

基于 MOCCC II-C 的 n 阶电流模式椭圆滤波器^{*}

李志军¹, 王春华², 王仕果¹, 鲁光德¹

(1. 湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105;

2. 湖南大学 计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 通过对任意奇数阶电流模式滤波器传递函数进行数学分析, 将其分解为 n 个无损积分器级联的形式, 并根据椭圆型滤波器的传输函数对输出电流信号进行线性组合, 从而提出了 1 种奇数阶的电流模式椭圆滤波器的系统综合法. 由该方法实现的电路结构简单, 仅由 $(3n-1)/2$ 个有源器件, n 个接地电容构成. 面向实际电路完成 Pspice 仿真, 结果表明由该方法产生的滤波器具有良好的性能.

关键词: 电流模式; 多输出电流控制电流传输器; 椭圆滤波器

中图分类号: TN 713 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-7971(2007)02-0127-05

自电流传输器(CC II, The second generation current conveyor)问世以来, 电流模式电路得到广大模拟电路设计者的关注. 但是由于第 2 代电流传输器在 X 端口存在寄生电阻, 造成传输函数的误差, 基于此, A. Fabre 等利用双极型晶体管的线性互导特性实现了电流控制电流传输器(CCC II, current controlled conveyor II)^[1], 本文采用的 MOCCC II (multiple outputs current controlled conveyor II) 器件是在 CCC II 的基础上采用交叉耦合电流镜实现多端输出的^[2,3].

目前对于高阶电流模式滤波器的研究主要是针对巴特沃什和切比雪夫两种类型的滤波器^[4,5]. 椭圆型滤波器由于具有狭窄的过渡带, 因此较低的阶次就能获得比较理想的幅频特性, 在实际中更具有实用价值. 但是椭圆型滤波器传递函数相对比较复杂, 在设计时一般都是对无源网络进行有源模拟来实现^[6], 文献[7]在 MOCC II 的基础上实现了一种电流模式椭圆滤波器, 但结构较为复杂, 采用 $2n+2$ 个有源器件, n 个接地电容和 $2n+3$ 个接地电阻构成. 本文采用传递函数综合法设计的任意奇数阶电流模式滤波器电路结构简单, 仅由 $(3n-1)/2$ 个 MOCCC II 器件和 n 个接地电容构成, 且无需外接电阻. 文章给出了三阶椭圆型电流模式滤波器的具体实现电路, 并对其进行了仿真分析, 结果表明由该方法实现的椭圆型滤波器具有比较理想的滤波性能.

1 MOCCC II 器件及端口特性

MOCCC II 实现电路和电路符号分别如图 1, 2 所示. 其理想端口特性为

$$\begin{aligned} I_Y &= 0, \\ V_X &= V_Y + I_X \cdot R_X, \\ I_{Z_1} &= I_{Z_2} = \dots = I_{Z_M} = -I_{\bar{Z}_1} = -I_{\bar{Z}_2} = \dots = -I_{\bar{Z}_M} = I_X, \end{aligned} \tag{1}$$

其中 $I_{Z_1} \sim I_{Z_M}$ 为同相输出, $I_{\bar{Z}_1} \sim I_{\bar{Z}_M}$ 为反相输出. 式(1)中 R_X 为 MOCCC II 器件 X 端口自身的电阻, 其大小受偏置电流 I_B 控制, $R_X = V_T / 2I_B$, $V_T \approx 26 \text{ mV}$ (室温).

* 收稿日期: 2006-09-05

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(04JJ3039), 湘潭大学研究项目资助(06XZX09).

作者简介: 李志军(1974-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事集成电路的教学与研究工作.

通讯作者: 王春华(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事通信电路与系统方面的研究.

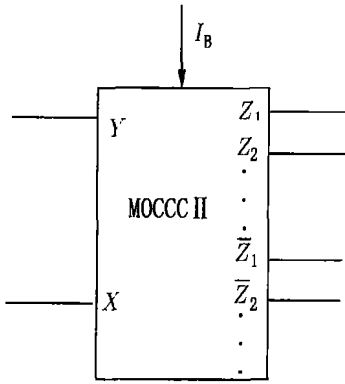


图 1 电路符号

Fig. 1 Circuit symbol

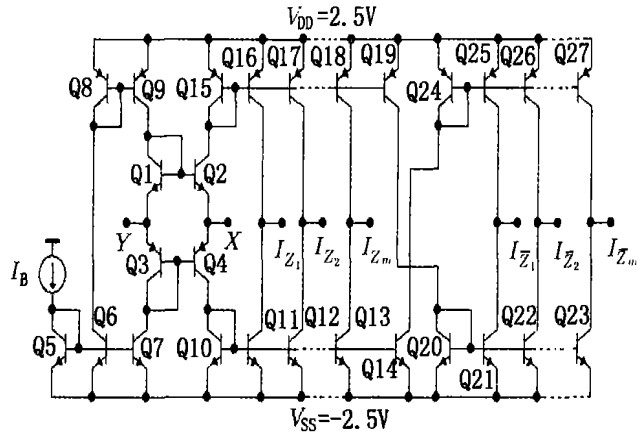


图 2 电路实现

Fig. 2 Realization circuit

2 奇数阶电流模式椭圆滤波器的设计方法

2.1 滤波器的电路实现 设任意奇数阶的电流模式滤波器的传输函数为

$$\frac{I'_{out}}{I_{in}} = \frac{b_{n-1}s^{n-1} + a_{n-2}s^{n-2} + b_{n-3}s^{n-3} + a_{n-4}s^{n-4} + \dots + b_2s^2 + a_1s + a_0}{a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} + a_{n-2}s^{n-2} + \dots + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (2)$$

$$\text{并令 } I'_{out} = I_{out(0)} + I_{out(1)} + I_{out(2)} + \dots + I_{out(n-1)} + I_{out(n)}, \quad (3)$$

$$\text{其中 } I_{out(0)} = \frac{a_0}{\Delta(s)} I_{in}, \quad (4)$$

$$I_{out(i)} = \frac{a_i s^i}{\Delta(s)} I_{in}, \quad i = 1, 3, 5, \dots, n-4, n-2; \quad (5)$$

$$I_{out(i)} = \frac{b_i s^i}{\Delta(s)} I_{in}, \quad i = 2, 4, 6, \dots, n-3, n-1. \quad (6)$$

$$\Delta(s) = a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} + a_{n-2}s^{n-2} + \dots + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0. \quad (7)$$

根据(4) ~ (6)式可以得到

$$I_{out(i)} = \frac{a_i s^i}{a_0} I_{out(0)}, \quad i = 1, 3, 5, \dots, n-4, n-2; \quad (8)$$

$$I_{out(i)} = \frac{b_i s^i}{a_0} I_{out(0)}, \quad i = 2, 4, 6, \dots, n-3, n-1. \quad (9)$$

$$\text{那么 } I_{out(1)} = \frac{a_1 s}{a_0} I_{out(0)}, \quad (10a)$$

$$I_{out(2)} = \frac{b_2 s^2}{a_0} I_{out(0)} = \frac{b_2 s}{a_1} I_{out(1)}, \quad (10b)$$

$$I_{out(3)} = \frac{a_3 s^3}{a_0} I_{out(0)} = \frac{a_3 s}{b_2} I_{out(2)}, \quad (10c)$$

$$I_{out(n-2)} = \frac{a_{n-2} s^{n-2}}{a_0} I_{out(0)} = \frac{a_{n-2} s}{b_{n-3}} I_{out(n-3)}, \quad (10d)$$

$$I_{out(n-1)} = \frac{a_{n-1} s^{n-1}}{a_0} I_{out(0)} = \frac{b_{n-1} s}{a_{n-2}} I_{out(n-2)}. \quad (10e)$$

从(10)式可以确定式(3)各输出电流之间依次为积分关系. 用CCC II实现的(10a)式如图3所示, 图中 a_1 为积分电容的大小, a_0 为 CCC II 器件 X 端口自身的电导值, 其大小受偏置电流 I_{a_0} 的控制.

对(4)式交叉相乘并整理得

$$a_n s^n I_{out(0)} = a_0 \left(I_{in} - I_{out(0)} - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{a_i s^i}{a_0} I_{out(0)} \right) \quad (11)$$

根据(10)、(11) 式可以整理为

$$I_{in} = I_{out(0)} + I_{out(1)} + \frac{a_2}{b_2} I_{out(2)} + I_{out(3)} + \frac{a_4}{b_4} I_{out(4)} + \dots + I_{out(n-2)} + \frac{a_{n-1}}{b_{n-1}} I_{out(n-1)} + \frac{a_n s}{b_{n-1}} I_{out(n-1)} \quad (12)$$

由此可以确定(3) 式输入电流 I_{in} 与各积分器输出电流之间的关系, 其中 $I_{out(i)} a_i / b_i$ 的电路实现如图 4 所示. 而 $I_{out(n-1)} a_n s / b_{n-1}$ 与 $I_{out(n-1)}$ 之间的关系也为积分关系, 其实现电路如图 5 所示.

从上述分析可知, 由(10) 式可以确定各输出电流依次为积分关系, 由(12) 式可以确定(3) 式输入电流与各积分器输出电流之间的连接关系, 采用 MOCCC II 实现的任意奇数阶电流模式滤波器的电路如图 6 所示.

根据奇数阶椭圆型滤波器的标准传递函数将输出电流进行线性组合, 取 $I_{out} = I_{out(0)} + I_{out(2)} + I_{out(4)} + \dots + I_{out(n-3)} + I_{out(n-1)}$ 为输出电流, 则

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{b_{n-1} s^{n-1} + b_{n-3} s^{n-3} + b_{n-5} s^{n-5} + \dots + b_4 s^4 + b_2 s^2 + a_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (13)$$

即可以实现任意奇数阶的椭圆型电流模式滤波器.

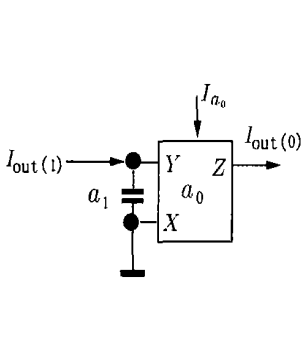


图 3 (10a) 式的实现电路

Fig. 3 Circuit realization of the integrator given by (10a)

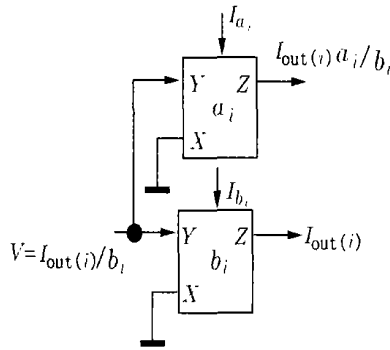


图 4 $I_{out(i)} a_i / b_i$ 的电路实现

Fig. 4 Circuit realization for $I_{out(i)} a_i / b_i$

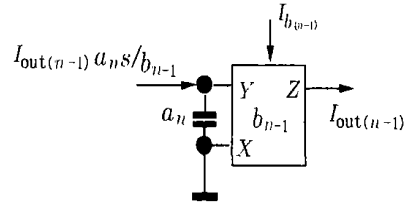


图 5 $I_{out(n-1)} a_n s / b_{n-1}$ 的电路实现

Fig. 5 Circuit realization for $I_{out(n-1)} a_n s / b_{n-1}$

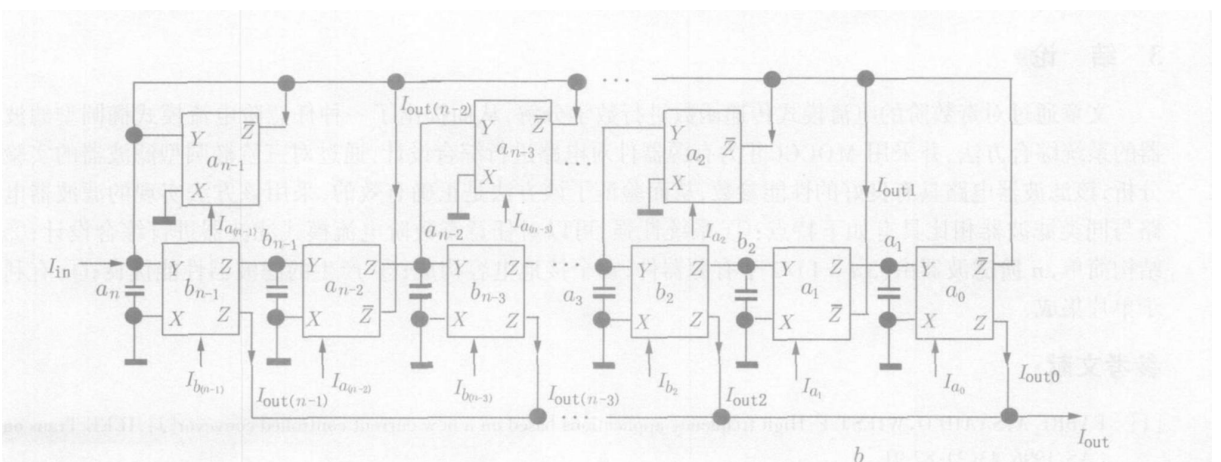


图 6 采用综合法设计的 n 阶电流模式椭圆滤波器

Fig. 6 N th- order elliptic current- mode filter structure of the synthesis

2.2 设计举例 下面以三阶椭圆型滤波器的设计来验证该方法的正确性. 由文献[8] 查出一个椭圆型滤波器的传递函数为

$$H(s) = \frac{0.35225s^2 + 0.59870}{s^3 + 0.84929s^2 + 1.14586s + 0.59870} \quad (14)$$

根据图 6 可以画出三阶椭圆型电流模式滤波器的实现电路, 如图 7.

由图 7 的电路可以分析出电路的传递函数为

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{C_1 C_2 s^2 / R_{b2} + 1 / R_{b2} R_{a1} R_{a0}}{C_1 C_2 C_3 s^3 + C_1 C_2 s^2 / R_{a2} + C_1 s / R_{b2} R_{a1} + 1 / R_{b2} R_{a1} R_{a0}} \quad (15)$$

取 $f_p = 100$ kHz, 由(14)式和(15)式确定图 7 电路的参数如下:

$C_1 = 2400$ pF, $C_2 = 800$ pF, $C_3 = 2400$ pF; $R_{a0} = 1.2698$ k Ω , $R_{a1} = 0.6118$ k Ω , $R_{a2} = 0.7812$ k Ω , $R_{b2} = 1.8835$ k Ω , 则可以计算出 MOCCC II 对应的偏置电流分别为: $I_{a0} = 10.237$ μ A, $I_{a1} = 21.249$ μ A, $I_{a2} = 16.641$ μ A, $I_{b2} = 6.090$ μ A. 为了验证电路的可行性, 对图 7 的椭圆型滤波器进行 PSPICE 仿真. 结果如图 8 所示.

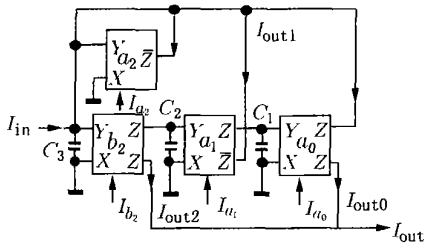


图 7 3 阶电流模式椭圆滤波器

Fig. 7 Third-order elliptic current-mode filter

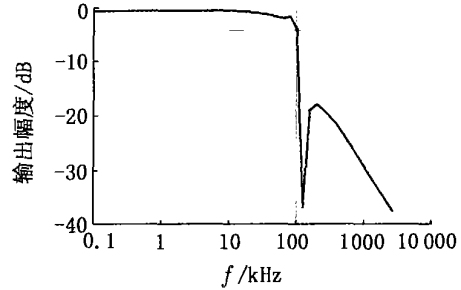


图 8 仿真结果

Fig. 8 PSPICE simulation result

传递函数(14)式对应的椭圆型滤波器的性能参数如下: 通带纹波为 1.412 dB, 阻带最小衰减量为 17.8 dB, $\omega_s / \omega_p = 1.2$. 对图 8 的仿真结果进行测试得: $f_p = 98.283$ kHz, 与设计的截止频率 100 kHz 相差 1.717 kHz, $f_s = 120.538$ kHz, 则 $\omega_s / \omega_p = 1.2264$; 通带纹波为 1.548 dB, 比标准值大 0.136 dB; 阻带最小衰减量 17.62 dB, 误差为 0.18 dB. 仿真测试结果与传输函数相对应滤波器的参数基本符合, 因此采用该方法实现的任意奇数阶电流模式滤波器是正确的.

3 结论

文章通过对奇数阶的电流模式传递函数进行数学分解, 从而提出了一种任意阶电流模式椭圆型滤波器的系统综合方法, 并采用 MOCCC II 为有源器件对电路进行综合设计. 通过对三阶椭圆型滤波器的实验分析, 该滤波器电路具有良好的性能参数, 从而验证了该方法是正确有效的. 采用该方法实现的滤波器电路与同类滤波器相比具有如下特点: ① 系统性强, 可以对任意奇数阶电流模式滤波器进行综合设计; ② 结构简单, n 阶滤波器由 $(3n-1)/2$ 个有源器件, n 个接地电容构成; ③ 产生的滤波器性能优良; ④ 有利于单片集成.

参考文献:

- [1] FABRE A, SAAID O, WIEST F. High frequency applications based on a new current controlled conveyor[J]. IEEE Trans on CAS, 1996, 43(2): 82-91.
- [2] 李志军, 王春华, 王仕果. 基于 MOCCC II-C 的 n 阶电流模式滤波器[J]. 固体电子学研究与进展, 2006, 26(2): 247-250.

[3] 王春华, 王仕果, 许海霞, 等. 基于 MOCCC II 的电流模式二阶滤波器的结构化设计[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2005, 27(4): 294-299.

[4] 王春华, 闫健卓, 沈光地, 等. 基于 MOCCC II 多输入单输出 N 阶电流模式电路[J]. 通信学报, 2004, 25(2): 138-142.

[5] CHANG Chun-ming, Al-Hashimi. Analytical synthesis of current mode high order OTA-C filters[J]. IEEE Trans on CAS (I), 2003, 50(9): 1188-1192.

[6] 江金光, 何怡刚, 吴杰. 基于电流传感器的椭圆滤波器设计[J]. 电路与系统学报, 2000, 5(1): 34-37.

[7] 何怡刚. FLF 电流模式滤波器的 CC 实现[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(4): 27-30.

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

N th-order current mode elliptic filter based on MOCCC II-C

LI Zhi-jun¹, WANG Chun-hua², WANG Shi-guo¹, LU Guang-de¹

(1. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: It is presented new general synthesis method for a arbitrary order current mode elliptic filter based on MOCCC II. The method is based on analyzing a transfer function, then generating n number of realizable transfer functions using lossless integrators and combining linearly the integrators' output currents to meet the transfer function of elliptic filter. The filter structure presented simply only contains $(3n-1)/2$ active elements and n grounded capacitors. Pspice simulation for actual circuit is conducted, and the result shows that the presented circuit is of excellent performance.

Key words: current mode; current controlled conveyor; elliptic filter

* * * * *

(上接第 126 页)

Convex function of demand, convex distribution of price and an optimal model of coexistence of multi-prices

HUA Cun-cai

(School of Mathematics, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

Abstract: Convex function of demand, convex distribution of price and an optimal model for coexistence of multi-prices are established. At first, the quadratic function model of demand is extended to a general convex one. It is proved that the price with maximal demand increases the profits and that the price with maximal profit decreases the demand. Second, a convex distribution model for the price is proposed. The formulae are given respectively for the expectation price, the variance of the price and the income. Third, a nonlinear programming model is given for the coexistence of multi-prices on the basis of the convex function model. Finally, the results are verified by an example for sale of the purified water.

Key words: convex function of demand; convex distribution; optimal model