

开关电阻对 SC 放大器速度的影响和优化方法

梁伟伟, 阴亚东, 阎跃鹏

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 在开关电容(SC)放大器中, 由于 MOS 开关导通电阻的存在, 会对其建立速度产生影响. 首先使用跨导运算放大器的一阶线性模型推导了包含开关导通电阻的开关电容放大器的闭环传输函数, 通过分析极点和零点的分布, 研究了放大器中不同位置开关的导通电阻对阶跃响应的影响. 进而提出了一种 MOS 开关的优化设计方法来缩短放大器阶跃响应的建立时间. 最后使用电路仿真工具验证了该方法的有效性.

关键词: 开关电容放大器; MOS 开关; 建立时间; 阶跃响应

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)04-0025-04

Effects of Switch Resistances and Optimization Method on the Speed of SC Amplifier

LIANG Wei-wei, YIN Ya-dong, YAN Yue-peng

(The Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The settling speed of switched-capacitor (SC) Amplifier is affected by the resistances of MOS switches. The closed loop transfer function of SC Amplifier with switch resistances is deduced using one-pole linear model of OTA. By analyzing the positions of poles and zeroes, the effects of switch resistances in two positions on step response are re-searched. An optimization method of MOS switches in practical design is proposed to decrease the settling time of SC Amplifier's step response. This method is verified by the simulation results.

Key words: switched-capacitor amplifier; MOS switches; settling time; step response

1 引言

开关电容(SC)放大器^[1-2]由 MOS 开关, 电容和跨导运算放大器(OTA)构成, 具有良好的工艺兼容性、精度、线性度和温度特性, 被广泛应用于标准 CMOS 工艺的模拟信号处理集成电路中. 如在流水线结构的 ADC 中, 核心的采样/保持/减法/增益模块(MDAC)^[3]就是由开关电容放大器来实现的, 其建立速度决定了流水线 ADC 的速度和精度.

在电容值确定时, 开关电容放大器的建立速度主要取决于 OTA 的带宽, 输出压摆率和寄生电容等^[4]. 同时由于 MOS 开关本身是非理想的, 导通时

存在一定阻值^[2], 因此会对开关电容放大器的建立速度产生影响. 在设计中应充分考虑开关导通电阻的影响, 通过对开关管进行合理设计来缩短建立时间.

2 开关电容放大器的工作原理

开关电容放大器由两相不交叠时钟 Φ_1 和 Φ_2 控制, 输入信号在 Φ_1 有效时被采样, 在 Φ_2 有效时被放大. 如图 1 所示, 在采样相, OTA 开环, 输入信号 V_{in} 对电容 C_s 进行充电, 实现信号采样, 且设采样结束时 C_s 的极板电压为 V_{in} ; 在放大相, OTA 与电容形成负反馈, 存储在 C_s 上的电荷逐渐转移到 C_f 上, 最

终产生输出信号 V_{out} . 在理想情况下 $V_{out} = V_{in}C_s/C_f$. 在输出信号的建立过程中, Φ_2 控制的开关存在导通电阻 R_{in} 和 R_{fb} , 从而影响了闭环系统的零极点分布, 对建立速度产生影响.

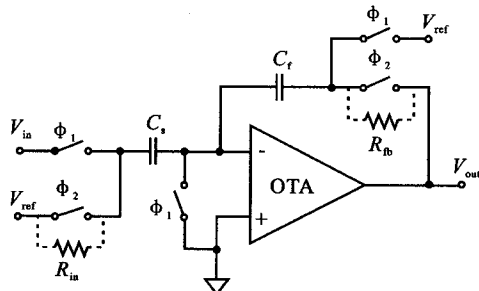


图1 开关电容放大器单端示意图

对于 MOS 开关而言, 其导通电阻可表示为^[2]

$$R_{on} \approx \frac{1}{C_{ox}\mu \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})} \quad (1)$$

可见, 开关管的宽长比越大, 导通电阻越小, 对反馈电路的影响也越小. 但是过大的宽长比会导致很大的 MOS 寄生电容, 带来不必要的电荷注入和时钟馈通. 因而, 有必要通过分析导通电阻对建立速度的影响来对开关管进行合理设计.

3 建立速度分析与优化方法

在开关电容放大器的典型应用中, 如流水线 ADC 的采样保持级和 MDAC 级, 通常采用单级共源共栅结构 OTA 并使用辅助放大器来提高增益^[5], 负载电容和跨导决定了 OTA 的带宽. 相对于负载电容, OTA 自身的寄生电容很小, 因而非主极点远大于单位增益带宽, 可近似为单极点系统. 因此可将图 1 中的 OTA 用一阶线性模型代替, 不考虑输入寄生电容的影响, 得到闭环小信号等效模型如图 2 所示, 其中 g_m 为 OTA 的跨导, R_o 为等效输出电阻, C_L 为负载电容, V_x 为 OTA 的输入端差分电压, 且假设 OTA 的直流增益 $g_m R_o$ 为无穷大^[6].

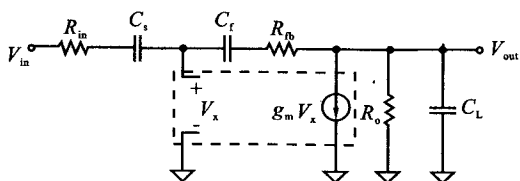


图2 开关电容放大器的闭环小信号等效模型

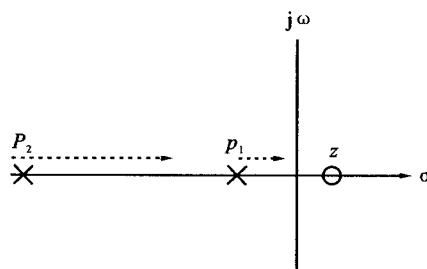
3.1 输入开关电阻的影响分析

为方便分析输入开关电阻 R_{in} 对建立速度的影响^[6], 令 $R_{fb} = 0$. 根据模型得到闭环传输函数为

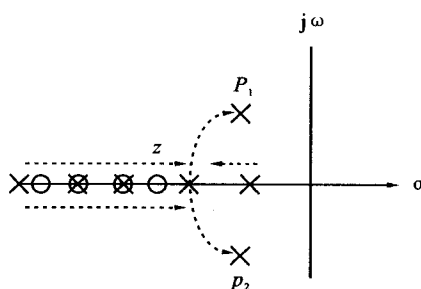
$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{C_s}{C_f} \cdot \frac{1 - s \cdot \frac{C_f}{g_m}}{1 + s \cdot (R_{in} \cdot C_s + \frac{A}{g_m}) + s^2 \frac{B \cdot R_{in}}{g_m}} \quad (2)$$

式中, $A = \frac{C_L \cdot C_s}{C_f} + C_s + C_L$, $B = C_s \cdot C_L$

在 R_{in} 变化时, 系统的根轨迹图如图 3(a) 所示. 可见, 当 $R_{in} = 0$ 时, 只存在一个左半平面的实极点 $p_1 = -g_m/A$, 反馈放大器为一阶系统; 当 $R_{in} > 0$ 时, 存在两个左半平面上的实极点. 阶跃响应单调上升, 不存在过冲和震荡, 系统为过阻尼状态^[7]. 随着 R_{in} 的不断增大, 两极点不断向原点移动, 从而降低了闭环系统的带宽, 使建立时间延长. 因此, 为了保证系统具有良好的建立特性, 应该使 R_{in} 的影响尽量小.



(a) 输入开关影响



(b) 反馈开关影响

图3 开关导通电阻影响的根轨迹图

3.2 反馈开关电阻的影响分析

为便于分析反馈开关电阻 R_{fb} 对系统建立时间的影响, 令 $R_{in} = 0$, 得到系统的闭环传输函数为

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{C_s}{C_f} \cdot \frac{1 + s \cdot C_f \cdot R_{fb} - \frac{1}{g_m}}{1 + s \cdot \frac{A}{g_m} + s^2 \frac{B \cdot R_{in}}{g_m}} \quad (3)$$

在 R_{fb} 变化时, 系统的根轨迹如图 3(b) 所示.

当 $R_{fb} = 0$ 时, 只存在一个左平面实极点 $p_1 = -g_m/A$, 反馈放大器为一阶系统;

当 $0 < R_{fb} < A^2/(4B \cdot g_m)$ 时,存在两个左平面上的实极点 p_1 和 p_2 ,系统处于过阻尼状态.随 R_{fb} 的增大,主极点 p_1 远离原点,非主极点 p_2 向原点靠近.零点在 $R_{fb} > 1/g_m$ 时出现在左半平面,且不断向原点靠近.当 $R_{fb} = (C_f + C_s)/(g_m \cdot C_f)$ 时,非主极点 p_2 与左平面零点 z 出现第一次重合并相互抵消.当 $R_{fb} = (C_f + C_L)/(g_m \cdot C_f)$ 时,非主极点与左平面零点出现第二次重合($C_L > C_s$).

若 R_{fb} 继续增大至符合以下条件:

$$R_{fb} = A^2/(4B \cdot g_m) \quad (4)$$

两极点在负实轴上重合, $p_1 = p_2 = -2g_m/A$,此时系统处于临界阻尼状态^[7],阶跃响应呈指数形式单调上升.由极点位置可知,此时系统带宽为 $R_{fb} = 0$ 时的二倍,因而建立时间比 $R_{fb} = 0$ 时缩短了50%.由此可知,通过适度的增加 R_{fb} 可使建立速度得到提升.

当 $R_{fb} > A^2/(4B \cdot g_m)$ 时, p_1, p_2 为左半平面上的共轭复极点.此时系统处于欠阻尼状态,阶跃响应中出现过冲和衰减震荡^[7],且 R_{fb} 越大,过冲越明显.理论上,当过冲的第一个峰值正好等于动态建立误差容限的电压上限时,系统具有最短的建立时间^[6].实际上,由于应用中存在信号条件,工艺角,供电电压和温度的变化,很难保证系统处于最快建立的欠阻尼状态.为了降低复杂度,使设计思路更加直观,本文近似认为临界阻尼响应是最优的建立响应.因此,在设计中应该通过优化反馈开关的尺寸,尽量使导通电阻阻值接近 $A^2/(4B \cdot g_m)$,使阶跃响应近似为临界阻尼状态.

3.3 系统分析与优化设计方法

以上分别分析了输入开关和反馈开关对建立速度的影响,若同时考虑这两种开关的影响,则系统传输函数为

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{C_s}{C_f} \cdot \frac{1 + s \cdot C_f \cdot (R_{fb} - \frac{1}{g_m})}{1 + s \cdot (R_{in} \cdot C_s + \frac{A}{g_m}) + s^2 \frac{B \cdot (R_{fb} + R_{in})}{g_m}} \quad (5)$$

若 $C_s = C_f$,则使阶跃响应处于临界阻尼状态条件的 R_{fb} 应为

$$R_{fb} = \frac{A^2}{4B \cdot g_m} + \frac{R_{in}^2 g_m C_s^2}{4B} + \frac{R_{in} C_s}{2C_L} \quad (6)$$

可见,相对于式(4),式(6)中多了两项.由于 R_{in} 的影响,在 $R_{in} = 0$ 时的临界阻尼响应此时变成

了过阻尼响应,建立时间延长.因此,为了使阶跃响应继续接近临界阻尼状态,需要根据 R_{in} 的阻值适当增大 R_{fb} .

考虑到开关管寄生电容的影响,仅仅通过增加输入开关管的宽长比来降低其对建立速度的影响是不切实际的.基于以上分析,提出开关电容放大器中MOS开关的优化设计方法如下:

(1) 合理选择输入开关管的宽长比,使其寄生电容的大小在电路允许的范围之内.

(2) 在输入开关管的宽长比确定后,根据式(1)计算其导通电阻 R_{in} .

(3) 将 R_{in} 代入式(6)中计算反馈开关的导通电阻 R_{fb} ,进而初步确定反馈开关管的合理宽长比.

(4) 根据前3步确定的参数进行电路仿真,通过进一步调整反馈开关的宽长比来使阶跃响应近似为临界阻尼响应.

4 仿真实验

为验证以上分析,基于SMIC 0.18 μ m混合信号CMOS工艺设计了开关电容放大器并对其阶跃响应进行了仿真.选取 $C_s = C_f = 1\text{pF}$, $C_L = 2\text{pF}$.采用全差分的带增益提高的折叠式共源共栅结构OTA,直流增益86dB,单位增益带宽398MHz,相位裕度79度,差分输入为10mV的阶跃信号.在不同开关导通电阻的配置下,得到10bit精度的建立时间如表1所示.

表1 不同开关导通电阻配置下的建立时间比较

序号	R_{in}/Ω	R_{fb}/Ω	建立时间/ns
A	0	0	6.38
B	0	660	3.56
C	0	900	4.01
D	300	660	5.56
E	300	790	4.59
F	300	900	5.08

表1对应的阶跃响应曲线如图4所示.其中,图4(a)是在 $R_{in} = 0$ 的条件下仿真得到的阶跃响应,当 $R_{fb} = 0$ 时,响应处于过阻尼状态,如曲线A所示.当 $R_{fb} = 660\Omega$ 时,响应近似为临界阻尼状态,如曲线B所示,此时建立时间仅为阻值全零时建立时间的55.8%,与分析得到的结果接近.当 $R_{fb} = 900\Omega$ 时,响应处于欠阻尼状态,出现明显的过冲,如曲线C所示,建立时间长于临界阻尼状态.图4(b)是在 $R_{in} = 300\Omega$ 时仿真得到的阶跃响应.由于 R_{in} 的影响,在 $R_{fb} = 660\Omega$ 时响应不再处于临界阻尼状态,而是

处在过阻尼状态,如曲线 D 所示.使用本文提出的方法将 R_b 优化至 790Ω 时,响应再次近似为临界阻尼状态,如曲线 E 所示.同时可发现,即使在 R_{in} 影响存在的情况下,由于优化后的 R_b 对阶跃响应的加速效果,其建立时间仍比阻值全零时的建立时间缩短了 28%.

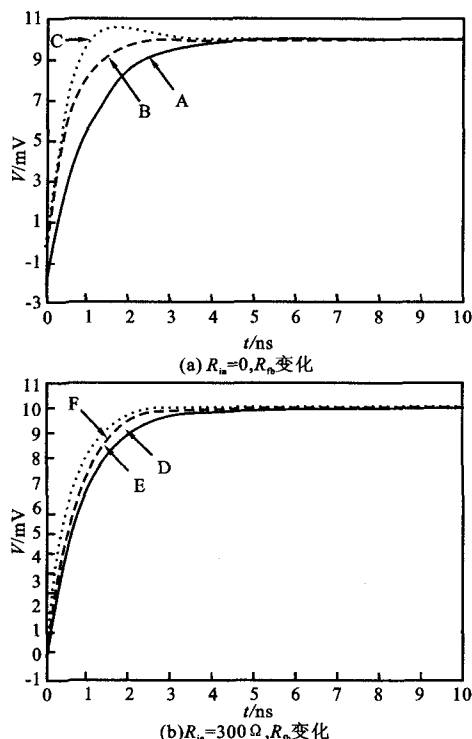


图 4 不同开关导通电阻配置下的阶跃响应

5 结束语

进行开关电容放大器的设计时,在确定了电容值和 OTA 参数后,需要对 MOS 开关进行必要的优

化.文中针对开关导通电阻对开关电容放大器建立速度的影响进行了建模和分析,提出了一种优化阶跃响应的开关设计方法.电路仿真结果表明,使用该方法对开关管进行合理设计,可以有效地改善开关电容放大器的阶跃响应,缩短建立时间.

参考文献:

- [1] Allen P E, Holberg D R. CMOS analog circuit design [M]. Oxford: Oxford University Press, 2002:511-520.
- [2] Razavi B. Design of analog CMOS integrated circuits [M]. New York: McGraw-Hill, 2001:330-351.
- [3] 骆冬根,黄鲁,胡新伟.一种模数转换器的采样保持/增益减法电路设计[J].微电子学与计算机,2005,22(10):54-57.
- [4] Wang F, Harjani F. Power analysis and optimal design of op amps for oversampled converters[J]. IEEE Trans. Circuit Sys II, 1999, 46(4):359-369.
- [5] 张凯,周贵贤,刘焯.12 位 100MS/s ADC 中采样/保持电路的分析与设计[J].微电子学与计算机,2007,24(11):8-13.
- [6] Yang H C, Allstot D J. Consideration for fast settling operational amplifiers [J]. IEEE Trans. Circuit Sys, 1990, 37(3):326-334.
- [7] 孙增圻.系统分析与控制[M].北京:清华大学出版社,1994:87-103.

作者简介:

梁伟伟 男(1983-),硕士研究生.研究方向为数模混合集成电路设计.

阴亚东 男(1981-),博士研究生.研究方向为模拟与射频集成电路设计.

阎跃鹏 男(1963-),研究员,博士生导师.研究方向为微波射频集成电路与系统.

(上接第 24 页)

- [5] 刘宁钟,杨静宇.综合利用目标区域颜色纹理特征的彩色图像检索[J].计算机工程与应用,2003,39(32):187-203.
- [6] Tan Kian-Lee, OoiBeng Chin, Yee Chia Yeow. An evaluation of color-spatial retrieval technique for large image database[J]. Multimedia Tools and Applications, 2002,14(1):55-78.

作者简介:

高燕 女,(1981-),硕士研究生,讲师.研究方向为图像处理与多媒体技术.

胡学龙 男,(1960-),教授.研究方向为图像处理与多媒体技术、现代数字信号处理等.

李玲 女,(1963-),高级工程师.研究方向为信号与信息处理.

丁宁 女,(1963-),副教授.研究方向为信号与信息处理.