

文章编号: 2095-4980(2020)01-0108-04

采用 MO-CFTA 和 MO-CCCCTA 的电流模式 KHN 滤波器

马一山¹, 曾以成²

(1.中国电子科技集团公司 第四十八研究所, 湖南 长沙 410111; 2.湘潭大学 微电子科学与工程系, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 针对现有电流模式 Kerwin-Huelsman-Newcomb(KHN)滤波器的不足, 借助 KHN 电路对应的信号流程图, 设计了一种由一个多输出电流跟随跨导放大器(MO-CFTA)和一个多输出电流控制电流传输跨导放大器(MO-CCCCTA)及 2 个接地电容构成的电流模式 KHN 滤波器。它能同时实现低通(LP)、高通(HP)、带通(BP)、带阻(BR)和全通(AP)5 种滤波功能, 其极点频率与品质因数能由偏置电流独立调整, 并具有无源与有源灵敏度低、使用元件少、输入阻抗低和输出阻抗高、适于集成等优点。采用 PSPICE 对电路进行了仿真, 所得结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 电流模式; KHN 滤波器; 电流跟随跨导放大器; 电流控制电流传输跨导放大器

中图分类号: TN713.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018047

Current-mode KHN filter based on MO-CFTA and MO-CCCCTA

MA Yishan¹, ZENG Yicheng²

(1.No.48 Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Changsha Hunan 410111, China;

2.Department of Microelectronics Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China)

Abstract: Aiming at the deficiency of the existing Kerwin-Huelsman-Newcomb(KHN) filter, a current mode KHN filter by consisting of a Multiple-Output Current Follow Transconductance Amplifier (MO-CFTA), a Multiple-Output Current Controlled Current Conveyor Transconductance Amplifier(MO-CCCCTA) and two grounded capacitors are designed by using the signal flow diagram corresponding to the KHN circuit. The circuit can realize five kinds of filter function simultaneously including Low Pass(LP), High Pass(HP), Band Pass(BP), Band Reject(BR) and All Pass(AP). Its pole frequency and the quality factor can be independently adjusted by bias current. The circuit has many advantages, such as lower passive and active sensitivity, fewer components, low input impedance and high output impedance, suitable for integration. The performances of the proposed circuit are illustrated by PSPICE simulation, and the simulation results verify the correctness of the theoretical analysis.

Keywords: current-mode; KHN filter; Current Follow Transconductance Amplifier; Current Controlled Current Conveyor Transconductance Amplifier

经典 KHN 滤波器是基于运算放大器的二阶电压模式滤波器, 其显著特点是能同时提供低通、高通和带通 3 种滤波功能和较低的无源灵敏度^[1]。由于电流模式滤波器具有功耗低, 电路结构简单, 级联不需要任何其他匹配电路, 便于集成等优点^[2], 因而已有很多文献报道了采用各种有源器件设计的电流模式 KHN 滤波器^[3-8]。如文献[3]的电路包含了 3 个多输出电流传输跨导放大器(MO-CFTA)、1 个跨导运算放大器(Operational Transconductance Amplifier, OTA)和 2 个接地电容; 文献[4]的电路由 2 个电压差分跨导放大器(Voltage-Differencing Transconductance Amplifier, VDTA)和 2 个接地电容组成; 文献[5]的滤波器由 2 个电压差分缓冲放大器(Voltage-Differencing Buffered Amplifier, VDBA)和 2 个接地电容构成; 文献[6]的滤波器由 3 个电流传输跨导放大器(CCTA)和 2 个接地电容组成; 文献[7]的滤波器由 5 个第三代电流传输器(Third Generation Current Conveyor, CCIII)、2 个接地电容和 6 个接地电阻构成; 文献[8]的电路则由 2 个电压差分电流传输器(Voltage Differencing Current Conveyor, VDCC)、2 个接地电容和 2 个接地电阻组成。但这些电路不能直接实现带阻和全通滤波, 有的使用了较多的有源器件^[3,7]和电阻^[7-8], 个别电路的输出电流取自电容支路^[5], 都不便于使用。

收稿日期: 2018-02-24; 修回日期: 2018-12-15

作者简介: 马一山(1990-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电子技术及光伏系统设计。email: mayishan13@163.com

近年来,一种称为电流控制电流传输跨导放大器(CCCCTA)的新型有源器件被应用在模拟电路设计中^[9-15],该器件实际上是电流控制电流传输器与跨导运算放大器的组合,由于它的 x 端内部有一受偏置电流控制的寄生电阻,因而基于 CCCCTA 的滤波器可以不包含电阻元件^[10-14]。本文将给出一种以 MO-CFTA 和 MO-CCCCTA 为有源器件及 2 个接地电容构成的 KHN 电流模式滤波器,克服了上述文献的不足。PSPICE 仿真结果也证实了提出电路的正确性。

1 CFTA 和 CCCCTA 的基本概念

MO-CCFTA 器件的符号及等效电路如图 1(a)和图 1(b)所示。理想的端口特性方程为^[3]:

$$v_f = 0, i_{+z} = i_f, i_{-z} = -i_f, i_{+x} = g_m v_{+z}, i_{-x} = -g_m v_{+z} \quad (1)$$

式中: $v_{+z} = i_{+z} Z$, Z 是连接到 $+z$ 端的外部阻抗。对于三极管实现的电路,其跨导计算公式为:

$$g_m = \frac{I_S}{2U_T} \quad (2)$$

式中: U_T 为热电压,在室温时为 26 mV; I_S 为反向饱和电流。

CCCCTA 的电路符号和等效电路如图 2(a)与图 2(b)所示。其理想的端口特性为^[9]:

$$i_y = 0, v_x = R_x i_x + v_y, i_{+z} = i_x, i_{-z} = -i_x, i_{+o} = g_m v_{+z}, i_{-o} = -g_m v_{+z} \quad (3)$$

式中 R_x 是 x 输入端内的寄生电阻。对于三极管实现的电路,其 R_x 的计算公式为:

$$R_x = \frac{U_T}{2I_B} \quad (4)$$

式中 I_B 为偏置电流。

2 提出的电流模式 KHN 滤波器

借助 KHN 电路对应的信号流图,并利用电流节点实现电流加法器,MO-CFTA(跨导为 g_{m1})和 MO-CCCCTA(跨导为 g_{m2})构成的电流模式 KHN 滤波器如图 3 所示。根据器件模块的端口伏安关系式(1)和式(3),可求得低通(LP)、带通(BP)、高通(HP)、带阻(BR)和全通(AP)滤波器的传输函数依次为:

$$H_{LP}(s) = \frac{\frac{g_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}}{s^2 + \frac{g_{m1}}{C_1}s + \frac{g_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}} \quad (5)$$

$$H_{BP}(s) = \frac{\frac{g_{m1}}{C_1}s}{s^2 + \frac{g_{m1}}{C_1}s + \frac{g_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}} \quad (6)$$

$$H_{HP}(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{g_{m1}}{C_1}s + \frac{g_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}} \quad (7)$$

$$H_{BR}(s) = \frac{s^2 + \frac{g_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}}{s^2 + \frac{g_{m1}}{C_1}s + \frac{g_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}} \quad (8)$$

$$H_{AP}(s) = \frac{s^2 - \frac{g_{m1}}{C_1}s + \frac{g_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}}{s^2 + \frac{g_{m1}}{C_1}s + \frac{g_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}} \quad (9)$$

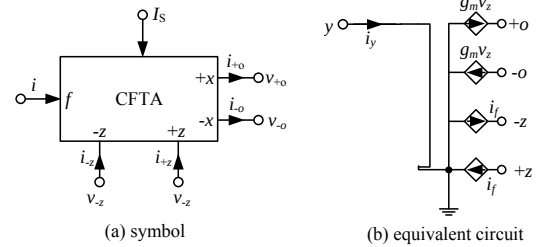


Fig.1 Symbol of MO-CFTA and its equivalent circuit
图 1 MO-CFTA 的符号与等效电路

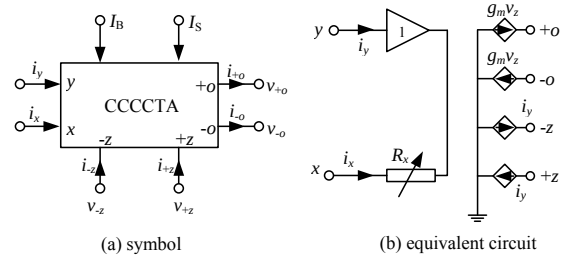


Fig.2 Symbol of MO-CCCCTA and its equivalent circuit
图 2 MO-CCCCTA 的符号与等效电路

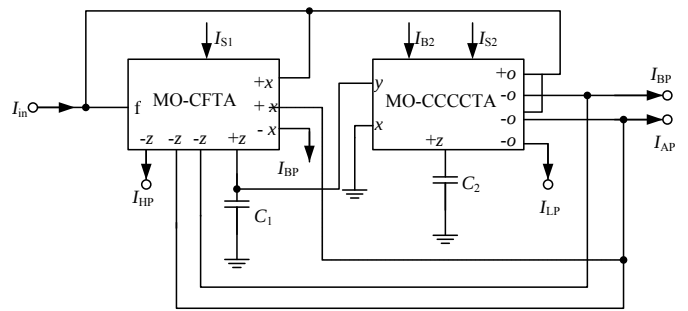


Fig.3 Current-mode KHN filter based on MO-CFTA and MO-CCCCTA
图 3 基于 MO-CFTA 和 MO-CCCCTA 的电流模式 KHN 滤波器

并可求得极点频率与品质因数为:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_{m2}}{R_{x2}C_1C_2}} = \frac{1}{U_T} \sqrt{\frac{I_{B2}I_{S2}}{C_1C_2}} \quad (10)$$

$$Q = \frac{1}{g_{m1}} \sqrt{\frac{g_{m2}C_1}{R_{x2}C_2}} = \frac{2}{I_{S1}} \sqrt{\frac{I_{B2}I_{S2}C_1}{C_2}} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可知, 在保持 $I_{B2}I_{S2} = I_{S1}^2$ 的前提下改变 $I_{B2}I_{S2}$, 则 ω_0 变化, Q 值不变; 或保持 $I_{B2}I_{S2}$ 不变而调整 I_{S1} , 则 ω_0 不变, Q 值变化, 从而实现了两者的独立调节。

在非理想情况下, CFTA 的端口电压电流关系可写为:

$$v_f = 0, i_{+z} = -\alpha_p i_f, i_{-z} = -\alpha_n i_f, i_{+x} = \gamma_p g_m v_{+z}, i_{-x} = -\gamma_n g_m v_{+z} \quad (12)$$

而 CCCCTA 的端口特性则为:

$$i_y = 0, v_x = R_x i_x + \beta v_y, i_{+z} = \alpha_p i_x, i_{-z} = -\alpha_n i_x, i_{+o} = \gamma_p g_m v_{+z}, i_{-o} = -\gamma_n g_m v_{+z} \quad (13)$$

式(12)~(13)中: α_p, α_n 及 α_v 分别为电流和电压传递系数; γ_p, γ_n 为跨导的误差因子。它们的理想值为 1, 但实际都会偏离 1。同样可推出相应低通、带通、高通、带阻和全通滤波器的传输函数。其极点频率和品质因数为:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\beta_2 \alpha_{p1} \alpha_{p2} \gamma_{p2} g_{m2}}{R_{x2} C_1 C_2}} \quad (14)$$

$$Q = \frac{1}{\gamma_{p1} g_{m1}} \sqrt{\frac{\beta_2 \alpha_{p2} \gamma_{p2} g_{m2} C_1}{\alpha_{p1} R_{x2} C_2}} \quad (15)$$

式中非理想参数的下标中的数字 1,2 表示属于第 1 个 CFTA 或第 2 个 CCCCTA。

由灵敏度定义 $S_x^y = \frac{x}{y} \frac{\partial y}{\partial x}$, 可求得 ω_0 与 Q 的无源和有源灵敏度绝对值都小于或等于 1。

3 PSPICE 仿真

为验证提出电路的可行性, 用 PSPICE 进行三极管级仿真。MO-CFTA 是将文献[3]中的 MOS 管替换成三极管得到的电路(除控制跨导的偏置电流 I_{S1} 外, 在内部还有偏置电流 I_{B1} , 仿真时取为 $150 \mu A$), 而 MO-CCCCTA 采用文献[12]的电路, 只需电流镜增加 $\pm z$ 或 $\pm o$ 或 $\pm x$ 端。其中的 NPN 和 PNP 管为 PR200N 和 NR200N^[16]。

1) 固定极点频率为 1 MHz, Q 值等于 1。选取 $C_1 = C_2 = 1 \text{ nF}$, $I_{S1} = 326.725 \mu A$, $I_{B2} = 150 \mu A$, $I_{S2} = 177.916 \mu A$, 图 4 给出了低通、高通、带通、带阻和全通滤波器的幅频特性曲线。仿真的中心频率为 931.844 MHz, 与理论值差异的主要原因是 CFTA 及 CCCCTA 的非理想性, 即极点频率应按式(14)计算。经仿真可知 $\alpha_{p1} = 0.9700$, $\alpha_{p2} = 0.9617$, $\gamma_{p2} = 0.9636$, $\beta_2 = 0.9993$, 则计算的频率为 947.76 MHz, 与选定值的相对误差仅为 1.76%。

2) 极点频率变化, 但 Q 值不变。设极点频率依次为 0.5 MHz, 1 MHz 和 1.5 MHz, Q 值保持 1 不变, 由式(10)与式(11)求得各自对应的偏置电流, 如取 I_{S1} 分别为 $163.363 \mu A$, $326.725 \mu A$, $490.088 \mu A$, $I_{B2} = 150 \mu A$, I_{S2} 依次为 $44.479 \mu A$, $177.916 \mu A$, $400.311 \mu A$ 。仿真的带通滤波器幅频特性如图 5 所示, 中心频率分别为 462.892 kHz, 931.844 kHz, 1.400 5 MHz, 这与选定值相近。

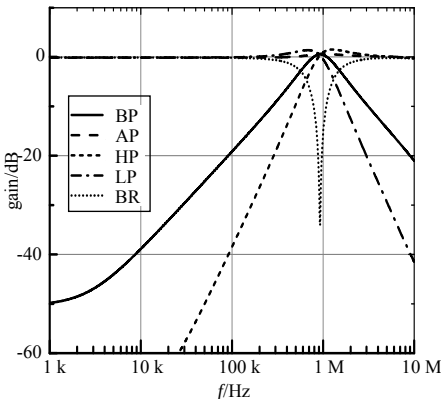


Fig.4 Simulation results of proposed filter
图 4 提出滤波器的仿真结果

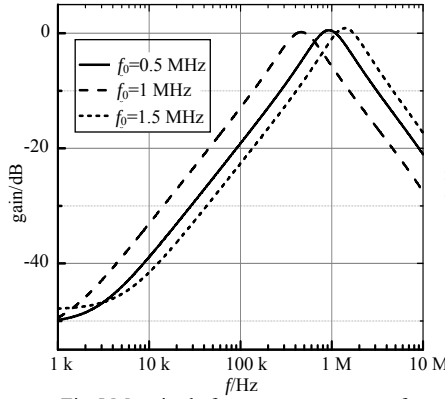


Fig.5 Magnitude frequency responses of bandpass filter for different f_0 values
图 5 f_0 为不同值时带通滤波器的幅频响应

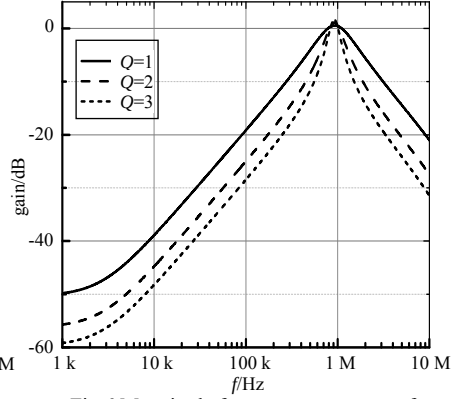


Fig.6 Magnitude frequency responses of bandpass filter for different Q values
图 6 Q 取不同值时带通滤波器的幅频响应

3) 极点频率不变, 而 Q 值变化。极点频率保持 1 MHz, Q 值依次为 1,2,3, 则由式(10)与式(11)可求得各自对应的偏置电流: I_{S1} 分别为 326.725 μ A, 163.363 μ A, 108.908 μ A, $I_{B2}=150 \mu$ A, $I_{S2}=177.916 \mu$ A。仿真得到的带通滤波器幅频特性如图 6 所示, 相应的 Q 值依次为 1.04, 2.16, 3.32, 也与设定值一致。

4 结论

本文提出的由一个 MO-CFTA、一个 MO-CCCCTA 和 2 个接地电容组成的 KHN 电流模式滤波器具有如下优点: 除了能提供低通、高通、带通滤波功能外, 还同时实现了带阻和全通功能; 电路仅使用 2 个接地电容, 不使用电阻, 因而适于电路集成; 极点频率与品质因数两者能独立电调谐; 高低频增益及带通增益也不改变(理论值是 1); 输入阻抗低, 输出阻抗高, 便于电路级联; 有源与无源灵敏度都很低, 绝对值小于或等于 1。

参考文献:

- [1] KERWIN W J, HUELSMAN L P, NEWCOMB R W. State-variable synthesis for insensitive integrated circuit transfer functions[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1967, 2(3):87-92.
- [2] ROBERTS G W, SEDRA A S. All current-mode frequency selective circuits[J]. Electronics Letters, 1989, 25(12):759-761.
- [3] SOTNER R, PETRZELA J, SLEZAK J. Current mode tunable KHN filter based on controlled MO-CFTAs[C]// 2009 3rd International Conference on Signals, Circuits and Systems(SCS). Medenine, Tunisia:IEEE, 2009:1-4.
- [4] BIOLEK D, SHAKTOUR M, BIOLKOVA V, et al. Current-input current-output universal biquad employing two bulk-driven VDTAs[C]// 2012 IV International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems. St.Petersburg, Russia:IEEE, 2012:484-489.
- [5] GÜNEY A, ALAYBEYOĞLU E, KUNTMAN H. New CMOS realization of Z copy voltage differencing buffered amplifier and its current-mode filter application[C]// 2013 8th International Conference on Design & Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era(DTIS). Abu Dhabi, United Arab Emirates:IEEE, 2013:68-71.
- [6] JERABEK J, SOTNER R, KINCL Z, et al. Study of practical problems in two-loop CCTA based biquad:finite attenuations in stop bands[C]// 2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering(ELECO). Bursa, Turkey:IEEE, 2013:40-44.
- [7] ARORA T S, SHARMA R K. Realization of current mode KHN-equivalent biquad employing third generation current conveyor[C]// 2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT). New Delhi, India:IEEE, 2016:558-562.
- [8] RANA S, KUMAWAT A K, KUMAR P. A universal current mode KHN biquad filter using voltage differencing current conveyor[C]// 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). Delhi, India:IEEE, 2016:1-5.
- [9] SIRIPRUCHYANUN M, JAIKLA W. Current Controlled Current Conveyor Transconductance Amplifier(CCCCTA): a building block for analog signal processing[J]. Electrical Engineering, 2008, 90(6):443-453.
- [10] JAIKLA W, SIRIPRUCHYANUN M. A cascable current-mode universal biquadratic filter using MO-CCCCTAs[C]// APCCAS 2008-2008 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. Macao, China:IEEE, 2008:952-955.
- [11] SINGH S, MAHESHWARI S, MOHAN J, et al. Electronically tunable current-mode universal biquad filter based on the CCCCTA[C]// 2009 International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing. Kottayam, Kerala, India:IEEE, 2009:424-429.
- [12] MAHESHWARI S, SINGH S V, CHAUHAN D S. Electronically tunable low-voltage mixed-mode universal biquad filter[J]. IET Circuits, Devices & Systems, 2011, 5(3):149-158.
- [13] SIRIPONGDEE S, KWAWSIBSAM A, JAIKLA W. Current controlled current-mode universal filter using CCCCTAs[C]// Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. Beijing, China:IEEE, 2011:307-311.
- [14] KANCHANA S, NOPPAKARN A, SAKUL C, et al. Current controlled current-mode universal filter using CCCCTAs[C]// 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China:IEEE, 2011:1-4.
- [15] KUMNGERN M, TORTEANCHAI U, SARSITTHITHUM K. Current-tunable current-mode multifunction filter employing a modified CCCCTA[C]// 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA). Singapore:IEEE, 2012:1794-1797.
- [16] FREY D R. Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering[J]. IEE Proceedings G-Circuits, Devices and Systems, 1993, 140(6):406-416.