

全差分可调频率四阶 Chebyshev 滤波器的实现¹

江金光 何怡刚 吴杰

(湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082)

摘要: 提出了一种新的全差分运算放大器。该运算放大器在具有电压共模负反馈的同时还具有电流共模负反馈,能较好地稳定其工作点。通过利用 MOS 管工作在线性区便能作可变电阻之用的特性,设计实现了基于 R-MOSFET-C 运放的全差分频率连续调节的四阶 Chebyshev 低通滤波器。该滤波器采用台湾联电(UMC)2 层多晶硅、2 层金属(2P2M)5V 电源电压、0.5 μm CMOS 工艺生产制造。其芯片面积大小为 0.36mm²,截止频率调节范围为 20kHz 到 420kHz,输入信号频率在 100kHz, 2.5V_{pp} 时的失真小于 -65dB,功耗仅为 16mW。

关键词: R-MOSFET-C 滤波器,全差分式,电压、电流共模负反馈(CMFB),Chebyshev 滤波器
中图分类号: TN713.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)05-0800-07

Realization of Fully Differential Fourth-Order Chebyshev Filter with Tunable Frequency

Jiang Jin-guang He Yi-gang Wu Jie

(College of Electrical and Info. Eng., Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract A fully differential R-MOSFET-C fourth-order Chebyshev filter employing fully differential operational amplifier, passive resistors and current-steering MOS transistors is proposed, this proposed implementation relies on the tunability of current-steering MOS transistors in the triode region acting as variable resistors in order that the cutoff frequency of the filter could be tuned continuously, the amplifier is not only with voltage common-mode negative feedback, but also with current common-mode negative feedback, which will benefit for the stability of its dc operating point, the filter whose cutoff frequency range is from 20kHz to 420kHz, demonstrates better than 65dB THD with 100kHz, 2.5V_{pp} input signal in Taiwan UMC 2P2M(2-Poly, 2-Metal) 0.5 μm CMOS technology, the filter measures 0.36mm², and consumes only 16mW from a single 5.0V power supply.

Key words R-MOSFET-C filter, Fully differential, Voltage and current common-mode negative feedback, Chebyshev filter

1 引言

最近,集成连续时间滤波器的研究受到了电路与系统学界的广泛关注,并在通信集成电路如非对称数字用户线(Asymmetrical Digital Subscriber Loops, ADSL)以及 GSM 基带输入/输出端口(Baseband I/O port)芯片中得到了成功的应用^[1-7],本文在文献[8-10]的基础上提出了一种新的同时具有电压、电流共模负反馈的全差分运算放大器,与同类运算放大器相比,该运放不仅具备较高的相位裕度(5pF 负载情况下为 92°),不容易自激,而且有较强的稳定电路静态工作点的特性,应用该全差分运算放大器以及无源电阻、MOS 管有源电阻和电容设计了频率连续调节的四阶 Chebyshev 低通滤波器,在相同输入信号频率下与通常的 MOSFET-C 运放构成的滤波器相比,大大地提高了其非线性失真(Total Harmonic Distortion)指标,该滤

¹ 2002-12-12 收到, 2003-03-10 改回

国家自然科学基金(No.50277010)和湖南大学揽英计划资助课题

波器的设计是由四阶 Chebyshev 低通无源滤波器等效变换设计得到的，仿真结果表明，实际有源滤波器的幅频响应与无源滤波器的响应基本吻合，且其截止频率可在较宽的范围内调节而完全不改变滤波器的性质。

2 R-MOSFET-C 一阶滤波器

为了进一步提高 MOSFET-C 滤波器的线性度，我们将电路中作为可变电阻之用的 MOS 管串联了附加的线性电阻，仿真结果及芯片测试结果均说明加入了无源电阻的滤波器的谐波失真可降得更低。图 1 为 R-MOSFET-C 运放一阶滤波器的原理电路，电路中 MOS 管 $M_1 \sim M_8$ 的宽长比完全一致，如采用 PMOS 管，可提高电路的信噪比，滤波器中全差分运算放大器的应用可有效地抑制偶次谐波。

图 1 电路可简化成如下形式，为了分析简化起见，可采用如下半电路形式 (图 2)。

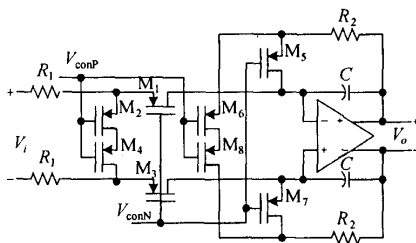


图 1 R-MOSFET-C 一阶低通滤波器

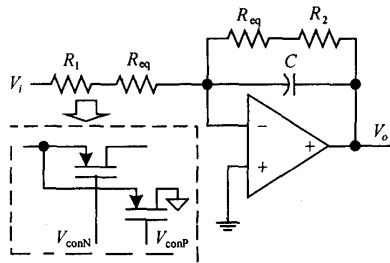


图 2 一阶低通滤波器的等效电路

由图 2 电路可得到如下方程：

$$\frac{V_o}{V_i} = - \left[\frac{R_2 + R_{eq}}{R_1 + R_{eq}} \frac{1}{(R_2 + R_{eq})C} \right] \bigg/ \left[S + \frac{1}{(R_2 + R_{eq})C} \right] \quad (1)$$

若 $R_1 = R_2 = R$ ，则可得到

$$\frac{V_o}{V_i} = - \left[\frac{1}{(R + R_{eq})C} \right] \bigg/ \left[S + \frac{1}{(R + R_{eq})C} \right] \quad (2)$$

由式 (2) 可见，通过改变 MOS 管栅极的电压即 V_{conP} 与 V_{conN} 的差值，便可改变 MOS 管有源电阻的等效阻值 R_{eq} 的大小，从而可以起到调节有源滤波器截止频率值的作用。

3 全差分运算放大器

在 R-MOSFET-C 运放所设计得到的滤波器中，运算放大器的各项特性将直接影响滤波器的特性，例如：运算放大器的电源电压即为滤波器的工作电压，运算放大器的单位增益带宽 (GBW) 至少应为所设计的有源滤波器转折频率的 10 倍以上，此外为了有效地提高滤波器的各项特性，可在设计运算放大器时考虑以下因素：

(1) 运算放大器的输入级晶体管采用 PMOS 管，因为在同等工作条件下，与 NMOS 管相比，PMOS 管具有更小的 $1/f$ 噪声。

(2) 二级运算放大器的输出与输入之间接入了补偿电容 (C_c)，为了消除补偿电容前向耦合引起的右半平面 (RHP) 零点效应，电路中同时插入了一个与 C_c 串联的零电阻，从而大大地增加了运算放大器的 GBW，其增加带宽的原理可见如下部分的运放的小信号分析电路。

(3) 全差分运算放大器可以有效地抑制偶次输入谐波, 由于该运放同时具有电压、电流共模负反馈, 可以大大地提高其静态工作点的稳定性。

全差分运算放大器的电路原理图如图 3 所示。

在图 3 所示的全差分运算放大器电路中, 其偏置电路采用 cascode 结构电流源电路, 能大幅度地增加其电源电压抑制比 (PSRR), 若需进一步提高该运放的直流增益, 可将运放的输入级负载设计成 cascode 结构的 MOS 管电流源负载, 依据图 3 所示的二级运算放大器原理电路, 可得到其小信号分析电路, 如图 4 所示。通过其小信号分析电路可得到如下传输函数。

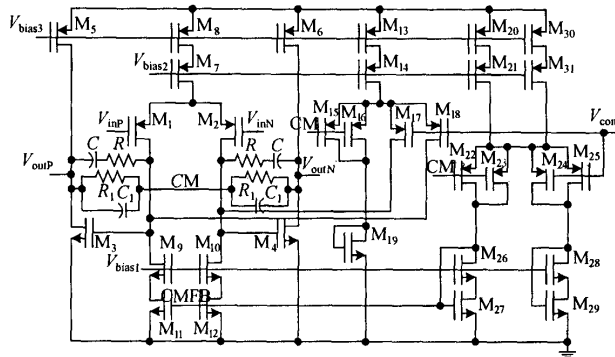


图 3 具有电压、电流共模负反馈的全差分运算放大器原理图

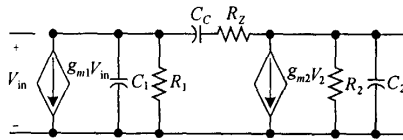


图 4 具有零电阻的全差分运算放大器小信号分析电路

$$\frac{V_{out}(S)}{V_{in}(S)} = \frac{a\{1 - S[(C_C/g_{m2}) - R_Z C_C]\}}{1 + bS + cS^2 + dS^3} \quad (3)$$

其中 $a = g_{m1}g_{m2}R_1R_2$, $b = (C_2 + C_C)R_2 + (C_1 + C_C)R_1 + g_{m2}R_1R_2C_C + R_ZC_C$,
 $c = R_1R_2(C_1C_2 + C_C C_1 + C_C C_2) + R_ZC_C(R_1C_1 + R_2C_2)$, $d = R_1R_2R_ZC_1C_2C_C$ 。

由式 (3) 可得到如下极点和零点:

$$p_1 \approx -1/[(1 + g_{m2}R_2)R_1C_C] \approx -1/(g_{m2}R_2R_1C_C) \quad (4)$$

$$p_2 \approx -g_{m2}C_C/[C_1C_2 + C_C C_1 + C_C C_2] \approx -g_{m2}/C_2 \quad (5)$$

$$p_3 = -1/(R_ZC_1) \quad (6)$$

$$z_1 = 1/[C_C(1/g_{m2} - R_Z)] \quad (7)$$

通过调节电阻 R_Z 即可控制零点的位置, 当 R_Z 等于 $1/g_{m2}$ 时, 即可将右半平面 (RHP) 零点消除, 从而大大地提高了全差分运算放大器的带宽。

从图 3 所示的电路来看， V_{com} 端接 2.5V 共模电压，MOS 管 M15-M18 构成电流共模负反馈电路，反馈电流直接流入到第一级放大的负载管 M9, M10 的漏极以稳定工作点，MOS 管 M22-M25 构成电压共模负反馈电路，经由 M26, M27 管所产生的反馈电压直接加在第一级负载管 M11, M12 的栅极上形成电压共模负反馈进一步稳定全差分运放的静态工作点。

MOS 管 M9-M11 接成 cascade 结构形成运放第一级放大的有源负载可以提高运放的直流增益，在输出负载为 5pF 电容的情况下，该运放的幅频及相频曲线如图 5 所示：

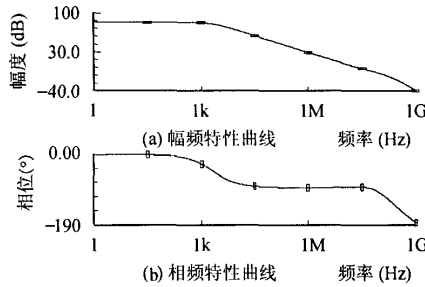


图 5 全差分运算放大器的幅频及相频特性曲线

从图 5 可见，该全差分运算放大器在 5pF 负载情况下的直流增益为 83.2dB，单位增益带宽 (GBW) 为 32MHz，相位裕度为 92 度，增益裕度为 36dB。

4 全差分有源低通滤波器的综合

采用上述 R-MOSFET-C 积分器可以设计得到四阶 Chebyshev 低通滤波器，通过调节工作在线性区 MOS 管栅极控制电压可以改变该 MOS 管有源电阻的阻值，从而可以改变滤波器的电阻阻值，使得有源 Chebyshev 低通滤波器的截止频率可以在很宽的范围内得到调节。滤波器的拓扑结构可以通过查表从双端无源 RLC 低通原型得到。依据相应的信号流图，可以设计得到基于积分器及有损积分器的全差分有源低通滤波器。其中的积分器和有损积分器由 R-MOSFET-C 及全差分运放所构成^[11-16]，应用此方法可以通过任意类型的无源 RLC 滤波器原型电路导出其有源网络电路，图 6 所示电路为四阶无源低通滤波器等效得到的 R-MOSFET-C 运放结构的有源网络。

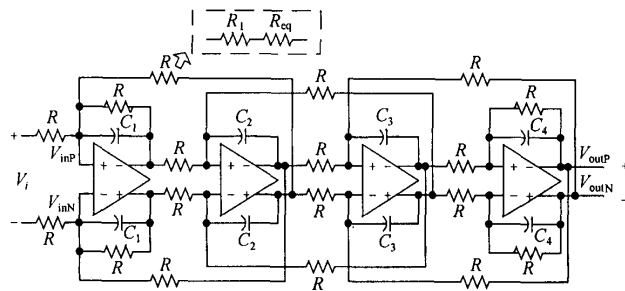


图 6 四阶全差分有源低通滤波器

5 截止频率连续可调的四阶 Chebyshev 低通滤波器设计

设计一截止频率连续可调的四阶 Chebyshev 低通滤波器。要求：(1) 滤波器的截止频率为 138kHz，且能在 103.5kHz~172.5kHz 范围内可连续调节。(2) 滤波器通带内的增益值为 0dB, 1dB 波纹。

查表可得到 0dB 通带增益，1dB 波纹的四阶 Chebyshev 低通滤波器的归一化原型电路。通过该原型电路将其变换到截止频率为 138kHz 频率处，此时的电阻值取 100kΩ，可得到其无源低通网络，如图 7 所示。

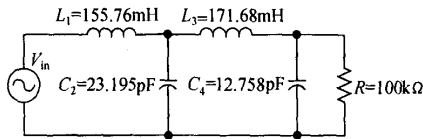


图 7 0dB 增益、1dB 波纹、截止频率为 138kHz 的四阶 Chebyshev 无源低通滤波器

根据图 7 所示的无源低通网络写出其信号流图 (SFG)，采用基于全差分运算放大器的积分器及有损积分器实现信号流图中的各积分单元，可等效得到全差分有源 R-MOSFET-C 运放结构的四阶 Chebyshev 低通滤波器，考虑如果需要将有源滤波器的非线性失真 (THD) 设计在 -60dB 以下，电路中的无源及有源电阻阻值分配可设计为：无源电阻为

66kΩ，通过调节工作在线性区的有源 MOS 管栅极电压，可得到阻值为 34kΩ 的 MOS 管有源电阻，两部分等效电阻的和为 100kΩ，等效变换后得到的电容值分别为： $C_1 = 15.576\text{pF}$ ， $C_2 = 23.195\text{pF}$ ， $C_3 = 17.168\text{pF}$ ， $C_4 = 12.758\text{pF}$ 。

进一步调节 MOS 管有源电阻栅极的电压值，从而改变了滤波器结构中所有电阻的阻值 (除全差分运放中的电阻外)，同时保持滤波器结构中的电容 $C_1 \sim C_4$ 的值不变，可得到在频率 103.5kHz~172.5kHz 范围内连续可调的全差分四阶 Chebyshev 低通滤波器。

6 有源低通滤波器的仿真及实验结果

全差分四阶 Chebyshev 低通滤波器采用台湾联电 (UMC)5V 电源电压， $0.5\mu\text{m}$ 2P2M CMOS 工艺生产制造，芯片面积为 0.36mm^2 ，输入信号频率为 100kHz 时的功耗为 16mW。

从滤波器幅频响应仿真曲线 (图 8) 可以看出，四阶无源，有源 Chebyshev 低通滤波器的幅频响应基本吻合，从图 9 的幅频响应可以看出，通过调节 MOS 管的栅极电压进而改变 MOS 管有源电阻阻值，实现得到了 1dB 波纹，频率范围为 20kHz~420kHz 的 Chebyshev 低通滤波器，其调节值范围在起始频率的 20 倍以上，而此时滤波器的性质完全没有得到改变。

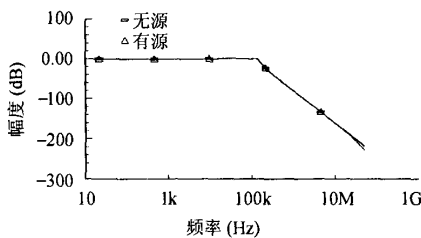


图 8 四阶无源及有源 Chebyshev 低通滤波器幅频响应

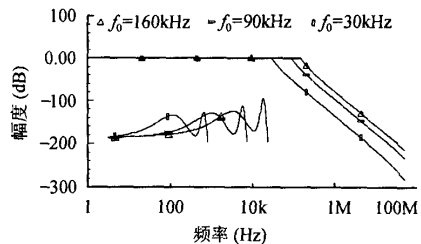


图 9 截止频率连续调节有源四阶 Chebyshev 滤波器的幅频响应

表 1 所测量得到的四阶 Chebyshev 低通滤波器芯片特性

工艺	0.5 μm , 2P2M, CMOS 工艺
滤波器类型	四阶 R-MOSFET-C 运放 Chebyshev 低通滤波器
-3dB 频率	138kHz
频率调节范围	20kHz~420kHz
通带波纹	1dB
通带增益	0dB
总谐波失真 (THD)($f_{in} = 100\text{kHz}$)	< -65dB
电源电压抑制比 (PSRR)	-104dB
芯片面积	0.36mm ²
电源电压	5.0V
功耗	16mW

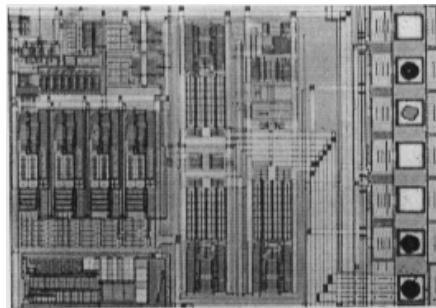


图 10 四阶 Chebyshev 低通滤波器的芯片照片图

7 结论

本文提出了同时具备有电压、电流共模负反馈的全差分运算放大器, 分析了其增加带宽, 稳定工作点的原理。利用 MOS 管工作在线性区可作有源电阻用, 并且通过调节 MOS 管栅极的电压值实现改变其有源电阻阻值的特性, 设计得到了截止频率可以在 30kHz~420kHz 范围内连续调节的 R-MOSFET-C 运放结构的全差分四阶 Chebyshev 低通滤波器。对制造的滤波器芯片进行了测试及分析, 实际测得的有源滤波器的幅频响应与其相应的无源滤波器的幅频响应基本吻合。各项实测指标完全满足设计要求。电路中 PMOS 管有源电阻的应用可以进一步降低滤波器的 $1/f$ 噪声。将此电路应用于通信电路芯片, 具有极其广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Yang Fuji, Enz C C. A low-distortion BICMOS seventh-order Bessel filter operating at 2.5V supply. *IEEE J. of Solid-State Circuits*, 1996, 31(3): 321-330.
- [2] Chang Zhong-Yuan, Haspelagh D, Verfaille J. A highly linear CMOS G_m -C bandpass filter with on-chip frequency tuning. *IEEE J. of Solid-State Circuits*, 1997, 32(3): 388-397.
- [3] Chang Zhong-Yuan, et al.. A CMOS analog front-end circuit for FDM-based ADSL system. *IEEE J. of Solid-state Circuits*, 1995, 30(12): 1449-1456.
- [4] Khoury J M. Design of 15-MHz CMOS continuous-time filter with on-chip tuning. *IEEE J. of Solid-State Circuits*, 1991, 26(12): 1988-1997.
- [5] Groenewold G. Low-power MOSFET-C 120MHz Bessel filter with on-chip tuning. *IEE Proc.-Circuits, Devices, Syst*, 2000, 147(2): 28-34.
- [6] Schmid H P, Moschytz G S. Active-MOSFET-C single amplifier biquadratic filters for video frequencies. *IEE Proc.-Circuits. Devices Syst*, 2000, 147(2): 35-41.

- [7] Silva-Martinez J, Steyaert M, Sansen W. A 10.7 MHz 68 dB SNR CMOS continuous-time filter with on-chip tuning. *IEEE J. of Solid-States Circuits*, 1992, 27(12): 1843-1852.
- [8] Hollman T, Lindfors S, et al.. A 2.7-V CMOS dual-mode baseband filter for PDC and WCDMA. *IEEE J. Solid-state Circuits*, 2001, 36(7): 1148-1153.
- [9] Wu J, El-Marsy E. Current-mode ladder filters using multiple output current conveyors. *IEE Proc. Circuit, Devices, Syst*, 1996, 143(4): 218-222.
- [10] Un-Ku Moon, Bang-sup Song. Design of low-distortion 22kHz fifth-order Bessel filter. *IEEE J. of Solid-State Circuits*, 1993, 28(12): 1254-1264.
- [11] 赵录怀, 邱关源. 用对数域电流模式积分器实现的高频集成滤波器. *电路与系统学报*, 1996, 1(3): 32-37.
- [12] 赵录怀, 邱关源. 一种新型电流模式连续时间波有源滤波器. *电子学报*, 1997, 25(4): 108-110.
- [13] 赵录怀, 邱关源. 电流模式高阶滤波器设计的递推方法. *电子科学学刊*, 1997, 19(3): 424-427.
- [14] 石文孝, 韩庆全. 基于多输出差动差分电流传递器跳耦结构滤波器. *通信学报*, 2000, 21(2): 30-35.
- [15] 江金光, 何怡刚, 吴杰. 基于电流传递器的椭圆函数滤波器设计. *电路与系统学报*, 2000, 1(5): 32-37.
- [16] 何怡刚, 江金光, 吴杰. 通用有源电流模式滤波器. *电子学报*, 1999, 27(11): 21-23.

江金光: 男, 1969年生, 博士, 研究方向为信号处理、低电压 / 低功率模拟集成电路设计等.

何怡刚: 男, 1966年生, 博士, 教授, 博士生导师, 目前主要从事模拟集成电路、滤波器、故障诊断等领域的研究工作, 在国内外重要学术刊物和国际学术会议上发表论文 160 多篇, 其中 48 篇论文被《SCI》, 《EI》, 《ISTP》收录, 主持完成了 14 项具有国际先进水平的重大科研课题.

吴 杰: 男, 1957年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电路理论的研究工作.