

# 基于新型可调谐高线性 OTA 的高阶滤波器设计

刘 政, 王卫东

(桂林电子工业学院, 广西壮族自治区桂林市 541004)

**摘 要:** 基于交叉耦合的原理提出了一种高线性可调谐的 OTA(跨导运算放大器), 并以它为基本部件设计了一个巴特沃思(Butterworth)七阶滤波器。OTA 的增益可以通过调节独立外接电源进行控制。基于新型 OTA 的高阶滤波器电路结构简单, 无源器件接地, 容易集成。

**关键词:** 模拟集成电路; 跨导运算放大器; 巴特沃思滤波器

**中图分类号:** TN713

## 0 引 言

近年来, 连续时间滤波器在集成电路领域取得较大的发展, MOSFET-C 滤波器、RC 有源滤波器和 OTA(跨导运算放大器)-C 滤波器相继出现。OTA-C 滤波器具有容易设计、电路简单、便于集成、参数可调等优点, 因而受到了学术界的重视。

国内外学者提出了很多新的 OTA-C 滤波器设计方法和应用典型<sup>[1-3]</sup>, 但是由于 OTA 存在传输特性的线性范围小的特点, 于是提高 OTA 的传输范围成了当前工作的热点<sup>[4-5]</sup>。

本文根据交叉耦合原理提出了一种新型可调谐高线性 OTA, 它具有良好的线性, 并且外接独立电源可调, 再以提出的 OTA 为基本部件, 设计出一个巴特沃思(Butterworth)七阶滤波器, 最后给出了计算机仿真结果。

## 1 交叉耦合原理

图 1 所示为一种交叉耦合差分跨导放大器。

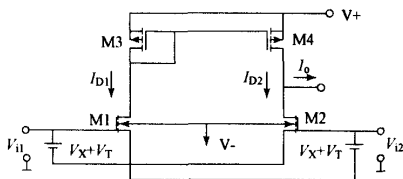


图 1 交叉耦合跨导放大级

晶体管 M1、M2 不是由源极直接耦合, 而是通过恒定电压源  $V_x + V_T$  交叉耦合, 即 M1、M2 的源极分别经辅助电压源耦合到另一管的栅极; 晶体管 M3、M4 组成 P 沟道电流镜, 它们的作用是提供单端输出电流。

设晶体管 M1、M2 的参数完全匹配, 它们的跨导参数为:  $K_1 = K_2 = K$ ; 阈值电压为:  $V_{T1} = V_{T2} = V_T$ 。晶体管 M1、M2、M3、M4 均工作在饱和区, 则晶体管 M1、M2 的漏极饱和电流分别为:

$$I_{D1} = K(V_{GS1} - V_T)^2 = K(V_x + V_{id})^2 \quad (1)$$

$$I_{D2} = K(V_{GS2} - V_T)^2 = K(V_x - V_{id})^2 \quad (2)$$

式中:  $V_{id}$  为差模输入电压,  $V_{id} = V_{i1} - V_{i2}$ 。

晶体管 M3、M4 组成 P 沟道电流镜, 作为 M1、M2 的负载, 提供单端输出电流, 其电流表达式为:

$$I_0 = I_{D1} - I_{D2}$$

由式(1)和式(2)可得输出电流及跨导增益表达式为:

$$I_0 = 4KV_x V_{id} = G_m V_{id} \quad (3)$$

$$G_m = 4KV_x \quad (4)$$

式(4)表明: 交叉耦合跨导放大级的传输特性具有理想线性关系; 跨导增益为常数, 其值大小可由辅助电压  $V_x$  加以控制, 因而可利用交叉耦合原理来实现跨导控制, 提出高线性可调谐 OTA 的启发点就在这里。

## 2 高线性可调谐 OTA

本文根据交叉耦合原理提出的 OTA 如图 2 所示。

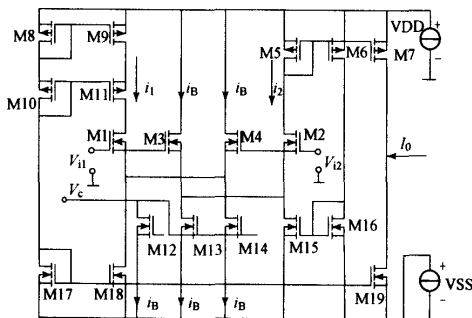


图 2 新型 OTA

收稿日期: 2006-01-06。

基金项目: 广西壮族自治区自然科学基金(D200111)

取  $V_{DD}$  为 +5 V,  $V_{SS}$  为 -5 V, M1、M2 组成输入差分对; M3、M4 组成辅助差分对, 其栅-源电压作为图 1 中的辅助电压源起交叉耦合作用; M8、M9、M10、M11、M17、M18、M19 构成电流镜, 把  $i_1$  复制到输出端; M5、M6、M7、M15、M16 构成一组电流镜, 把  $i_2$  复制到输出端。因此, 有  $i_0 = i_2 - i_1$ 。

对于 M3 来说, 它实际替代了图 1 中右边电压源的作用, 有

$$V_{GS3} = V_X + V_T \quad (5)$$

由于 M3 工作在饱和状态, 有

$$i_B = K(V_{GS3} - V_T)^2 \quad (6)$$

由式(5)和式(6)有:

$$V_{GS3} = \left( \frac{i_B}{K} \right)^{1/2} + V_T = V_X + V_T \quad (7)$$

由式(7)可知,  $V_X$  可以通过调节偏置电流  $i_B$  来进行调节, 而  $i_B$  同样可以通过调节外接独立电压源  $V_C$  来进行调节。

各 MOS 管的宽长比尺寸如下: M1、M2 为 20  $\mu\text{m}/40 \mu\text{m}$ , M3、M4 为 40  $\mu\text{m}/40 \mu\text{m}$ , M5 ~ M11、M17、M18、M19 为 30  $\mu\text{m}/1 \mu\text{m}$ , M12、M13、M14 为 40  $\mu\text{m}/10 \mu\text{m}$ 。

### 3 滤波器实现举例

为了验证本文所提出的新型 OTA 的性能, 本文设计了一个基于新型 OTA 的 Butterworth 七阶滤波器, 因为 Butterworth 滤波器用全极点函数逼近理想低通特性, 传输函数的分子不含  $s$  项, 如下式所示:

$$H(s) = \frac{b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_1s + a_0} \quad (8)$$

而七阶低通去归一化 Butterworth 滤波器的传输函数为:

$$H(s) = \omega_0 [(s + \omega_0)(s^2 + 0.445\omega_0s + \omega_0^2) \cdot (s^2 + 1.247\omega_0s + \omega_0^2) \cdot (s^2 + 1.802\omega_0s + \omega_0^2)]^{-1} \quad (9)$$

本文采用一个一阶滤波器并联 3 个二阶滤波器来构成七阶滤波器, 如图 3 所示。

把 7 个 OTA 取相同的  $g_m$  值, 在图 2 中取外接电源  $V_C$  为 0 V, 这样得到 OTA 的  $g_m$  为 62.8  $\mu\text{S}$ , 取  $C_1 = 10 \text{ pF}$ ,  $C_2 = 4.5 \text{ pF}$ ,  $C_3 = 22.5 \text{ pF}$ ,  $C_4 = 12.5 \text{ pF}$ ,  $C_5 = 8 \text{ pF}$ ,  $C_6 = 18 \text{ pF}$ ,  $C_7 = 5.6 \text{ pF}$ 。

通过 PSPICE 仿真, 验证设计的结果是正确的。七阶滤波器幅频特性曲线见图 4。

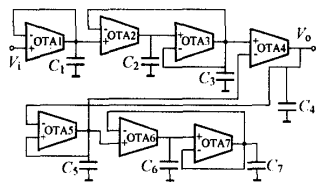


图 3 七阶 Butterworth 低通滤波器

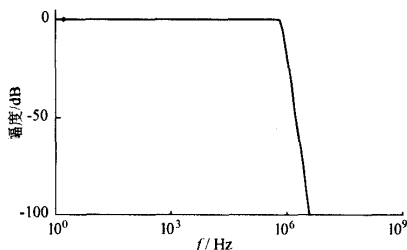


图 4 七阶 Butterworth 滤波器幅频特性曲线

### 4 结束语

本文利用交叉耦合的原理提出了一种新型的高线性可调谐的 OTA, 并以它为基本部件设计了 Butterworth 七阶滤波器, 从 PSPICE 仿真结果可以看出滤波器具有良好的幅频特性, 从而验证了 OTA 的特性。

### 参考文献

- [1] ALI M I, HOWE M, SANCHEZ-SINENCID E, et al. A BiCMOS low distortion tunable OTA for continuous-time filters [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I, 1993, 40(1): 43-49.
- [2] GLINIANOWICA J, JAKUSZ J, SZCZEPANSKI S, et al. High-frequency two-input CMOS OTA for continuous-time filter applications [J]. IEE Proceedings—Circuits, Devices and Systems, 2000, 147(1): 13-18.
- [3] Tsividis Y P. Integrated continuous-time filter design: an overview [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1994, 29(3): 166-176.
- [4] 刘弘, 董在望. 一种可调高线性度跨导器 [J]. 电子学报, 2002, 30(9): 1282-1284.
- [5] KOZIEL S, SZCZEPANSKI S. Design of highly linear tunable CMOS OTA for continuous-time filters [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems II, 2002, 49(2): 110-122.

(下转第 43 页)

来自 AD8313 的直流电平信号加到运放 TL741 的反向输入端。运放的正向输入端接标准电平,该电平的值可以通过拨码开关来调整。与拨码开关相连的 4 个阻值不同的电阻可以使该标准电平有 16 种不同的值,大大提高了系统的应用灵活性。TL741 在本电路中用做电压比较器。运放的输出电压加到 74LS04 上,经缓冲、反相后,一路直接加到四缓冲器 74LS244 上,一路又经非门再次反相后加到另一个缓冲器,从两组缓冲器输出的信号分别加到相应的 PIN 二极管上。为监视双工器的工作状态,在电路中设置了 LED 指示灯,处于接收状态时,指示灯长亮。正常工作时,指示灯闪烁。

### 3 结束语

设计制作的双工器电路经调试,开关速度快,隔离

效果好,已成功应用于局域网通信系统。

### 参 考 文 献

- [1] 周月臣. 微波电路[M]. 北京:北京邮电学院出版社, 1992.
- [2] 夏守轩. 微带电路制造[J]. 电光系统, 2000(3):55-60.
- [3] 沃除森. 微波半导体器件及其应用[M]. 上海无线电十七厂、上海无线电二十六厂,译. 上海:上海人民出版社, 1975.
- [4] WHITE J F. 微波半导体控制电路[M]. 王曙光,黎安尧,译. 北京:科学出版社,1983.
- [5] 李嗣范. 微波元件原理与设计[M]. 北京:人民邮电出版社,1982.

## Design and Implementation of the Duplexer of Digital Signals at 2.4 GHz

ZHANG Ting<sup>1</sup>, LIU Peiguo<sup>1</sup>, LI Gaosheng<sup>1</sup>, WANG Baoshun<sup>2</sup>

(1. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Troop 69046, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** This paper presents a system design scheme for the IEEE 802.11 WLAN duplexer; giving suggestions on chips selection; on the basis of the above, the design and implementation of the duplexer, which includes the switching circuit and control circuit are introduced in detail. Using PIN diodes as control components, the duplexer has advantages of low power of controlling, high control speed, and small in dimension as well as light in weight. The duplexer discussed in this paper has been applied to Wireless Local Area Network, and excellent effect has been achieved.

**Keywords:** WLAN; microwave control circuit; receive & transmit switch

(上接第40页)

## Design of a High Order Filter Based on Novel Tunable High Linearity OTA

LIU Zheng, WANG Weidong

(Guilin Institute of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** This paper proposes a high linearity tunable OTA based on cross-coupling principle, and then a Butterworth seventh order filter is designed. The gain of OTA could be controlled by an independent voltage source. The filter based on OTA has simple structure, and all passive elements are grounded and the filter is easy to realize.

**Keywords:** analog integrated circuits; OTA; Butterworth filter

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>