

研究简报

单片集成 CMOS 二阶 OTA-C 连续时间模拟滤波器

赵玉山 秦世才 贾香鸾

(天津大学自动化系) (南开大学电子科学系, 天津)

1987年9月14日收到, 1988年10月30日修改定稿

以本文提出的电流提升运算跨导放大器(以下简称 OTA)作有源器件, 采用3微米P阱CMOS工艺制成了全集成二阶 OTA-C 连续时间模拟滤波器。测试结果表明: 该滤波器的中心频率(带通)可由片外电信号调节, 其可调范围从18千赫至160千赫; 滤波器具有恒定 Q 值, 且其值决定于两个MOS电容值之比; 当输入1伏峰值的正弦信号时, 输出信号的总谐波失真(THD)不大于0.36%; 选用合适的信号输入端, 该滤波器还可以实现低通、带通、高通和带阻四种传递函数。

主题词: MOS 集成电路, 集成滤波器, 运算放大器

一、引言

由运算跨导放大器和MOS电容构成的连续时间模拟滤波器(以下简称 OTA-C 滤波器)是一种新型的可集成滤波器。与开关电容滤波器、MOSFET-C^W等集成滤波器比较, OTA-C 滤波器具有下列特点: 第一, 这种滤波器不需要对模拟信号在离散时间进行采样处理, 其中的有源器件也不是通常的运算(电压)放大器, 而是跨导放大器 OTA。由于 OTA 内部电路不需要提供电压增益, 没有高阻抗节点, 消除了密勒电容效应的影响, 因此 OTA 具有比通常型运放好得多的高频特性, 再加上它采用连续时间的工作方式, 使 OTA-C 滤波器具有良好的高频特性; 第二, OTA-C 滤波器的性能参数是由 OTA 的跨导增益 g_m 和 MOS 电容比值决定的, 而不是由 RC 乘积决定的。由于 OTA 的增益 g_m 可用电压(或电流)信号去调节, 所以用外部电信号去控制滤波器芯片的片内性能, 构成可编程滤波器是可能的; 第三, OTA-C 滤波器电路元件少, 结构简单, 单片集成时可以节省芯片面积。早期双极型 OTA 及其应用电路的主要缺点是允许的输入信号范围太窄(20—30毫伏)。但是, 近年来对MOS型OTA及OTA-C滤波器的研究在改善输入信号范围、提高线性度方面已经取得显著进展^[2,3,4]。

本文提出一种改善其传输特性线性范围的 OTA 结构——CMOS 电流提升 OTA, 并将其用于单片集成 OTA-C 滤波器的设计。

二、CMOS 型电流提升 OTA

CMOS 电流提升 OTA 的电路如图 1 所示, 它由一个差分输入级和七个电流镜组成。图中 M_1 和 M_2 构成差分输入级; 电流镜 A_1 (由 M_{15} 、 M_{16} 构成) 将外加偏置电流 I_b 注入差分级作尾电流 I_{ss} ; 电流镜 $A_2(M_8, M_9, M_{13})$ 、 $A_3(M_{10}, M_7)$ 和 $A_4(M_1, M_{12})$ 将差动输出电流变为单端输出电流; 电流镜 $A_5(M_{10}, M_{11})$ 、 $A_6(M_3, M_4, M_{14})$ 和 $A_7(M_5, M_6)$ 构成电流提升电路。

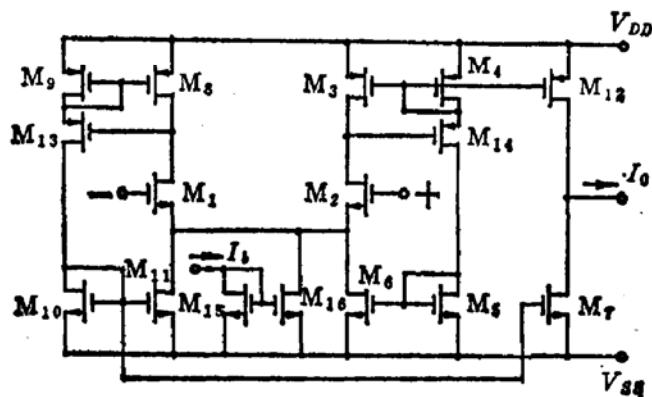


图 1 电流提升 OTA 电路图

简单差分级的差动输出电流与差动输入电压之间有下列关系:

$$I_o = \sqrt{KI_{ss}} V_i \sqrt{1 - \frac{KV_i^2}{2I_{ss}}} \quad (1)$$

式中 K 是由差分管的几何尺寸和工艺参数决定的跨导参数; I_{ss} 是尾电流。最大输入电压范围为 $\pm \sqrt{I_{ss}/K}$ 。

电流提升电路从差分管的输出电流中取样, 经提升之后又馈送到差分对的尾电流上, 使实质的尾电流是外控偏置电流的 n 倍, 这里 n 是电流提升系数。因此, 与不带电流提升的基本 OTA 相比, 该 OTA 具有下列特点:

1. 最大输入电压范围扩大为基本 OTA 的 \sqrt{n} 倍, 因而对于给定的非线性误差, 输入范围也扩大为 \sqrt{n} 倍;
2. 差分级和 OTA 的跨导被提高为基本电路的 \sqrt{n} 倍;
3. 转换速率和 -3 分贝带宽均得到相应提高。

电流提升系数 n 是设计电流提升 OTA 的重要参数。设电路中所有晶体管都是增强型的并且都工作于饱和区, 其伏安特性都满足理想的平方关系式; 差分对管和电流镜也都是理想匹配的, 则不难推导电流提升系数与提升电路晶体管的 W/L 尺寸之间的关系式如下:

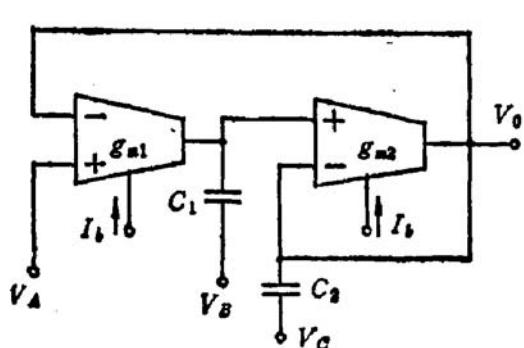
$$n = \left[1 - \frac{(W_4/L_4)(W_6/L_6)}{(W_3/L_3)(W_5/L_5)} \right]^{-1} \quad (2)$$

对电流提升 OTA 的一个设计实例进行了 SPICE 程序模拟, 所用 MOS 管的模型

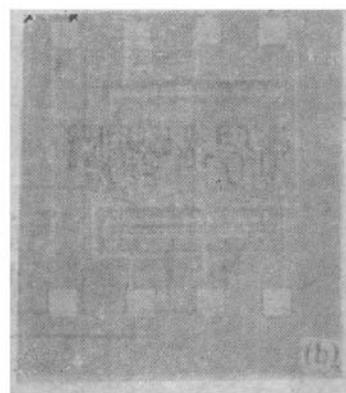
参数是由一个 3 微米 CMOS 工艺提取的第二类模型参数。随后用该工艺作出了样管。在±5 伏电源电压下, 实测出各种特性曲线。所得结果表明, SPICE 模拟、实测数据与理论分析相符甚好。

三、二阶 OTA-C 滤波器

以电流提升 OTA 作有源器件, 可构成如图 2(a) 所示的二阶滤波器电路。它由两个 OTA 和两个 MOS 电容组成, 其特点是带宽 ω_0 可调; Q 值恒定; 选用合适的信号输入端可实现低通、带通、高通和带阻四种传递函数^[2]。



(a) 原理电路图



(b) 芯片的显微照片

图 2 二阶 OTA-C 滤波器

采用 3 微米 CMOS 工艺制出了上述滤波器的芯片。其中的 MOS 电容采用双层多晶硅工艺, C_1 和 C_2 的设计值分别为 10 pF 和 20 pF; 两个 OTA 的参数完全相同, OTA 中各晶体管的几何尺寸如表 1 所列。整个滤波器包括压焊点的芯片总面积为 1013×854 (微米)²。图 2(b) 所示为滤波器芯片的显微照片。

表 1 OTA 中的晶体管尺寸表

晶体管编号	W/L (微米/微米)
M_1, M_2	8/16
M_3, M_4, M_5 M_6, M_{13}, M_{14}	50/10
M_7, M_{10}	20/10
M_8, M_{11}	18/10
M_9	44/10
M_{12}	50/10
M_{15}, M_{16}	100/10

上述滤波器输出电压 V_o 的表达式如下:

$$V_o = \frac{S^2 C_1 C_2 V_C + S C_1 g_{m2} V_B + g_{m1} g_{m2} V_A}{S^2 C_1 C_2 + S C_1 g_{m2} + g_{m1} g_{m2}} \quad (3)$$

当输入信号为下面四种接法时，

$$1, V_A = V_i, V_B = V_C = 0;$$

$$2, V_B = V_i, V_A = V_C = 0;$$

$$3, V_C = V_i, V_B = V_A = 0;$$

$$4, V_A = V_C = V_i, V_B = 0,$$

滤波器分别具有低通、带通、高通和带阻特性。当 $g_{m1} = g_{m2} = g_m$ 时，上述四种型式的 ω_0 和 Q 值为

$$\omega_0 = g_m / \sqrt{C_1 C_2} \quad (4)$$

$$Q = \sqrt{C_2 / C_1} \quad (5)$$

式(4)和(5)表明这种滤波器的两个特点。首先，滤波器的截止(中心)频率 ω_0 和跨导 g_m 成正比，调节 OTA 的外控偏置电流 I_b 可以在很宽的范围内调节 g_m 以及 ω_0 ；其次，滤波器的 Q 值取决于两个 MOS 电容值之比，这个比值可以在单片集成中保持较高的精度，而且 ω_0 值的调节不影响 Q 值。

在 ±5 伏电源电压下，对滤波器的特性进行了测试。图 3(a) 所示为相应于 6 个不同偏置电流值的带通接法幅频特性曲线，输入信号的幅值为 224 毫伏 (0 dBm)。从图中看出，带通滤波中心频率的可调范围约为从 18 千赫至 160 千赫，所对应 OTA g_m 的变化范围从 1.69 微安/伏至 15.07 微安/伏，每个 OTA 偏值电流的调节范围从 2.4 微安至 100 微安。

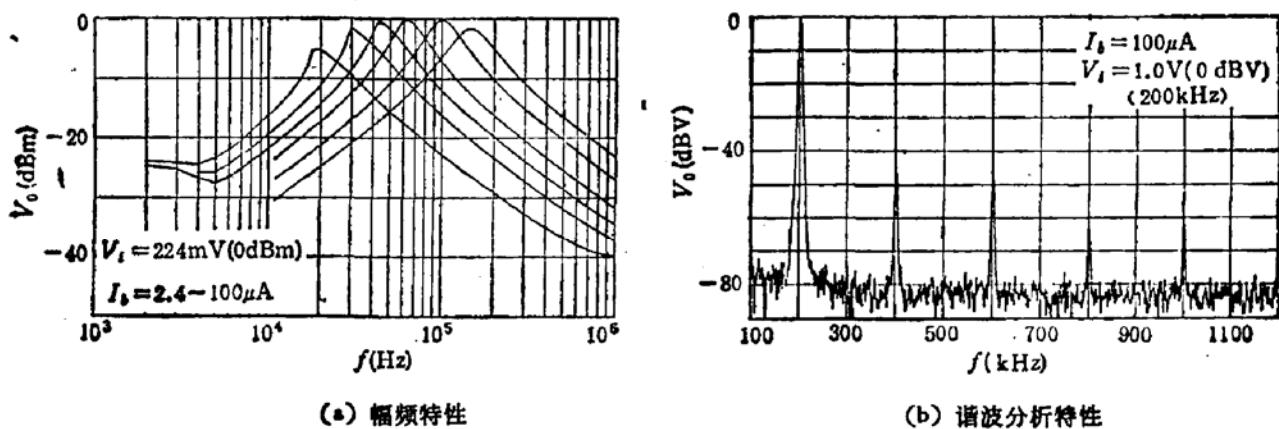


图 3 二阶 OTA-C 滤波器的实测特性

图 3(b) 所示为偏置电流 $I_b = 100$ 微安、高通接法时输出端谐波失真分析的实测曲线。这时滤波器的截止频率为 100 千赫，输入信号是频率 200 千赫、幅值 1 伏 (0 dBV) 的正弦波。图中曲线给出了输出电压中基波和多次谐波的幅值。由计算可得输出电压的总谐波失真 (THD) 约为 0.36%。

四、结 论

本文简述了 OTA-C 连续时间滤波器的特点；给出了一个二阶 OTA-C 滤波器的设

计实例，并以 CMOS 工艺制出了全集成的滤波器芯片；滤波器以电流提升 OTA 为有源器件，扩大了输入信号范围；实验得到带通滤波时中心频率的可调范围为 18 千赫至 160 千赫；高通接法时，对通带范围内幅度 1 伏的信号，其输出电压的总谐波失真不大于 0.36%。以上结果证实：OTA-C 连续时间滤波器是一种易于实现单片集成、具有较好高频特性，而且片内特性可由片外信号控制的滤波器。

参 考 文 献

- [1] Y. Tsividis, M. Banu and J. Khouri, *IEEE J. Solid-State Circuits*, SC-21, 25(1986).
- [2] R. L. Geiger and E. Sanchez-Sinencio, *IEEE Circuits and Devices magazine*, 1, 20(1985).
- [3] A. P. Nedungadi and R. L. Geiger, *Electronics Letters*, 22, 729(1986).
- [4] C. S. Park and R. Schaumann, Proc. ISCAS, 754—757(1987).

Monolithic CMOS Second-order OTA-C Continuous-time Analog Filter

Zhao Yushan

(Department of Automation eng. Tianjin University)

Qin Shicai and Jia Xiangluan

(Department of Electronics Science Nankai University, Tianjin)

Abstract

A new structure of CMOS Operational Transconductance Amplifier (OTA) with current booster is proposed. The OTA is used to build a fully integrated continuous-time filter. A second-order OTA-C continuous-time filter is fabricated by using a standard 3 μm p-well CMOS process. The measured characteristics and performance of the fabricated filter are reported.

KEY WORDS : MOS Integrated Circuits, Integrated Filters, Operational Amplifiers