out}] \cdot (k_0/s)] \cdot (k_1/s)] \dots \right] \cdot (k_{n-1}/s) \quad (3)$$

由式(3)可知, 第 i 级 CCII 的 z 端输出电流 $I_{out}(i)$ 是输入电流 I_i 减去多环反馈量 I'_{out} 加上前一级的输出电流 $I_{out}(i-1)$ 后经无损积分而得, 如图 3 所示。

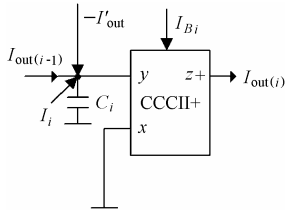


图 3 第 i 级的无损积分器

$$I_{out}(0) = (I_0 - I'_{out}) \cdot k_0/s \quad (4)$$

$$I_{out}(i) = [I_i - I'_{out} + I_{out}(i-1)] \cdot k_i/s \quad (5)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n-1$ 。

从图 2 可知, 最后一级 MCCCII 的输出恒等于 I'_{out} , 即

$$I_{out}(n-1) \equiv I'_{out} \quad (6)$$

由式(3)可求出 I'_{out} , 得到

$$I'_{out} = \frac{I_{n-1}k_{n-1}s^{n-1} + I_{n-2}k_{n-1}k_{n-2}s^{n-2} + \dots + I_0k_{n-1}k_{n-2} \dots k_1k_0}{s^n + k_{n-1}s^{n-1} + \dots + k_{n-1}k_{n-2} \dots k_1s + k_{n-1}k_{n-2} \dots k_1k_0} \quad (7)$$

上述各式中的 $k_i = 1/(R_x C_i)$, 其中 $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ 。

在图 2 中, 由 I'_{out} 可得输出电流 I_{out} :

$$I_{out} = I_n - I'_{out} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)得

$$I_{out} = \left[(I_n s^n + (I_n - I_{n-1})k_{n-1}s^{n-1} + (I_n - I_{n-2})k_{n-1}k_{n-2}s^{n-2} + \dots + (I_n - I_0)k_{n-1}k_{n-2} \dots k_1k_0) / (s^n + k_{n-1}s^{n-1} + \dots + k_{n-1}k_{n-2} \dots k_1s + k_{n-1}k_{n-2} \dots k_1k_0) \right] \quad (9)$$

其中特征方程为

$$\Delta(s) = s^n + k_{n-1}s^{n-1} + \dots + k_{n-1}k_{n-2} \dots k_1s + k_{n-1}k_{n-2} \dots k_1k_0 \quad (10)$$

从以上的分析可知, 通过在图2所示电路的输出端插入一个独立的输入信号 I_n , 使得本文所提出的 n 阶多输入单输出滤波器, 仅用 n 个有源器件 (其中 $n-1$ 个 CCCII+, 1 个 MCCCII-), n 个电容无需任何电阻, 电路结构简单。

3 讨论

从图2及式(9)中可以得到低通、带通、高通、带阻滤波器传递函数:

(1) 当 $I_0 = I_{in}$, $I_1 = I_2 = \dots = I_{n-1} = I_n = 0$ 时, 为低通滤波器。其传递函数为

$$H_{LP}(s) = I_{out}/I_{in} = (-k_{n-1}k_{n-2} \dots k_1k_0)/\Delta \quad (11)$$

(2) 当 $I_0 = I_1 = I_2 \dots I_{n-1} = I_n = I_{in}$ 时, 为高通滤波器。其传递函数为

$$H_{HP}(s) = I_{out}/I_{in} = I_n s^n / \Delta \quad (12)$$

(3) 当 n 是偶数, 且 $I_{n/2} = I_{in}$, 其余的输入信号为 0 时, 为带通滤波器。当 n 是奇数, 且 $I_{(n-1)/2} = I_{in}$ 或 $I_{(n+1)/2} = I_{in}$, 其余的输入信号为 0 时, 也为带通滤波器, 其传递函数为

$$n \text{ 为偶数 } H_{BP}(s) = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{-k_{n-1}k_{n-2} \dots k_{n/2}s^{n/2}}{\Delta} \quad (13a)$$

$$n \text{ 为奇数 } H_{BP}(s) = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{-k_{n-1}k_{n-2} \dots k_{(n+1)/2}s^{(n+1)/2}}{\Delta} \quad (13b)$$

(4) 当 $I_0 = 0$, $I_1 = I_2 = \dots = I_{n-1} = I_n = I_{in}$ 时, 为带阻滤波器。其传递函数为

$$H_{BR}(s) = I_{out}/I_{in} = (s^n + k_{n-1}k_{n-2} \dots k_1k_0)/\Delta \quad (14)$$

(5) 当 n 是偶数, 且 $I_n = I_{in}$, $I_0 = I_2 = \dots = I_{n-3} = I_{n-1} = 2I_{in}$, $I_1 = I_3 = \dots = I_{n-4} = I_{n-2} = 0$ 时, 为全通滤波器。当 n 是奇数, 且 $I_n = I_{in}$, $I_0 = I_2 = \dots = I_{n-4} = I_{n-2} = 0$, $I_1 = I_3 = \dots = I_{n-3} = I_{n-1} = 2I_{in}$ 时, 也为全通滤波器。全通滤波器的传递函数为

$$n \text{ 为偶数 } H_{AP}(s) = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{s^n - k_{n-1}s^{n-1} + k_{n-1}k_{n-2}s^{n-2} + \dots - k_{n-1}k_{n-2} \dots k_1k_0}{\Delta} \quad (15a)$$

$$n \text{ 为奇数 } H_{AP}(s) = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{s^n - k_{n-1}s^{n-1} + k_{n-1}k_{n-2}s^{n-2} + \dots + k_{n-1}k_{n-2} \dots k_1k_0}{\Delta} \quad (15b)$$

由上述讨论可知, 本文所提出的电路, 无须改变电路结构而仅通过改变外加输入电流信号的接入数目及方式就可得到不同种类的滤波器, 这样的电路便于集成。

4 电路参数

n 阶低通、带通、高通、带阻滤波器的传递函数标准形式分别为

$$\begin{aligned} H_{LP}(s) &= \frac{H_0}{D(s)}, & H_{BP}(s) &= \frac{H_0 b_m s^m}{D(s)} \left(m = \frac{n}{2} \right), \\ H_{HP}(s) &= \frac{H_0 b_n s^n}{D(s)}, & H_{BR}(s) &= \frac{H_0 (b_n s^4 + 1)}{D(s)} \end{aligned} \quad (16)$$

其中

$$D(s) = b_n s^n + b_{n-1} s^3 + \dots + b_2 s^2 + b_1 s + 1 \quad (17)$$

比较式(16), 式(17)与式(11)-式(15)得

$$\left. \begin{aligned} b_n &= R_{x0} R_{x1} \dots R_{x(n-1)} C_0 C_1 \dots C_{n-1} \\ b_{n-1} &= R_{x0} R_{x1} \dots R_{x(n-2)} C_0 C_1 \dots C_{n-2}, \dots \\ b_1 &= R_{x0} C_0, & H_0 &= 1 \text{ 或 } -1 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

令 $a_m = b_m / b_{m-1} = R_{x(m-1)} C_{m-1}$, 此处 $m = 1, 2, \dots, n$, $b_0 = 1$ 。由式(18)可看出, 滤波电路参数的设计只需计算 a_m , 非常简单。

5 设计举例

为了验证电路的正确性, 对四阶巴特沃斯低通、带通、带阻类型的滤波器进行了设计。

5.1 电路参数的确定

四阶巴特沃斯类型低通、带通、带阻滤波器的传递函数分别为

$$\left. \begin{aligned} H_{LP}(s) &= I_{out}/I_{in} = 1/[D(s)] \\ H_{BP}(s) &= I_{out}/I_{in} = (3.414s^2)/[D(s)] \\ H_{BR}(s) &= I_{out}/I_{in} = (s^4 + 1)/[D(s)] \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\text{其中 } D(s) = s^4 + 2.613s^3 + 3.414s^2 + 2.613s + 1 \quad (20)$$

根据式(11)-式(15), 可得四阶滤波器的参数为

$$\begin{aligned} a_1 &= R_{x0} C_0 = 2.613, & a_2 &= R_{x1} C_1 = 1.307 \\ a_3 &= R_{x2} C_2 = 0.765, & a_4 &= R_{x3} C_3 = 0.383 \end{aligned}$$

设滤波器的截止频率1MHz, 那么若令 $R_{x0} = R_{x1} = R_{x2} = R_{x3} = 10\text{k}\Omega$, 由式(17)可得电容的归一化系数为: $C'_0 = 2.613 \times 10^{-4}$, $C'_1 = 1.307 \times 10^{-4}$, $C'_2 = 7.65 \times 10^{-5}$, $C'_3 = 3.83 \times 10^{-5}$, 由截止频率可得电容值为 $C_0 = 41.59 \text{ nF}$, $C_1 = 20.80 \text{ nF}$, $C_2 = 12.18 \text{ nF}$, $C_3 = 6.096 \text{ nF}$ 。

5.2 滤波器的PSPICE模拟

为了证实电路的正确性, 对上述滤波器进行管子级的PSPICE模拟仿真, CCCII电路中的三极管采用PNP(Q2N722)管和NPN(Q2N696)管仿真模型参数, 其偏置电流均为 $1.3 \mu\text{A}$, 电源电压分别为 2.5V 和 -2.5V , 理论中心频率1MHz。图4为四阶巴特沃斯电流模式低通、带通、带阻滤波器的仿真结果, 从图中看出所提出的电路是正确的。

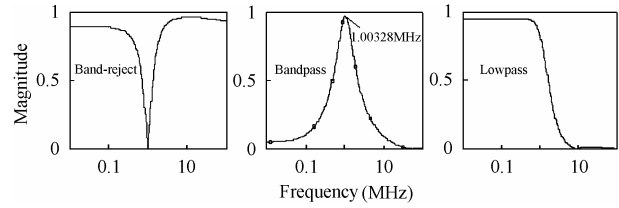


图4 PSPICE仿真结果

5 结束语

本文提出了一种新的基于MCCCII的 n 阶多输入单输出电流模式滤波器电路。它具有以下特点: (1)能产生高阶低通、带通、高通、带阻及全通滤波器; (2)电路结构非常简单, 无需任何电阻, 所有C元件均接地; (3)电路参数设计容易; (4)通过改变外部电流信号的接入的数目及方式就可得到不同种类的滤波器, 而内部电路元器件的连接方式及元器件数量不改变, 所以有利于单片集成。

参考文献

- [1] Oliaei O, Porte J. Compound current conveyor (CCII+ and CCII-) [J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(2): 253-254.
- [2] Elwan H, Iman A. A novel CMOS current conveyor realization with an electronically tunable current-mode filter suitable for VLSI[J]. *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, 1996, 43(9): 663-670.
- [3] Kiranon W, Kesorn J, Sangpisit W, et al.. Electronically tunable multifunctional translinear-C filter and oscillator[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(7): 573-574.
- [4] Khan I A, Zaidi M H. Multifunctional translinear-C Current-mode filter[J]. *Electronics*, 2000, 87(9): 1047-1051.
- [5] Soliman A M. New current-mode filter using current-conveyors[J]. *Int. J. Electron. Commun.*, 1997, 51(5): 275-278.
- [6] 何怡刚, 江金光, 吴杰, 蔡国昌. 通用电流模式滤波器[J]. *电子学报*, 1999, 27(11): 21-23.
- [7] 王春华, 沈光地. 基于MOCCII多输入单输出 n 阶电流模式滤波器[J]. *通信学报*, 2004, 25(2): 138-143.
- [8] 王卫东. 通用电调谐双二阶电流模式滤波器[J]. *电讯技术*, 2003, 78(6): 78-82.
- [9] 马云辉. 基于CCCII的多功能滤波器及其仿真研究[J]. *固体电子学研究与进展*, 2004, 24(1): 113-116.
- [10] 彭良玉, 何怡刚等. 电流模式 N 阶 CCCII(±)-C 低通滤波器的系统设计[J]. *电子学报*, 2003, 31(8): 1234-1236.

宋树祥: 男, 1970年生, 硕士, 讲师, 研究方向为模拟集成电路设计及电流模信号处理, 已发表论文十余篇。

王卫东: 男, 1956年生, 教授, 主要从事电路与系统及电流模技术方面的研究, 已发表论文三十多篇。

曹才开: 男, 1952年生, 教授, 主要研究方向为模拟集成电路及有源滤波器设计, 已发表论文三十余篇。