

# 群时延精确设计的全差分四阶 Bessel 滤波器

何怡刚, 江金光, 吴 杰

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082)

**摘 要:** 采用 MOS 管有源电阻, 提出了一种全差分 R-MOSFET-C 四阶 Bessel 有源低通滤波器, 通过调节工作于亚阈值区的 CMOS 管的沟道导纳补偿电阻值的大小, 能抵消集成电路制造工艺中电阻值的一致偏差, 实现 Bessel 有源滤波器群时延的精确设计. 根据无源滤波器的状态方程完成有源滤波器的综合, 应用 3.3V, 0.5 $\mu\text{m}$  CMOS 工艺完成了群时延大小为 0.75 $\mu\text{s}$  的四阶 Bessel 低通滤波器的管极计算机仿真, 仿真结果表明所提电路正确有效, 适于全集成.

**关键词:** 差分式; 有源滤波器; 群时延; 低电压低功耗电路

**中图分类号:** TN713 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 02-0249-03

## Fully Differential 4th-order Bessel Filter Accurately Designed with Group Delay

HE Yi-gang, JIANG Jin-guang, WU Jie

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** This paper presents a fully differential R-MOSFET-C 4th-order Bessel active low-pass filter with group delay adjusted by tuning the channel transconductance of CMOS transistors worked in weak inversion region. The tuning can counteract the deviation of resistor in the manufacture of integrated circuit, therefore the group delay of Bessel active filter can be designed and realized accurately. The active filter can be synthesized according to the state equation of passive filter. Computer simulation of 4th-order Bessel low-pass filter with 0.75 $\mu\text{s}$  group delay indicate that the proposed circuits are both effective using 3.3V, 0.5 $\mu\text{m}$  CMOS technology, and suitable for integration.

**Key words:** fully differential; active filter; group delay; low-voltage low power circuits

### 1 引言

近年来, 全集成连续时间滤波器的研究受到电路与系统学术界的高度重视, 并在通信电路, 如 ADSL, GSM 基带 I/O 芯片等集成电路中得到了成功的应用<sup>[1~10]</sup>, 通常有源滤波器的设计可以采用 RC-运放结构, Gmr-C 结构等, 但所设计的 RC-运放结构的滤波器截止频率不易调节, 而且在集成电路制造工艺中如果出现电阻的一致性偏差, 很难使该滤波器的截止频率得到准确设计; Gmr-C 结构的有源滤波器的截止频率可以通过改变跨导运放  $G_m$  的值进行调节, 但由于跨导运算放大器工作在开环状态, 线性输入范围小, 实际应用受到一些限制.

本文给出了一种全差分 R-MOSFET-C 有源 Bessel 滤波器实现方法, 通过改变 MOS 管栅极电压值的大小, 实现有源电阻阻值的改变, 从而可以抵消集成电路制造工艺中电阻值的一致偏差, 实现 Bessel 有源滤波器群时延的精确设计. 全差分结构的滤波器设计可以较好地抑制滤波器的共模分量, 从而使其具有低失真的特性. 由于该有源滤波器的设计是通过无源网络直接转换得到, 因而, 该方法可以应用于各种类型滤波器的设计. 采用 3.3V 电源电压、0.5 $\mu\text{m}$  CMOS 工艺所设计得到

群时延值为 0.75 $\mu\text{s}$  的 R-MOSFET-C 四阶 Bessel 低通滤波器经仿真验证, 表明该滤波器的群时延值能通过调节有源 MOS 管栅极电压值得到精确设计. 同时, 该电路还具有低电压、低功耗的优点.

### 2 差分式运算放大器与 R-MOSFET-C 积分器

运算放大器是连续时间滤波器的核心有源器件. 图 1 是

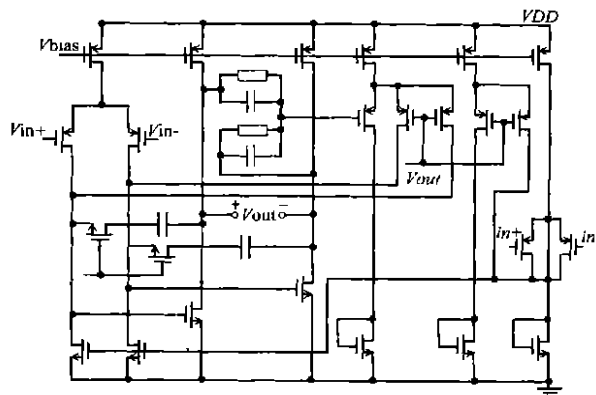


图 1 全差分运算放大器原理电路

收稿日期: 2000-10-10; 修回日期: 2001-05-21

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目 (No. 99090); 教育部《高等学校骨干教师资助计划》项目 (教技司 (2000) 65 号文)

本文提出的一种全差分运算放大器的 CMOS 原理电路。

图 1 是具有共模负反馈电路的全差分运放, 由于共模负反馈电路的引入, 稳定了运算放大器的工作点。图示运放工作时电源电压大小为 3.3V, 共模电压为 1.65V, 仿真得到的开环幅频及相频特性如图 2 所示。由图 2 可见, 此运放的直流增益达 80dB, 相位裕度 80°, 单位增益带宽 30MHz。

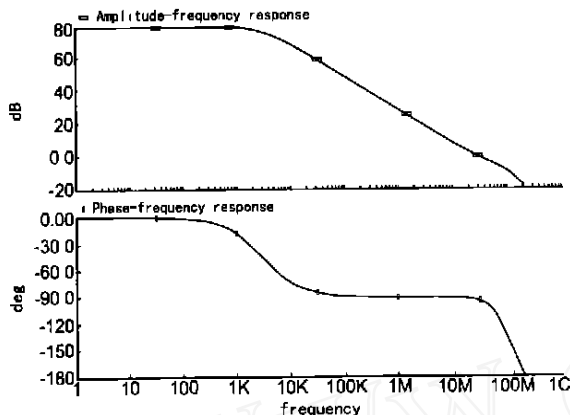


图 2 全差分运算放大器的幅频相频特性曲线

文献[1]中所提出的 R-MOSFET 可变电阻, 利用 MOS 管工作在线性区, 作有源电阻用, 通过控制 MOS 管电阻网络的栅极电压差, 改变 MOS 管有源电阻的阻值, 从而达到精确设计滤波器的目的。通常的 MOS 管有源电阻只是在某一小电压范围内保持线性的小信号电阻, 其线性度的改进在于减少可变电阻的非线性, 加在 MOS 管上的电压必须是在它的线性工作范围内精确可调, 增加了设计难度。本文中所设计的有源电阻网络的等效电阻与其控制电压成比例关系, 能将多个输入信号简单相加, 具备高线性性能, 因而应用该有源电阻网络能设计出低失真、群时延值精确的 Bessel 滤波器。

图 3 为由 R-MOSFET、全差分运放以及反馈电容所构成的低失真 R-MOSFET-C 积分器原理图。

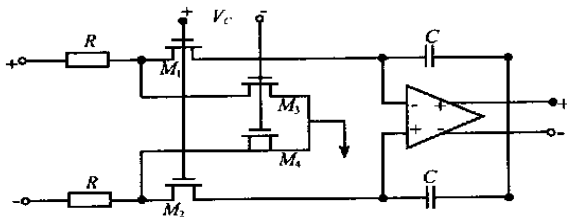


图 3 R-MOSFET-C 全差分积分器

经分析由图 3 所得到的单位增益线性可控频率为:

$$= \frac{G_{1,2} - G_{3,4}}{FC} = \frac{KV_C}{FC} \quad (1)$$

式中:  $F = 1 + 2\bar{G}R$ ,  $\bar{G} = \frac{G_{1,2} + G_{3,4}}{2}$ ,  $K = \mu C_{ox} \frac{W}{L}$ ,  $G_{1,2}$  为 MOS 管  $M_1, M_2$  的沟道电导值;  $G_{3,4}$  为 MOS 管  $M_3, M_4$  的沟道电导值。

由该积分器所设计得到的滤波器由于采用了有源电阻网络及运放, 会对其拓扑结构稍微有些改变, 但能改善滤波器的噪声性能。

### 3 全差分滤波器的综合及设计

设计全差分有源滤波器, 首先需设计无源网络, 根据无源网络列写电路的状态方程, 再由状态方程转换成全差分有源滤波器。下面以四阶低通滤波器为例说明其设计方法。

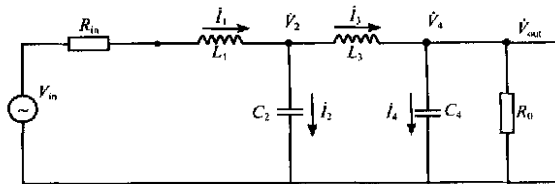


图 4 四阶无源低通滤波器

由图 4 电路可得到如下状态方程:

$$\dot{V}_1 = I_1 R = \frac{1}{1 + S \frac{L_1}{R}} (\dot{V}_{in} - \dot{V}_2) \quad (2)$$

$$\dot{V}_2 = (I_1 - I_3) \cdot \frac{1}{SC_2} = \frac{1}{SC_2 R} (\dot{V}_1 - \dot{V}_3) \quad (3)$$

$$\dot{V}_3 = I_3 R = \frac{1}{SL_3/R} (\dot{V}_2 - \dot{V}_4) \quad (4)$$

$$\dot{V}_{out} = \frac{\dot{V}_3}{1 + SC_4 R} \quad (5)$$

式(2)~(5)中,  $R_{in} = R_0 = R$ ,  $\dot{V}_1, \dot{V}_3$  均为中间变量。相应的四阶全差分有源滤波器的结构如图 5 示。

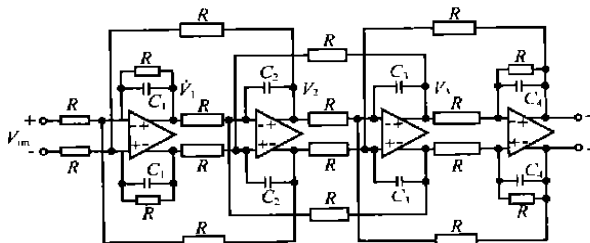


图 5 四阶全差分有源低通滤波器

显然图 5 电路方程为:

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{1 + SC_1 R} (\dot{V}_i - \dot{V}_2) \quad (6)$$

$$\dot{V}_2 = \frac{1}{SC_2 R} (\dot{V}_1 - \dot{V}_3) \quad (7)$$

$$\dot{V}_3 = \frac{1}{SC_3 R} (\dot{V}_2 - \dot{V}_0) \quad (8)$$

$$\dot{V}_0 = \frac{1}{1 + SC_4 R} \dot{V}_3 \quad (9)$$

从图 4、图 5 两组电路方程的一一对应性可见无源网络可以直接转换成有源网络。

### 4 四阶全差分群时延为 0.75μs Bessel 低通滤波器的精确设计及仿真

要求: 通带增益为 0dB, 群时延值为 0.75μs 的四阶低通 Bessel 滤波器。

首先用无源网络实现, 由四阶 Bessel 滤波器的四个极点得到通带增益为 0dB 的四阶 Bessel 传输函数

$$H(s) = \frac{105}{s^4 + 10s^3 + 45s^2 + 105s + 105}$$

令  $s = j$  有:

$$H(j) = \frac{105}{j^4 - 45j^2 + 105 + (-10j^2 + 105)j}$$

$$\frac{105}{\sqrt{(j^4 - 45j^2 + 105)^2 + (-10j^2 + 105)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

解上式得:  $\omega = 2.114$

$$T_0 = 0.75\mu s \quad \text{则} \quad \omega_0 = 1.3333 \times 10^6 \text{ rad/s, 取 } R_0 = 10^5,$$

则有

$$Lr = \frac{10^5}{2.114 \times 1.3333 \times 10^6} = 0.035477767 \text{ H}$$

$$Cr = \frac{1}{2.114 \times 1.3333 \times 10^6 \times 10^5} = 3.5477767 \times 10^{-12} \text{ F}$$

$$L_1 = L_1 \times Lr = 5.32592 \times 10^{-2} \text{ H}, C_2 = C_2 \times Cr = 3.47008 \times 10^{-12} \text{ F}$$

$$L_3 = L_3 \times Lr = 2.17372 \times 10^{-2} \text{ H}, C_4 = C_4 \times Cr = 0.75 \times 10^{-12} \text{ F}$$

具体电路如图 6 所示:

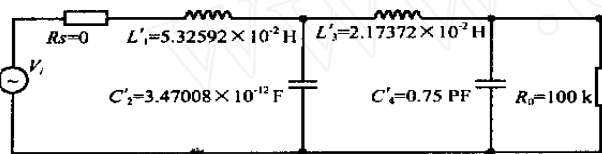


图 6 群时延为  $0.75\mu s$  的四阶低通 Bessel 滤波器

依据其无源原型网络图 6 所设计得到的 R-MOSFET-C 四阶低通 Bessel 滤波器(参见图 5)关键元件参数值为:  $R = 100k$ ,  $C_1 = 5.32592 \times 10^{-12} \text{ F}$ ,  $C_2 = 3.47008 \times 10^{-12} \text{ F}$ ,  $C_3 = 2.17372 \times 10^{-12} \text{ F}$ ,  $C_4 = 0.75 \times 10^{-12} \text{ F}$

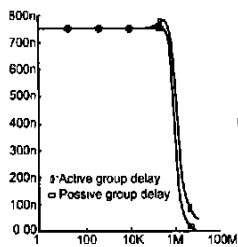


图 7  $0.75\mu s$  理想与实际  
四阶 Bessel 滤波器  
群时延

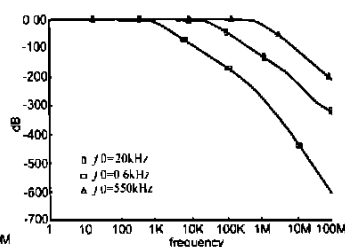


图 8  $0.75\mu s$  群时延四阶 Bessel  
滤波器频率响应(截频分别  
为  $0.6\text{ kHz}$ ,  $20\text{ kHz}$  和  $550\text{ kHz}$ )

我们已经完成了全差分四阶 Bessel 有源低通滤波器  $0.5\mu\text{m}$  CMOS 工艺流片, 芯片面积  $0.32\text{mm}^2$ , 在  $3.3\text{V}$  工作电源下功耗为  $13.3\text{mW}$ (比 Hspice 仿真结果  $23\text{mW}$  还低), 仿真与测试均表明所设计的 Bessel 有源滤波器具有精确的  $0.75\mu s$  群时延(参见图 7)。另外, 实际测试还得到了其它重要性能: 频率调节范围宽 ( $0.6\text{ kHz} \sim 550\text{ kHz}$ , 参见图 8); 通带内增益变化小 ( $< 0.01\text{ dB}$ ); 当截止频率小于  $500\text{ kHz}$  时, 群时延偏差小于  $< 25\text{ ns}$ ; 谐波失真小(如  $\text{THD} < -55\text{ dB}$  ( $100\text{ kHz}$ ,  $V_{in} < 2V_{pp}$ ));  $\text{CMRR} > 60\text{ dB}$ ;  $\text{PSRR}(\text{DC})$  高, 对正电源为  $80\text{ dB}$ , 对负电源为  $90\text{ dB}$ (仿真结果  $145\text{ dB}$ )。

## 5 结论

本文提出了一种全差分 R-MOSFET-C 四阶 Bessel 有源低通滤波器, 其群时延值的大小可以通过小范围调节有源 MOS 管的阻值得到精确设计。全差分有源 MOS 管电阻网络的应用不仅能使电路得到精确调节, 而且还具有低失真的特点, 低电压运放的应用使得该滤波器能工作在低电压、低功耗状态, 适于全集成。

## 参考文献:

- [1] Goenewold G. Low-power MOSFET-C 120MHz Bessel allpass filter with extended tuning range [J]. IEE Proceedings circuits Devices syst., February 2000, 147(1): 28 - 34.
- [2] Schmid H P, Moschytz G S. Active-MOSFET-C single-amplifier bi-quadratic filters for Video frequencies [J]. IEE Proceedings. -circuits Devices syst. February 2000, 147(1): 35 - 41.
- [3] Khokry J M. Design of a 15-MHz CMOS continuous-time filter with on-chip tuning [J]. IEEE J. solid-state circuits, December 1991, 26(12): 1988 - 1997.
- [4] Fuji Y, Christian C. A low-distortion BiCMOS seventh-order Bessel filter operating at 2.5V supply [J]. IEEE J. solid-state circuits march 1996, 31(3): 321 - 330.
- [5] 何怡刚, 江金光, 吴杰, 蔡国昌. 通用有源电流模式滤波器 [J]. 电子学报, 1999, 27(11): 21 - 23.
- [6] 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 [J]. 电路与系统学报, 2000, 5(1): 34 - 37.
- [7] 何怡刚. n 阶传输函数的 CC 实现 [J]. 电子科学学刊, 1998, 20(5): 716 - 720.
- [8] 何怡刚. 线性变换有源 CC 滤波器的实现 [J]. 电路与系统学报, 1998, 3(2): 98 - 103.
- [9] 何怡刚, 吴杰, 蔡国昌. 基于积分器的最少元件 GILF OTA 接地电容滤波器 [J]. 电路与系统学报, 1997, 2(4): 22 - 27.
- [10] 何怡刚. 基于 MOCC 的电流模式连续时间滤波器 [J]. 通信学报, 2000, 2(3): 88 - 91.

## 作者简介:



何怡刚 男, 1966 年 12 月生于湖南. 博士, 教授, 博导, 在多个学术组织兼职. 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 120 余篇, 其中 16 篇论文被 SCI、EI、ISTP 收录, 主持完成多项具国际先进水平的重大科研课题。



江金光 男, 1969 年生于湖南株洲. 1998 年在湖南大学获电工理论与新技术硕士学位, 现在湖南大学电气与信息工程学院攻读攻读博士学位. 研究方向为信号处理, 低电压低功耗模拟集成电路设计等. 已在通信学报, 电子学报等学术刊物上发表论文 10 余篇。

吴杰 教授, 博导, 主要从事电路理论及其应用研究工作。