

多输出端电流模式全差分积分器实现带通滤波器的方法及仿真¹

江金光 何怡刚

(湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082)

摘 要: 该文提出了利用低电压多输出端电流模式全差分积分器 (MCDI) 设计实现连续时间电流模式滤波器的方法。分析并模拟了 MCDI 及所提出的滤波器的特性, 应用 3.3V, 0.5 μ m, CMOS 工艺参数仿真得到的二阶带通滤波器功耗仅为 0.6mW 左右, 且其中心频率可在很宽的范围内调控。此外, 这种滤波器还具有结构简单、对称性好、失真小等优点, 适于全集成。

关键词: 全差分式, 低电压、低功耗, 电流模式积分器, 连续时间滤波器

中图分类号: TN713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2003)12-1725-04

Realization and Simulation of Band-Pass Filter Based on MCDI

Jiang Jin-guang He Yi-gang

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

Abstract A methodology to realize continuous-time current-mode filters using low-voltage Multi-output Current-mode Differential Integrator (MCDI) is presented. At first, the characteristics of MCDI and the proposed filters which employ MCDI are analyzed and simulated. Simulation results not only predict second-order band-pass filter dissipating as little as 0.6mW power or so with 3.3V power supply using 0.5 μ m CMOS technology, while the center frequency of which can be tuning in a wide range, but also with the advantages such as simple structure, good symmetry, low harmonic distortion, and suitable for integration.

Key words Fully differential, Low voltage low power, Current-mode integrator, Continuous-time filter

1 引言

近年来连续时间滤波器以其在视频信号处理芯片及通信电路芯片等集成电路中的成功应用而受到了电路与系统学界的高度重视。电流模式电路技术, 包括连续时间采样数据信号处理, 被认为能提供更优良的电路性能, 引起了学术界的广泛注意。电流模式连续时间滤波器的研究已成为电路与系统学界的热门课题。本文在文献 [1] 的基础上提出了采用电流镜复制技术实现多输出端电流模式全差分积分器 (Multi-output Current-mode Differential Integrator, MCDI) 的方案, 其中积分器的输入级采用 NMOS 管, 在管子尺寸及漏电流相等的前提下, 与 PMOS 管相比, NMOS 管具有跨导较大, 速度更快的特点。分析了该积分器的各项特性, 并用此积分器构成了二阶带通全差分连续时间电流模式滤波器, 对所提出的电路进行了理论分析及计算机模拟仿真。结果表明, 本文所提出的 MCDI 与滤波器方案, 不仅具有低电压、低功耗的特点, 而且还具有电路结构简单、对称性好、失真小等优点, 适于全集成。

2 MCDI 及其 CMOS 电路

全差分电流模式积分器是有源梯形滤波器的基本积木块, 所采用的积分器的特性将直接影响到所设计的滤波器的各项特性。本文在文献 [1] 的基础上将输出与输入交叉联结, 并采用电流

¹ 2002-07-25 收到, 2002-12-23 改回

国家自然科学基金 (No.50277010) 和湖南大学精英计划资助课题

镜复制技术实现了 MCDI. 具有 n 对输出端的 MCDI 电路符号如图 1 所示, 其中 I_{ip} , I_{in} 分别为全差分正、反相电流输入信号, $I_{op1} \sim I_{opN}$ 分别为 MCDI 的 N 个同相电流输出, $I_{on1} \sim I_{onN}$ 分别为 MCDI 的 N 个反相电流输出.

MCDI 的 CMOS 电路实现原理如图 2 所示.

根据图 1 所示的 MCDI 的 CMOS 电路实现原理, 我们设计了具有 n 对输出端的 MCDI 的 MOS 管级实现电路 (其中 MOS 管的沟道宽长比 (W/L) 见表 1), 如图 2 所示.

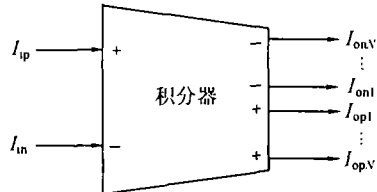


图 1 MCDI 电路符号

表 1 MCDI 的 MOS 管沟道宽长 (W/L) 数据																
MOS 管	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
W/L	10/5								20/5							

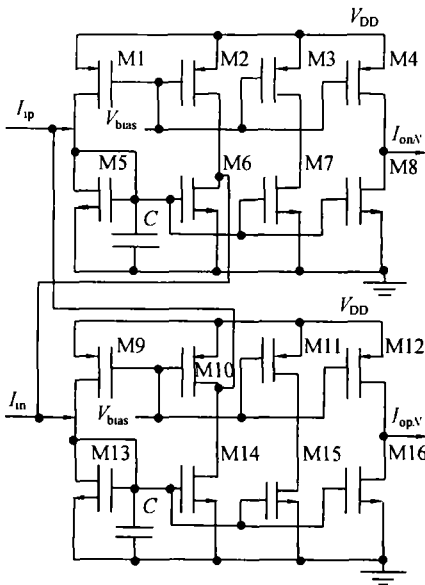


图 2 MCDI 的 CMOS 电路

MCDI 电路中电容值的大小可根据所设计的滤波器进行确定, 且须满足: $C1 = C2 = C$.

3 MCDI 及其电路分析

MCDI 的二阶交流小信号分析: 由于 MCDI 为全差分对称结构, 为了简化电路计算可取其中的一半电路进行二阶交流小信号分析, MCDI 的二阶交流小信号模型分析电路如图 3 所示.

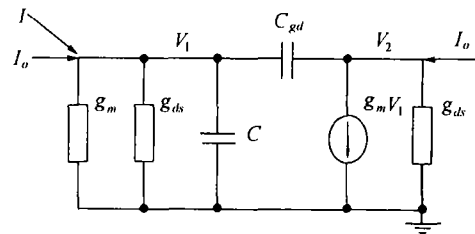


图 3 MCDI 的二阶交流小信号模型分析电路

由图 3 可得到如下方程:

$$[g_m + g_{ds} + S(C + C_{gd})]V_1 - SC_{gd}V_2 = I + I_o \quad (1)$$

$$-SC_{gd}V_1 + (g_{ds} + SC_{gd})V_2 = -g_m V_1 - (-I_o) \quad (2)$$

$$V_1 = -V_2 = V \quad (3)$$

可得到:

$$\frac{I_o}{I} = \frac{g_m - g_{ds} - S \cdot 2C_{gd}}{2g_{ds} + S(4C_{gd} + C)} \quad (4)$$

对 MCDI 的工作点进行分析, 由于其中的 MOS 管均工作在饱和区, 其偏置电流的大小可由下式决定:

$$I_{bias} = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (5)$$

其中 μ_n 为 MOS 管的沟道表面迁移率 ($\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$), C_{OX} 为氧化区单位面积电容 (F/cm^2), W/L 为 MOS 管的沟道宽长比, 其跨导 g_m 值可表示如下:

$$g_m = \sqrt{2\mu_n C_{\text{OX}}(W/L)I_{\text{bias}}} \quad (6)$$

可见 MOS 管跨导 g_m 值可通过改变管子沟道的宽长比 (W/L) 及偏置电流 (I_{bias}) 得到调节。

4 全差分二阶带通滤波器的设计及仿真

为了验证上述所提出的 MCDI 的有效性, 用 MCDI 设计了差分式电流模式二阶带通滤波器, 图 4 为基于 MCDI 的二阶带通滤波器原理电路。

设积分器 1 的跨导值为 g_{m1} , 积分器 2 的跨导值为 g_{m2} , 由原理图可得到如下方程:

$$I_{\text{op2}} - I_{\text{on2}} = [g_{m2}/(SC_2)](I_{\text{op}} - I_{\text{on}}) \quad (7)$$

$$[(I_{\text{ip}} + I_{\text{on}} + I_{\text{on2}}) - (I_{\text{in}} + I_{\text{op}} + I_{\text{op2}})][g_{m1}/(SC_1)] = I_{\text{op}} - I_{\text{on}} \quad (8)$$

从而得到

$$\frac{I_{\text{op}} - I_{\text{on}}}{I_{\text{ip}} - I_{\text{in}}} = \frac{SC_2 g_{m1}}{S^2 C_1 C_2 + SC_2 g_{m1} + g_{m1} g_{m2}} \quad (9)$$

由 MCDI 所设计得到的滤波器通过改变 MCDI 的偏置电流可连续调节所设计的滤波器的截止频率, 由于整个电路中均未采用无源电阻, 可较好地克服集成电路制造过程中因电阻的绝对值做不准而导致滤波器截止频率偏差较大的缺点。

设计一中心频率连续可调的二阶带通滤波器。要求:

- (1) 滤波器的中心频率在 750kHz~2MHz 可连续调节。
- (2) 滤波器通带内的增益值为 0dB。

所采用的 MCDI 的 MOS 管尺寸如表 1 所示。应用 3.3V, 0.5 μm , CMOS 工艺参数对基于 MCDI 的二阶带通滤波器进行 Spice 仿真, 可得到中心频率连续可调的滤波器的幅频特性曲线如图 5 所示, 滤波器中心频率的调节可通过改变 MCDI 的偏置电流得以实现。

从图 5 可见, 由 MCDI 设计得到的滤波器的频响曲线基本理想, 由于其总谐波失真 (THD) 较大 (-50dB), 可采用对 MCDI 进行补偿的方式提高 THD 的指标, 基于 MCDI 的二阶带通滤波器仿真结果如表 2 所示。

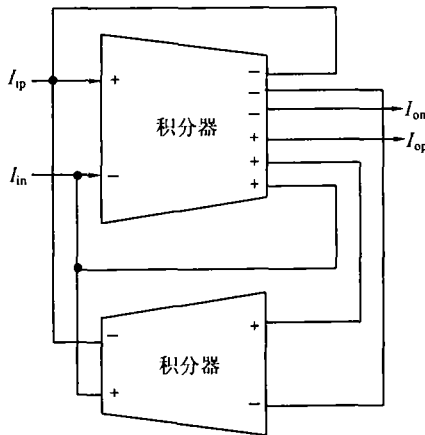


图 4 基于 MCDI 的二阶带通滤波器原理图

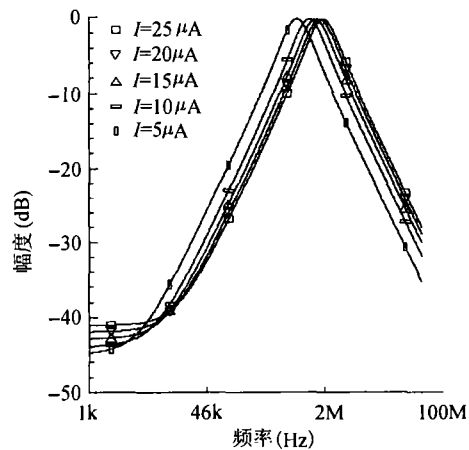


图 5 基于 MCDI 的二阶带通滤波器的幅频特性曲线

表 2 基于 MCDI 的二阶带通滤波器仿真结果

工艺	0.5 μ m, CMOS 工艺
滤波器类型	二阶带通滤波器
中心频率	1.216MHz
频率调节范围	750kHz~2MHz
总谐波失真 (THD)($f_0 = 1.216\text{MHz}$)	-50dB
电源电压	3.3V
电源电压抑制比	小于 -97dB
功耗 ($I_{\text{bias}} = 10\mu\text{A}$)	0.58mW

5 结论

理论分析和计算机仿真表明, MCDI 是滤波器设计中性能较好的积分器, 应用该模块可综合得到任意类型的有源滤波器^[2-15], 通过调节 MCDI 的偏置电流可以极为方便地调节二阶带通滤波器的中心频率, 避免了集成电路制造过程中绝对电阻值做不准所带来的不便。低电压、差分式全平衡结构 MCDI 的应用, 不仅使滤波器在 3.3V 电源电压下工作时具有低功耗的特点, 而且还能有效地抑制偶次谐波, 使滤波器具有低失真的特点, 电路中 NMOS 管积分器的应用, 使得滤波器电路还具有速度高的优点。

参 考 文 献

- [1] Lee Sang-soo, Zele R H, Allstot D J, Guojin Liang. A continuous-time current-mode integrator. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, 1991, 38(10): 1236-1238.
- [2] Wu J, EI-Marsy E. Current-mode ladder filters using multiple output current conveyors. *IEE Proc. Circuits, Devices. Syst.* 1996, 143(4): 218-222.
- [3] Tsvividis Y P. Integrated continuous-time filter design—An overview. *IEEE J. of Solid-State Circuits*, 1994, 29(3): 166-176.
- [4] Lee Sang-soo, Zele R H, Allstot D J, Guojin Liang. CMOS continuous-time current-mode filters for high-frequency applications. *IEEE J. of Solid-State Circuits*, 1993, 28(3): 323-329.
- [5] Zele R H, Allstot D J, Fiez T S. Fully balanced CMOS current-mode circuits. *IEEE J. of Solid-State Circuits*, 1993, 28(5): 569-575.
- [6] Zele R H, Allstot D J. Low-voltage fully differential switched-current filters. *IEEE J. of Solid-State Circuits*, 1994, 29(3): 203-209.
- [7] Fiez T S, Allstot D J. CMOS switch-current ladder filters. *IEEE J. of Solid-State Circuits*, 1990, 25(6): 1360-1367.
- [8] Khoury J M. Design of a 15-MHz CMOS continuous-time filter with on-chip tuning. *IEEE J. of Solid-State Circuits*, 1991, 26(12): 1988-1997.
- [9] Un-Ku Moon, Bang-Sup Song. Design of low-distortion 22-kHz fifth-order Bessel filter. *IEEE J. of Solid-State Circuits*, 1993, 28(12): 1254-1264.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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, 13(3): 424-427.
- [13] 石文孝, 韩庆全. 基于多输出差动差分电流传送器跳耦结构滤波器. *通信学报*, 2000, 21(2): 30-35.
- [14] 江金光, 何怡刚, 吴杰. 基于电流传送器的椭圆函数滤波器设计. *电路与系统学报*, 2000, 1(5): 32-37.
- [15] 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, 博士生, 研究方向为信号处理、低电压低功耗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 150 多篇, 其中 38 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。