

低压低功耗 CMOS 电流反馈运算放大器的设计

段晓峰,陈向东,黎文模

(西南交通大学 计算机与通信工程学院,四川 成都 610031)

摘要:电源电压的下降对模拟电路的设计是一个难题。如今模拟电路的典型电源电压大约是 2.5~3 V,但是发展的趋势表明电源电压将是 1.5 V,甚至更低。在这种情况下,国内外研究人员致力于设计适用于标准 CMOS 工艺的低压电路结构。主要在文献[1]基础上设计了一种新型的 CMOS 电流反馈运算放大器(CFOA),使用了 0.5 μm CMOS 工艺参数(阈值电压为 0.7 V),模拟结果获得了与增益关系不大的带宽。在 1.5 V 电源电压下产生了约 6.2 mW 的功耗。

关键词:低压低功耗;共模抑制比;电流反馈运算放大器(CFOA);电流模电路

中图分类号: TN432 **文献标识码:** A

0 引言

近几年来,个人数据处理和通信的迅猛发展,加上器件尺寸不断小型化,推动着 VLSI(超大规模集成电路)朝着低压低功耗技术方向发展。低压低功耗技术的应用可涉及任何携带能源有限的设备、仪器、表卡范围,诸如单兵通信机、IC 卡、笔记本电脑、航天飞机、卫星电子设备等。文献[1]描述了低电压状态下电压模式放大器的设计,但有一个明显的缺点就是随着被处理信号的频率越来越高,电压模式电路的固有缺点开始阻碍它在高频高速环境中的应用。这主要是由于闭环增益和闭环带宽的乘积是常数,当带宽向高频区扩展时增益按比例下降,在大信号下它的输出电压转换速率也很低。为了克服这些缺点,我们设计了低压状态下的电流反馈运算放大器(CFOA)。CFOA 被广泛应用在模拟信号处理中,比如模数转换(ADC)、滤波器以及许多其他的通信系统^[2]。CFOA 相对于电压反馈运算放大器的一个显著优点就是理论上无限制的转换速率和与增益设置关系不大的带宽^[3-5]。80 年代末期,基于互补双极工艺发展起来的 CFOA,从根本上改变了传统电压反馈运算放大器的电路结构,得到了极大的发展。但电源电压一般都是 5 V,功耗也比较大,但这一状况会随着 CMOS 工艺的成熟而得到解决。尽可能地降低模拟集成电路的电压和功耗是模拟集

成电路的发展趋势,已经受到国际上的广泛关注。

1 电路的描述

在高速高频电子领域中,运算器作为一个基本的电路单元得到广泛的应用,在本文中我们通过把把传输信号由电压改为电流而设计一种低压低功耗电流模式运算放大器。

文献[1]中的电路单位增益带宽比较低,又由于电压模式的带宽增益乘积为常数,因此在处理高频信号时,增益会变得很低。另外文献[1]中的转换速率也很低,不适合处理高速信号。该电路的这些特点严重地影响了电路对高频和高速信号的处理能力,当把电路中信号的传输由电压变为电流时,就可设计出稳定性良好,共模抑制比很高的 CFOA。同文献[6]中典型的 CMOS CFOA 相比,我们在中间级用反向放大器来提高电路的开环增益,相位余度用电容进行补偿,保障电路的稳定性。典型的 CMOS CFOA 的输出级是甲乙类互补射极输出单元,但由于输出阻抗太大而影响电路的动态性能,可以使用电阻反馈来减小输出阻抗以提高电路的动态指标。

图 1 为我们设计的 CFOA,从图 1 中可知,M1, M11 与 M2, M12 组成差分跨导放大器, M5, M6 与 M7, M8 为 2 个互补的电流镜,作用是和差分跨导放大器组成一个电流传输器,将反相输入端 V_{in} 的

* 收稿日期:2005-06-20 修订日期:2005-12-28

基金项目:国防科学重点实验室基金资助项目(00J S1143D20213)

作者简介:段晓峰(1982-),男,山西运城人,硕士研究生,研究方向为信号与信息处理、集成电路, E-mail: duanxiaofeng1117@163.com;陈向东,博士,教授。

信号电流传送到 Z 端,Z 端为电流传输器的高阻抗输出端。同时,Z 端还接有电容 C_3 ,利用 Z 端的高阻抗将 M11,M12 的不平衡电流转变为电压。M9,M10 是反相放大器,是基本的增益级。M13,M14 起转换电平的功能以及隔离输出级与中间放大级,防止输出级影响中间放大级的放大。M3,M4 和 R 组成输出级电路,R 是反馈电阻,主要起减小输出电阻的作用。M15,M16,M17,M18 对差分跨导放大器提供 $1\mu\text{A}$ 的偏置电流,并在电路中用电容 C_2,C_4 进行相位补偿。

显然,从反向输入端到 Z 端,中间线性传输的物理量是电流,而且电流变化的幅值在理论上没有限制,因此,这就是 CFOA 能获得高速特性的根本原因。

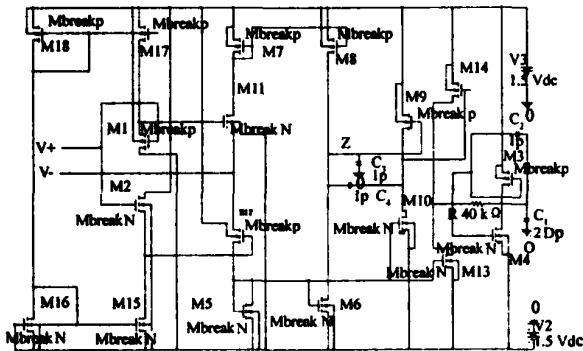


图 1 低压低功耗 CMOS 电流反馈运算放大器
Fig. 1 Low voltage and low power CMOS CFOA

2 小信号分析

图 1 输入级是跨导型差分放大器,它的差模电路半电路等效模型如图 2 所示,当差模信号 v_1 被输入时,输出电流 i_1 主要由 2 部分组成: M11 栅源电压改变以及 M11 源极电压的改变而产生的电流。

$$i_1 = v_1 \times (g_m + 1/r) \quad (1)$$

(1) 式中, g_m 代表 M11 的跨导, r 代表 M11 源极电阻。

全电路的差模跨导增益为

$$g_{Td} = i_1 / v_1 = 2g_m \quad (2)$$

图 1 的共模电路半电路等效模型如图 3 所示,当共模信号 v_2 被输入时,输出电流 i_2 主要由 2 部分组成: 由 M1 漏极电流的改变以及 M11 源极电阻的改变而产生的电流。

$$i_2 = -v_2(1/R_0 + 1/r) \quad (3)$$

全电路的共模跨导增益为

$$g_{Tc} = |i_2 / v_2| = 2(1/R_0 + 1/r) \quad (4)$$

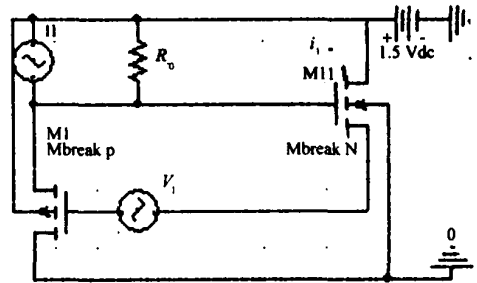


图 2 差模电路

Fig. 2 Different-mode circuit

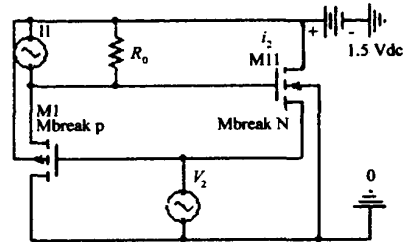


图 3 共模电路

Fig. 3 Common-mode circuit

由 (2) 式和 (4) 式可得到:

$$CMRR = g_{Td} / g_{Tc} = g_m / (1/R_0 + 1/r) \quad (5)$$

(3) 式、(4) 式和 (5) 式中的 R_0 为 M1 的源极电阻。

跨导放大器产生的电流通过电流镜传输到 Z 点,然后通过电容把电流转换为电压,反向器提高增益。反向器的小信号放大倍数为

$$A_1 = g_{m9} / (g_{ds10} + g_{ds9}) \quad (6)$$

最后通过输出缓冲级输出信号,输出电路使用推挽反向放大器通过电阻反馈来减小输出电阻。通过图 1 中 M3,M4,R(文献[7]),可推出小信号放大倍数为

$$A_2 = \sqrt[3]{(g_{m3} + g_{m4} + 1/R) / (g_{ds3} + g_{ds4} + 1/R)} \quad (7)$$

在 PSPICE 软件下,使用 $0.5\mu\text{m}$ CMOS 工艺参数,利用 MOS 管二级模型参数可得出图 1 的差模电路的增益与相位曲线,如图 4 所示。

从图 4 可以看出差模电路开环增益为 81 dB,相位余度为 87d,单位增益带宽为 95 MHz,显然电路满足稳定性要求。而文献[1]、文献[2]、文献[3]中的单位增益带宽分别为 1 MHz,2.2 MHz,5 MHz,文献[7]中的 CFOA 单位增益带宽为 20 MHz,可看出电路单位增益带宽有极大的提高。

共模电路的幅值曲线如图 5 所示,由图 5 可以看出共模电压增益为 -42 dB,由此可以得到 CMRR 为 123 dB,而文献[4]中 CFOA 的 CMRR 为

105 dB,因此电路具有极好的共模抑制比。

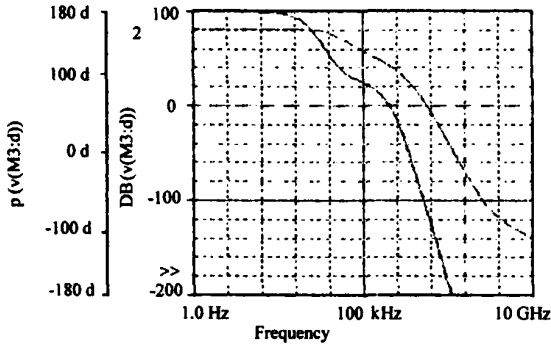


图 4 差模电路增益与相位曲线

Fig. 4 Different-mode circuit gain and phase graph

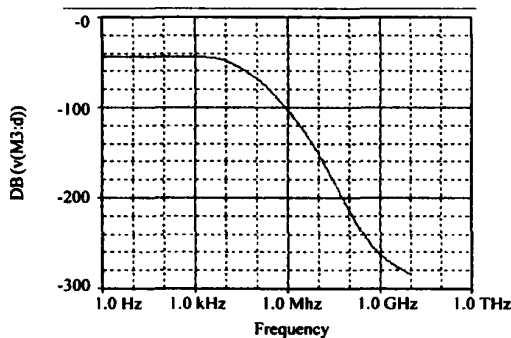


图 5 共模电路幅频曲线

Fig. 5 Common-mode circuit amplitude frequency graph

3 闭环特性分析

电流反馈运算放大器反相输入方式下的电路图如图 6 所示,同相输入方式下的电路图如图 7 所示。

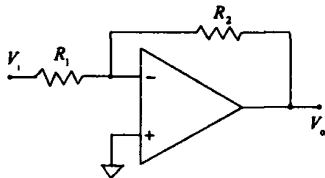


图 6 反向输入闭环电路

Fig. 6 Inverting input of closed-loop circuit

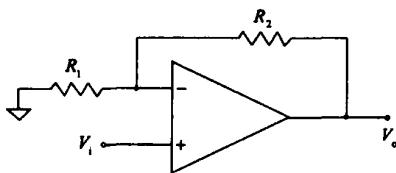
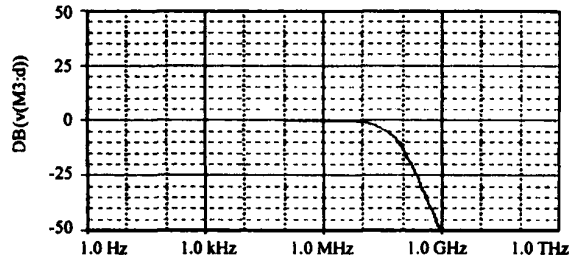


图 7 同向输入闭环电路

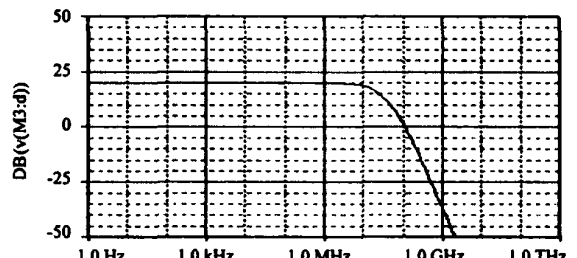
Fig. 7 Noninverting input of closed-loop circuit

根据图 1,图 6 的电路用 PSPICE 分析其反向闭环特性,得到幅频特性曲线,如图 8 所示。

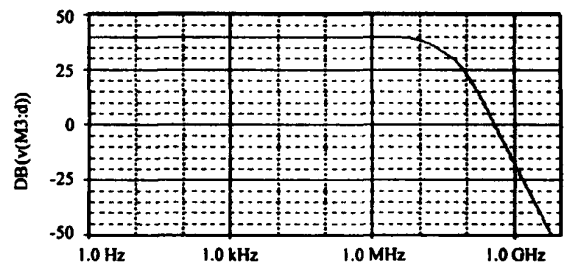
从图 8 可看出, $R_2 = 100 \text{ k}$, R_1 分别取 100 k , 10 k , 1 k 时的反相闭环增益分别为 0 dB , 20 dB , 40 dB , 而带宽约为 8 MHz , 而同相闭环增益与此类似, 说明电路设计基本合理, 体现了电流反馈运算放大器的主要特性: 带宽与增益设置关系不大。因此, 随着增益的提高, 而带宽基本保持不变, 可以通过调节电容以及 R_2 , 而使电路向高频区扩展而增益保持不变, 电路的这种特性可使电路广泛应用于音视频电路以及有限电视传输中。



a $R_1=100 \text{ k}\Omega, R_2=100 \text{ k}\Omega$



b $R_1=10 \text{ k}\Omega, R_2=100 \text{ k}\Omega$



c $R_1=1 \text{ k}\Omega, R_2=100 \text{ k}\Omega$

图 8 幅频特性曲线

Fig. 8 Amplitude frequency graph

4 总结

我们在文献[1]基础上设计了一种新型的低压低功耗 CFOA,它在只需 1.5 V 电源电压情况下,得到仅 6.2 mW 功耗。开环增益能达 81 dB ,相位余度大于 60° ,共模抑制比高达 123 dB 。与文献[1]相比,图 1 获得了与增益关系不大的带宽。与传统的

电压反馈运算放大器相比较,CFOA 具有带宽宽、转换速率高、输入电压噪声低等优点,特别适用于高速 A/D 与 D/A 转换器、高速采/保、射频、视频等高频高速电子系统。随着电路设计技术以及半导体工艺的不断发 展,CFOA 正在向更高速发展,并且有与电压反馈运算放大器相当的 DC 参数,在高速高频电子系统中必将得到广泛的应用。

参考文献:

- [1] 刘辉. 低压低功耗 CMOS 运算放大器的设计 [D]. 电子科技大学(DI200204),2002.
- [2] MAHMOUD Soliman A, SOLIMAN Ahmed M. New MOS-C Biquad filter using the current feedback operational amplifier[J]. IEEE Trans. CAS,1999,46(12):1510-1512.
- [3] PALMBO G, PENNSI S. Current feedback amplifiers versus voltage operational amplifier[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems,2001,48(5):617-623.
- [4] TAMMAM A A, HAYATLEH K, HART B, et al. Current-feedback operational amplifier with high CMRR[J]. IEEE, Trans on Circuits and Systems,2003. 49(2):1483.
- [5] FRANCO S. Design with Operational Amplifiers and Analog Ics (3rd edition) [M]. [s. l.]:Mc Graw Hill Science,2002.
- [6] ASSI A,SAWAN M,ZHU Jieyan. An offset compensated and high-gain CMOS current-feedback op-amp [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems,1998,45(1):85-90.
- [7] ALLEN Phillip E, HOLBERG Douglas R. CMOS Analog Circuit Design (Second Edition) [M]. [s. l.]:Publishing House of Electronics Industry,2002. (责任编辑:刘勇)

Design of low voltage and low power CMOS current feedback operational amplifiers

DUAN Xiao-feng, CHEN Xiang-dong, LI Wen-mo

(Computer Science and Communication Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, P. R. China)

Abstract: To the design of analog circuit, it is a challenge when its supply voltage is low. Now the typical supply voltage of analog circuit is about 2.5 ~ 3 V, but the trend suggests it will be 1.5 V, even much lower. Under this condition, great effort of research members domestic and abroad is devoted to the design of low-voltage circuit structure with standard CMOS processes. The aim of this paper is to describe a new CMOS current-feedback operational amplifiers based on the literature[1], simulation results of the CFOA, using 0.5 μm CMOS process parameters with threshold voltage 0.7 V, result in bandwidth gain-independence. Circuit parameters show a: power consumption around 6.2 mW from 1.5V supply voltage.

Key words: low voltage and low power; CMRR; CFOA; current mode circuits