

文章编号: 1001 - 893X(2012)06 - 0974 - 05

# 参数可线性重构的电流模式二阶带通滤波器\*

宋树祥, 王小华, 解鸿国

(广西师范大学 电子工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:**针对二阶通用带通滤波器存在特征参数不能线性重构的缺点,提出一种全新的特征参数可线性重构的电流模式二阶带通滤波器设计理论。该调谐滤波器通过调节反馈电流放大器的放大系数可线性重构二阶带通滤波器的截止频率、品质因素等参数,而滤波器的幅频特性保持不变。Spectre 仿真结果表明,  $\pm 1.5$  V 电源电压下,滤波器的中心频率和品质因素在 2 GHz 内可线性重构。

**关键词:**带通滤波器;线性可重构;电流控制的电流传输器;电流放大器

中图分类号: TN713 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1001 - 893x.2012.06.029

## A Current-mode Second-order Bandpass Filter with Linear Reconfigurable Parameters

SONG Shu-xiang, WANG Xiao-hua, XIE Hong-guo

(College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In view of the shortcoming that the filter characteristic parameters of the second - order universal bandpass filters can not be linearly modified, a novel design theory for the second - order current - mode bandpass filter with linear reconfigurable characteristic parameters is presented. The parameters of the filter such as cut - off frequency and Q - factor can be linearly reconfigured by adjusting the value of the gain of the current feedback amplifiers, without any change of the filter amplitude - frequency characteristics. Spectre simulation results confirm that the filter cut - off frequency and Q - factor can be linearly reconstructed in 2 GHz with  $\pm 1.5$  V power supply voltage.

**Key words:** bandpass filter; linear reconfigurable; current controlled current conveyor; current amplifier

### 1 引言

随着全集成有源滤波器的发展,参数可重构的连续时间集成滤波器的研究和开发已成为主流趋势,特别是在低中频架构接收机、ADSL(Asymmetrical Digital Subscriber Loop)和 CDMA(Code Division Multiple Access)无线接收技术中,参数可重构滤波器由于有着非常吸引人的优点而被广泛采用<sup>[1-5]</sup>。因为接收机中的滤波器是镜像抑制和信道选择的关键模

块,其性能直接影响接收机的多项指标,滤波器的参数可重构设计,可以较好地解决因受工艺、环境(温度、工作电压)以及老化等因素的影响而导致滤波器性能发生变化无法恢复接收机性能这一问题。另一方面,滤波器的参数可重构设计,对于设计可重构系统也具有重要意义。基于 CCC II 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、更好的线性度和更大的动态范围而备受关注,各种不同类型的滤波器也被大量提出<sup>[6-9]</sup>。本文鉴于二阶通

\* 收稿日期: 2012 - 01 - 20; 修回日期: 2012 - 03 - 12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61061006)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 61061006)

用带滤波器的滤波参数重构范围窄且不能线性重构等缺点,提出一种全新的特征参数可线性重构的电流模式二阶带通滤波器设计理论。该调谐滤波器通过调节反馈电流放大器的放大系数  $A$  可线性重构二阶带通滤波器的截止频率、品质因素等参数。整个设计在保证滤波器精确的幅频特性基础上使得带通滤波器的截止频率、品质因素等参数具有线性可调谐性。

## 2 参数可线性重构的二阶带通滤波器设计原理

1996 年, Fabre 等人提出了电流控制传输器 (CCC II)<sup>[10]</sup>。该电流控制传输器由于具有较好的电流控制功能而广泛应用,其实现电路及符号如图 1 所示。

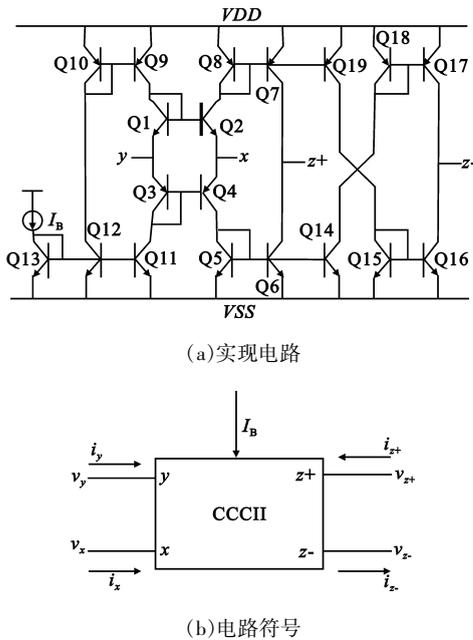


图 1 电流控制传输器 CCC II 的电路和符号  
Fig.1 Circuit and symbol of CCC II

在理想情况下,端口电流、电压的关系可用式(1)表示:

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

式中,  $R_x = V_T/2I_B$ ,  $V_T \approx 26 \text{ mV}$ 。电阻  $R_x$  的值可被偏置电流  $I_B$  调谐。 $z+$  表示同相输出,  $z-$  表示反相输出,  $i_{z+} = i_x$ ,  $i_{z-} = -i_x$ 。在本设计中将用电流控

制传输器作为设计参数可线性重构的二阶带通滤波器的基本设计模块。

本文在基本二阶滤波器的基础上提出一种特征参数可线性重构的电流模式带通滤波器的设计理论,其工作原理如下所述。

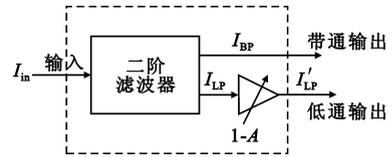


图 2 基本二阶滤波器原理图  
Fig.2 Principle diagram of basic second-order filter

图 2 为带通输出和加有电流放大电路的低通输出的基本二阶滤波器原理图,根据滤波器低通和带通的系统函数理论,图 2 的二阶低通和带通系统函数如下:

$$H_{BP}(s) = \frac{I_{BP}}{I_{in}} = \frac{a's}{1 + as + bs^2}$$

$$H_{LP}(s) = \frac{I_{LP}}{I_{in}} = \frac{1}{1 + as + bs^2}$$

$$H'_{LP}(s) = \frac{I'_{LP}}{I_{in}} = (1 - A) \cdot \frac{I_{LP}}{I_{in}} = \frac{1 - A}{1 + as + bs^2} \quad (2)$$

从式(2)可以计算出基本二阶滤波器的特征频率  $f_0 = 1/2\pi\sqrt{b}$ 。如果在图 2 的基础上,从低通输出端引出一个反馈电流,该经电流放大器放大  $A$  倍后和输入电流叠加,作为二阶滤波器的输入信号,那么将构成一种新的二阶滤波器,如图 3 所示。该电路具有参数可重构功能,下面对该电路的滤波参数可重构性进行分析。

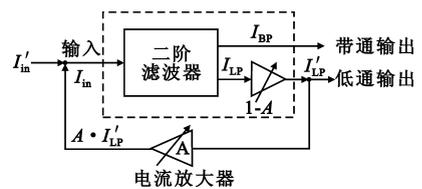


图 3 参数可重构的二阶带通滤波器原理图  
Fig.3 Principle diagram of second-order bandpass filter with reconfigurable parameters

由电路理论可以计算出其带通和低通系统函数如下:

$$H_{BPT}(s) = \frac{I_{BP}}{I'_{in}} = \frac{I_{BP}}{I_{in} - A \cdot I'_{LP}} = \frac{I_{BP}/I_{in}}{1 - A \cdot (I'_{LP}/I_{in})} = \frac{H_{BP}(s)}{1 - A \cdot H'_{LP}(s)} = \frac{a's/(1 - A)}{1 + (as/(1 - A)) + (bs^2/(1 - A))} \quad (3)$$

$$H_{LPT}(s) = \frac{I'_{LP}}{I'_{in}} = \frac{I'_{LP}}{I_{in} - A \cdot I'_{LP}} = \frac{I'_{LP}/I_{in}}{1 - A \cdot (I'_{LP}/I_{in})} = \frac{H'_{LP}(s)}{1 - A \cdot H'_{LP}(s)} = \frac{1/(1-A)}{1 + (as/(1-A)) + (bs^2/(1-A))} \quad (4)$$

从计算结果可以看出,图3所示的输出依然是二阶带通和低通输出。式(3)可以得出图3参数可重构二阶带通滤波器的特征频率  $f_{0T} = \sqrt{1-A} \times f_0$ , 为基本二阶带通滤波器的特征频率的  $\sqrt{1-A}$  倍。电路的品质因数也为基本二阶带通滤波器的品质因数的  $\sqrt{1-A}$  倍,为  $Q_{0T} = \sqrt{1-A} \times Q_0$ 。通过改变放大器的放大系数  $A$  可以重构图3电路的中心频率和品质因数这两个滤波参数,但由于重构系数  $\sqrt{1-A}$  和放大倍数  $A$  成非线性关系,所以这种参数重构只能是非线性重构,在重构准确度高的场合难以控制。

为了达到二阶滤波器电路参数可线性重构的目的,将图3进行改进,在原有电路的基础上再加上一个电流反馈回路,如图4所示。

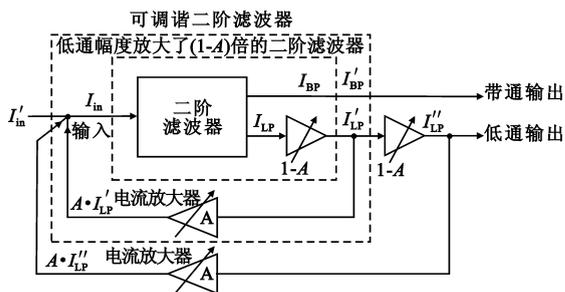


图4 参数可线性重构的带通二阶滤波器原理框图

Fig.4 Principle diagram of second-order bandpass filter with linear reconfigurable parameters

通过计算得出,图4中二阶滤波电路的带通系统函数如式(5)所示:

$$H'_{BPT}(s) = \frac{I'_{BP}}{I'_{in}} = \frac{I'_{BP}}{I_{in} - A \cdot I'_{LP}} = \frac{I'_{BP}/I_{in}}{1 - A \cdot (I'_{LP}/I_{in})} = \frac{H_{BPT}(s)}{1 - A(1-A) \cdot H'_{LPT}(s)} = \frac{a's/(1-A)^2}{1 + (as/(1-A)^2) + (bs^2/(1-A)^2)} \quad (5)$$

为了更好地说明图4所示电路参数可线性重构的性质,根据式(2)、式(3)和式(5),将图2、图3和图4滤波器的特征参数计算出来,如表1所示。

表1 基本二阶、可重构二阶和可线性重构的二阶带通滤波器特征参数

Table 1 Characteristic parameters of basic, parameters reconfigurable and parameters linear reconfigurable second-order bandpass filters

滤波器结构	中心频率 $f_0$	品质因素 $Q$	带通增益 $G_{BP}$	-3 dB 带宽 $B$
基本电路结构	$f_0 = 1/2\pi\sqrt{b}$	$Q_0 = \sqrt{b/a}$	$G_{BFO} = a'/a$	$B_0 = a/2\pi b$
可重构结构	$f_{0T} = \sqrt{1-A} \times f_0$	$Q_{0T} = \sqrt{1-A} \times Q_0$	$G_{BPT} = G_{BFO}$	$B_{0T} = B_0$
线性可重构结构	$f'_{0T} = (1-A) \times f_0$	$Q'_{0T} = (1-A) \times Q_0$	$G'_{BPT} = G_{BFO}$	$B'_{0T} = B_0$

从表1可以看出,如果基本二阶滤波器的参数设定,图3结构中二阶带通滤波器电路的中心频率和品质因素可以通过放大系数  $A$  来重构,重构系数为  $\sqrt{1-A}$ ,具有非线性重构特性。图4结构中二阶带通滤波器的电路参数也可以通过重构电流放大倍数  $A$  来重构,重构系数为  $(1-A)$ ,具有线性重构特性,而且只要满足  $(1-A) > 0$  即可,重构范围宽。从表1还可以看出,图3和图4电路的二阶带通增益和-3 dB带宽与基本二阶滤波器严格保持一致,这在无线接收技术设计中十分重要。

为了验证所提出的参数可线性重构的带通二阶滤波器设计理论是否正确,本文提出基于图1(a)所示的CCC II的参数可线性重构的二阶带通滤波器如图5所示。1、2、3号CCC II模块和电容  $c_1$ 、 $c_2$  构成图2的基本二阶带通滤波器,控制(control)CCC II模块和3号CCC II模块构成电流放大器  $A$ 。图5中电压  $V_{y2}$  通过电容  $c_1$  构成低通输出。通过对控制(control)CCC II模块的两个输出电流进行设计,使  $I_{z1} = 2I_x$ ,  $I_{z2} = -AI_x$ , 那么参数可线性重构的二阶带通滤波器总的反馈电流为  $I_z = (2-A)I_x$ , 其中  $A = -I_{BC}/I_B$ 。

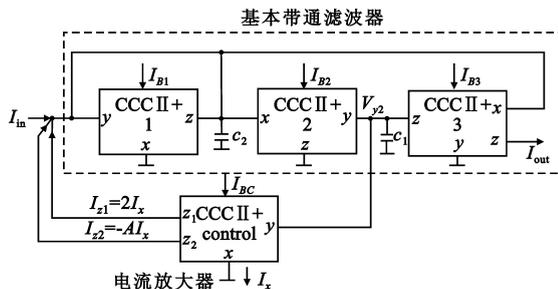


图5 基于 CCC II 的参数可线性重构的带通滤波器电路  
Fig.5 Circuit of bandpass filter with linear reconfigurable parameters based on CCC II

在图 5 电路中, 设  $I_{B1} = I_{B2} = I_{B3} = I_B$ , 则 1、2、3 号 CCC II 模块 X 端的输入电阻可计算为  $R_{x1} = R_{x2} = R_{x3} = V_T/2I_B$ 。令  $c_1 = c_2 = C$ , 则图 5 虚线框内基本二阶低通和带通滤波器的系统函数可计算如下:

$$H_{LP}(s) = \frac{I_{LP}}{I_{in}} = \frac{1}{1 + R_x C s + (R_x C)^2 s^2}$$

$$H_{BP}(s) = \frac{I_{BP}}{I_{in}} = -\frac{R_x C s}{1 + R_x C s + (R_x C)^2 s^2} \quad (6)$$

从式(6)得出基本二阶滤波器的中心频率为  $f_0 = 1/2\pi R_x C$ 。通过对比式(6)和式(5), 可计算出参数  $a' = a = R_x C$ ,  $b = (R_x C)^2$ 。这样, 参数可线性重构的带通滤波器的系统函数如下:

$$H'_{BPT}(s) = \frac{I'_{BP}/I_{in}}{1 - A \cdot (I'_{LP}/I_{in})} = \frac{R_x C s / (1 - A)^2}{1 + R_x C s / (1 - A) + (R_x C)^2 s^2 / (1 - A)^2} \quad (7)$$

根据文献[10], 计算得到放大系数  $A = -I_{BC}/I_B$ , 且  $A \leq 0$ 。二阶带通滤波器的电路参数可以通过改变 CCC II 模块中的外接电流源的直流电流比  $I_{BC}/I_B$  来线性重构, 重构范围宽(只要满足  $A \leq 0$  即可)且重构十分方便。

### 3 灵敏度分析

由灵敏度公式  $S_x^y = (x/y) \cdot (\partial y / \partial x)$ , 计算电流放大器放大系数  $A$  的微小变化对可重构滤波器的中心频率、品质因素、带通增益和  $-3$  dB 带宽等参数的影响如下:

$$S_{A}^{f_{OT}} = S_{A}^{Q_{OT}} = -\frac{A}{(1-A)}, S_{A}^{G'_{BPT}} = S_{A}^{B'_{OT}} = 0 \quad (8)$$

由式(8)可得, 当  $A < \frac{1}{2}$  时, 电流放大器放大系数  $A$  对滤波特性参数即中心频率、品质因素、带通增益和  $-3$  dB 带宽灵敏度的绝对值都小于 1, 满足灵敏度设计要求。

### 4 Spectre 仿真

为了验证参数可线性重构二阶带通滤波器的设计理论的正确性, 在  $0.18 \mu\text{m}$  SMIC BiCMOS 工艺条件下对图 5 所示电路进行 Spectre 仿真。取电路的参数为: 电源电压为  $\pm 1.5$  V, 电容取值  $C_1 = C_2 = C = 5$  pF, 偏置电流  $I_{B1} = I_{B2} = I_{B3} = 50 \mu\text{A}$ , 则可计算出基本二阶带通滤波器的理论中心频率为 122 MHz。取电流放大器的放大系数  $A$  等于  $-1$ 、 $-2$  和  $-5$ , 即

偏置电流  $I_{BC}$  分别为  $50 \mu\text{A}$ 、 $100 \mu\text{A}$  和  $250 \mu\text{A}$  时对滤波器进行 Spectre 仿真, 仿真结果如图 6 所示。分析图 6 可得出  $f_{OT} = 239$  MHz ( $A = -1$ )、 $f_{OT} = 368$  MHz ( $A = -2$ ) 和  $f_{OT} = 736$  MHz ( $A = -5$ ), 与理论计算值  $f_{OT} = 244$  MHz ( $A = -1$ )、 $f_{OT} = 366$  MHz ( $A = -2$ ) 和  $f_{OT} = 732$  MHz ( $A = -5$ ) 基本一致, 由此可得出, 本文所提出的参数可线性重构的电流模式二阶带通滤波器理论是正确的。本文提出的可线性重构二阶带通滤波器是对文献[6]提出的二阶带通滤波器的改进, 但和文献[6]相比具有更宽的频率可调谐范围, 而且中心频率和品质因数等参数可以通过放大系数  $A$  线性重构, 准确性更好。

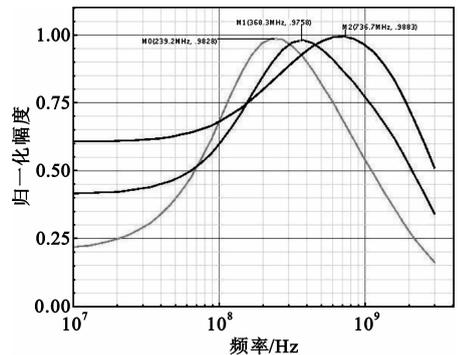


图 6 Spectre 仿真结果(电流放大系数  $A = -1, -2, -5$ )  
Fig. 6 Spectre simulation results (current amplification coefficient  $A = -1, -2, -5$ )

### 5 结束语

本文提出了一种参数可线性重构的二阶带通滤波器设计理论, 该滤波器通过调节反馈电流放大器的放大系数  $A$  可线性重构二阶带通滤波器的截止频率、品质因素等参数。采用  $0.18 \mu\text{m}$  SMIC BiCMOS 工艺,  $\pm 1.5$  V 电源电压下, 设计了基于 CCC II 的参数可线性重构的带通滤波器电路。Spectre 仿真结果表明, 该滤波器电路的中心频率和品质因素在 2 GHz 内可线性重构, 偏差小于 2%。该理论同样适用于高通可线性重构滤波器设计。

### 参考文献:

- [1] Graham D W, Hasler P E, Chawla R, et al. A Low - Power Programmable Bandpass Filter Section for Higher Order Filter Applications[J]. IEEE Transactions on Circuits System I, 2008, 54(6): 1165 - 1176.
- [2] Mohammad Mahdi Farhad, Sattar Mirzakhuchaki. A Gm - C Anti - Aliasing Filter for Digital Radio Receivers[C]//Pro-

- ceedings of the Second International Conference on Electrical Engineering. Lahore, Pakistan: University of Engineering and Technology, 2008:195 – 198.
- [3] Han Shuguang, Chi Baoyong, Wang Zhihua. A Mixed Loop CMOS Analog GFSK Modulator with Tunable Modulation Index [J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems II, 2007, 54 (6): 547 – 551.
- [4] Julien Arcamone, Bertrand Misischi, Francisco Serra – Graells, et al. A Compact and Low – Power CMOS Circuit for Fully Integrated NEMS Resonators [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II, 2007, 54 (6): 377 – 381.
- [5] Schmid H P, Moschytz G S. Active – MOSFET – C Single Amplifier Biquadratic Filters for Video Frequencies [J]. IEEE Pore – Circuits Devices System, 2000, 147(2): 35 – 41.
- [6] 宋树祥, 王小华. 电调谐 CCC II – C 电流模式二阶带通滤波器 [J]. 电路与系统学报, 2011, 16(5): 51 – 54.  
SONG Shu – xiang, WANG Xiao – hua. A New electronically tunable Current mode second – order bandpass Filter Based on CCC II – C [J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16 (5): 51 – 54. (in Chinese)
- [7] Pui – In M, Seng – Side, U, Rui P M. Transceiver structure selection: review, state – of – the – art survey and case study [J]. IEEE Circuits System Magazine, 2007, 7 (2): 6 – 25.
- [8] Liao Wei – Hung, Chen Chang – Sheng, Lin Yo – Shen. Single – chip integration of electronically switchable bandpass filter for 3. 5GHz WiMAX application [C] // Proceedings of 2010 Microwave Symposium Digest. Anaheim, CA: IEEE, 2010: 1368 – 1371.
- [9] Lakys Y, Godara B, Fabre A. Cognitive and encrypted communications. Part 2: A new theory for frequency agile active filters and the validation results for an agile bandpass in SiGe – BiCMOS [C] // Proceeding of the 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering. Bursa, Turkey: IEEE, 2009: 16 – 29.
- [10] Fabre A, Saaid O, Wiest F, et al. High frequency applications based on a new current controlled conveyor [J]. IEEE Transactions on Circuits System, 1996, 43(2): 82 – 91.

### 作者简介:

宋树祥(1970—),男,湖南双峰人,2009年于华中科技大学获电路与系统专业博士学位,现为副教授,主要研究方向为模拟集成电路设计;

SONG Shu – xiang was born in Shuangfeng, Hunan Province, in 1970. He received the Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2009. He is now an associate professor. His research concerns analog integrated circuit design.

Email: songshuxiang@mailbox.gxnu.edu.cn

王小华(1980—),男,湖南邵阳人,讲师,主要研究方向为模拟集成电路设计;

WANG Xiao – hua was born in Shaoyang, Hunan Province, in 1980. He is now a lecturer. His research concerns analog circuit design.

解鸿国(1983—),男,山西大同人,硕士研究生,主要研究方向为模拟集成电路设计及其应用。

XIE Hong – guo was born in Datong, Shanxi Province, in 1983. He is now a graduate student. His research concerns analog integrated circuits and their applications.