

双补偿结构 I-V 转换电路在红外接收芯片中的应用

田 磊^{1,2}

(1. 西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121;

2. 西安电子科技大学 超高速电路设计与电磁兼容教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要:设计了一款用于红外通信中的 I-V 转换电路, 该电路包含了一个跨阻放大器和两个补偿结构。直流补偿电路用来补偿由环境光产生的直流光电流, 避免后级电路出现饱和; 交流补偿电路用来提高输入交流阻抗, 从而保持电路对输入信号的灵敏度。研究表明, 通过对 I-V 转换电路实现双补偿, 整体电路的增益控制及灵敏度均有显著提高。该电路采用 VIS 0.6 μm BiCMOS 工艺进行设计与流片, 在 3 V 工作电压下, 对 10 nA 到 300 μA 的直流光电流具有良好的抑制能力, 使电路的增益恒定在 110 dB, 具有良好的稳定性。

关键词: 红外接收芯片; I-V 转换电路; 双补偿结构; 跨阻放大器

中图分类号: TN491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2170-05

Design of I-V converter circuit with dual compensation structure for infrared receiver chip

Tian Lei^{1,2}

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China;

2. Key Lab of High-Speed Circuit Design and EMC, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: An I-V converter circuit was designed by using the infrared communication. The converter circuit contained a transimpedance amplifier and two compensation structures. The DC compensation circuit was used to compensate the DC photocurrent generated by ambient light and prevent the saturation at later stages. The AC compensation circuit was used to improve the AC input impedance and preserve the sensitivity of the signal of interest. The research shows, through the I-V conversion circuit to realize the double compensation, the gain control of the circuit and sensitivity are improved significantly. This circuit is implemented in the 0.6 μm BiCMOS process. Operating under 3 V, it achieved a DC photocurrent rejection ranging from 10 nA to 300 μA and the gain obtained with 110 dB with a good stability.

Key words: infrared receiver chip; I-V converter circuit; double compensation structure; transimpedance amplifiers

收稿日期: 2013-11-06; 修订日期: 2013-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(61106026); 陕西省自然科学基金(2013JM5002); 超高速电路设计与电磁兼容教育部重点实验室基金(JY0100092702)

作者简介: 田磊(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要从事高速高灵敏度光电集成电路与光电器件噪声分析方面的研究。

Email: tianlei@xupt.edu.cn

0 引言

红外无线传输技术具有低成本、低功耗、高速度等优点,因而在笔记本、PDA、家庭应用设备等领域得到广泛应用^[1-2]。一般情况下,红外信号在空间传输距离较长,到达接收端的信号较弱,所以红外接收芯片很容易受到环境光源^[3-4],例如太阳光、日光灯、白炽灯等产生的直流光电流的干扰^[5-7]。直流光电流会引起芯片内部直流工作点的移位,造成输出摆幅减小甚至失真,因此如何有效的抑制环境光产生的直流光电流的干扰,以提高对红外信号检测的灵敏度,成为红外接收器设计的一项非常重要的挑战。

文中提出了一种应用于红外接收芯片的采用双补偿机制的 I-V 转换电路^[8],有效的抑制直流光电流噪声,同时提高红外接收芯片的灵敏度。

1 I-V 转换的基本原理

光检测电路首先通过光电二极管将接收到的光信号转换成电流信号,然后利用跨阻放大器(TIA)将电流信号转为电压信号^[9-10],图 1 所示是常用的一种由运放和反馈电路组成的跨阻放大器。由于 PIN 光电二极管具有较好的线性特性^[11],外加体积小、稳定和价格便宜等优点,一般红外接收头中都采用它作光电转换器件^[12]。I-V 转换一般采用跨阻放大器,其跨阻增益可表示为:

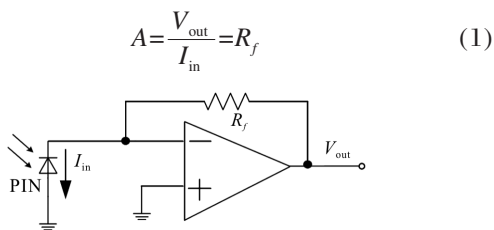


图 1 I-V 转换电路图

Fig.1 I-V converter circuit

在实际应用中,由光检测阵列产生的光电流范围在几皮安(pA)到几百微安(μA),要把信号放大到后级处理水平, R_f 数值至少在几百千欧范围。所以在环境光较强情况下,光检测阵列产生的光电流里直流分量就会很大,可达几百微安,这样很容易造成跨阻放大器输出饱和。为了解决以上问题,可采用变阻结构作为反馈增益,则改进型的 I-V 转换电路如图 2

所示。

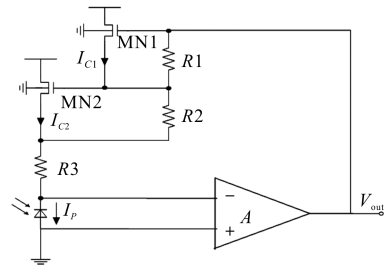


图 2 改进的 I-V 转换电路图

Fig.2 Improved I-V converter circuit

当直流环境光较大,MN1 和 MN2 都导通时,变阻结构等效阻抗为:

$$R_{eq} = (R1 + R2 + R3) - \frac{I_{C1} + I_{C2}}{I_p} R1 - \frac{I_{C2}}{I_p} R2 \quad (2)$$

式中: I_{C1} 和 I_{C2} 分别代表 MN1 和 MN2 中的流过的电流; I_p 代表有光检测阵列产生的光电流。根据公式(2)可知,当环境光很强时, I_{C1} 和 I_{C2} 增大,则在 $R1 \sim R3$ 不变的情况下, R_{eq} 降低。联系公式(1)可见,当 R_{eq} 降低时,具有该结构的电路增益也将减少,从而可以有效地避免 V_{out} 饱和。但缺点也很明显,即随着变阻结构的等效阻抗变小,跨阻放大器的增益也随之减小,这样就降低了光检测电路的灵敏度。为了解决这个问题,文中提出了一种既能抑制直流环境光噪声,又不影响跨阻放大器增益的 I-V 转换电路。

2 电路设计及原理分析

图 3 所示是文中设计的 I-V 转换电路的核心电路结构,由直流补偿电路、偏置及交流补偿电路以及跨阻放大器三部分构成。直流补偿电路用来提供输入信号的直流成分 I_{DC} ,使得只有 I_s 进入 TIA 进行放大,避免过大的直流成分流入后级电路引起饱和和失真;交

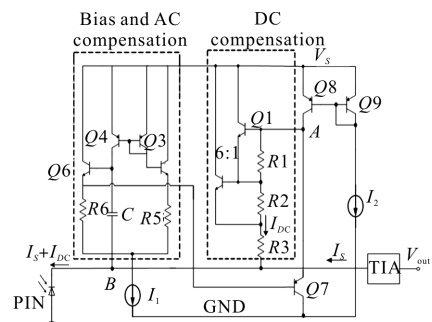


图 3 带双补偿结构的 I-V 转换原理图

Fig.3 I-V converter with dual compensation structure

流补偿电路则用来提高直流补偿电路的交流阻抗,以减小流入直流补偿电路的 I_s 的比例,从而提高光检测电路的灵敏度;最后跨阻放大器将输入的电流信号 I_s 转换成电压信号。

2.1 直流补偿电路设计

直流补偿电路就是前面所述的变阻结构,这里采用了 NPN 管 $Q1$ 和 $Q2$ 代替了图中的 MOS 管,提高了该结构的过流能力。总电阻 $(R1+R2+R3)$ 在几百千欧,与 TIA 的直流输入阻抗的并联值即为芯片的直流输入阻抗,所以二者阻值必须相匹配。

2.2 偏压及交流补偿电路设计

给 PIN 光电二极管两端加一定的反偏电压,能增加光电二极管耗尽层的宽度,大大减小了其寄生电容,同时提高载流子在耗尽层内的漂移速度,进而缩短了光电二极管光电转换的响应时间。设计中的 PIN 光电二极管工作在反偏条件下。如图 3 所示, $Q3$ 、 $Q4$ 构成 1:1 电流镜, $Q5$ 、 $Q6$ 、 $R5$ 和 $R6$ 构成对称结构,所以有:

$$V_A = V_{bQ5} = V_{bQ6} = V_S - V_{BE} \quad (3)$$

V_A 经 $R1$ 、 $R2$ 和 $R3$ 分压后给 PIN 提供偏压信号,所以 PIN 光电二极管的偏置电压为:

$$V_B = V_A - (V_{R1} + V_{R2} + V_{R3}) = V_S - V_{BE} - (V_{R1} + V_{R2} + V_{R3}) \quad (4)$$

由此可见,随着输入光电流 I 的增加, PIN 的偏压信号减小。

交流补偿电路的设计是 I-V 转换电路关键所在,关系到光检测电路的灵敏度。当输入信号中直流很大时,根据对变阻结构的分析,直流补偿电路阻抗变小,使绝大部分直流流过该支路,避免了后级跨阻放大器的饱和失真。但该低阻抗通路在滤掉直流噪声成分的同时也会分流相当一部分的 I_s 信号,使得流入后级的输入信号减少。

为了克服上述缺点,通过跨接输入端与 $Q6$ 间的电容 C ,引入交流补偿电路来增加直流补偿通路的高频阻抗。由于交流补偿电路的存在,输入信号 I_s 会在 B 点产生压降 ΔV ,经过 C 、 $Q6$ 和 $Q7$ 构成的通路,在 A 点产生几乎相同的压降 ΔV ,使得 $V_A - V_B \approx 0$,即: A 、 B 两点等电位,使 I_s 通过 $Q1$ 、 $R1$ 、 $Q2$ 、 $R2$ 和 $R3$ 回路分流到直流补偿通路中的信号就变得很小,对 I_s 来说,交流补偿电路的引入使直流补偿通路的阻抗相当大,从而使所需信号的绝大部分的 I_s 输

入到 TIA 模块,提高了系统对输入信号的灵敏度。

2.3 跨阻放大器设计

跨阻放大器将输入电流信号 I_s 转换成电压信号。该部分为了实现信号放大的功能,且不引起输出 V_{out} 饱和,分别引入直流反馈和交流反馈两条不同的负反馈通路。如图 4 所示, $R2$ 、 $Q4$ 、 $Q5$ 、 $Q6$ 、 $Q7$ 以及 $Q8$ 构成直流负反馈环路,使反相端直流电位 $V_- = V_+ = V_{ref1}$ 。 R_f 引入交流负反馈,起到放大 I_s 信号的作用,由于 I_s 很小, R_f 一般在几千欧左右,且必须要大于等于直流补偿电路中总电阻 $(R1+R2+R3)$,目的是提高跨阻放大器的直流输入阻抗,减小 V_{out} 端的饱和失真。

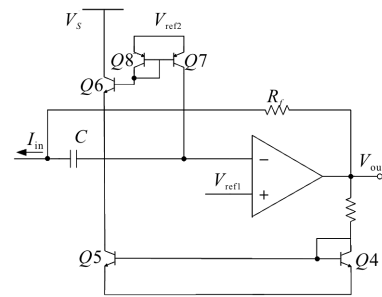


图 4 TIA 原理图

Fig.4 TIA circuit

运算放大器内部结构如图 5 所示。由于工作于 3 V 电压下,采用 MOS 电流镜作为负载,提高了运放的增益。输入采用 NPN 对管,是为了引入图 4 中的直流负反馈。

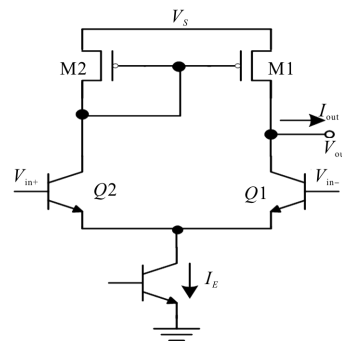


图 5 运放内部电路图

Fig.5 Inner circuit of operational amplifier

设尾电流为 I_E ,则运放跨导可表示为:

$$g_m = -\frac{I_E}{2V_T} [1 - \tanh^2 \left(\frac{\Delta V_{BE}}{2V_T} \right)] \quad (5)$$

运放增益为:

$$A = -g_m (r_{Q1} // r_{M1}) = -\frac{I_E}{2V_T} [1 - \tanh^2 \left(\frac{\Delta V_{BE}}{2V_T} \right)] (r_{Q1} // r_{M1}) \quad (6)$$

3 仿真与测试结果

文中研制的红外接收芯片,既要体现 CMOS 工艺低成本、低功耗的优势,又要兼顾 Bipolar 工艺高速、强驱动的特性,所以采用标准 0.6 μm BiCMOS 工艺实现,并通过 Hspice 进行了仿真验证。在温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,输入电压为 3 V 情况下,对电路是否含有双补偿结构的增益分别进行仿真,输入直流信号从 10 nA~300 μA 变化,观察其频率响应。由于红外发射器输出信号的载波频率为 38 kHz 和 56 kHz 两个频点,所以文中芯片也设计工作在这两个频点上,并选择 30~60 kHz 作为有效信号频率范围。

在没有交流补偿电路时,随着直流输入的增大,频响变化如图 6 所示。

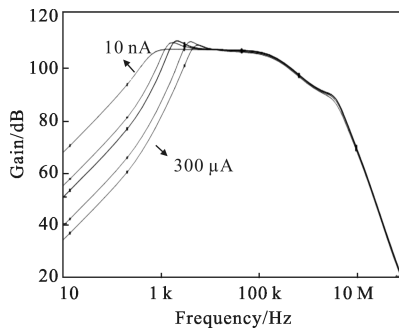


图 6 单补偿情况下的频率响应

Fig.6 Frequency response with single compensation

随着环境直流噪声从 10 nA~300 μA 的增大过程中,I-V 转换的跨阻增益有很大变化,从 105 dB 降低至 90 dB。跨阻增益的降低,大大削弱了光检测电路的灵敏度。

引入交流补偿后,使得 I-V 转换实现了双补偿结构,可以实时控制由于输入信号中交直流分量变化而引起的增益变化,图 7 是加入交流补偿后,不同

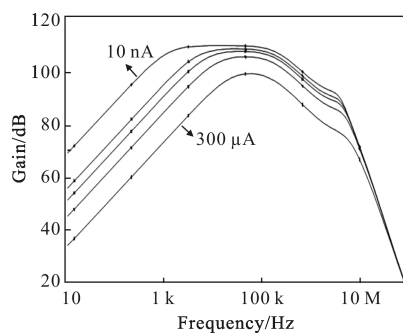


图 7 双补偿情况下的频率响应

Fig.7 Frequency response with dual compensation

直流输入下的频率响应。

随着环境直流噪声从 10 nA~300 μA 变化,I-V 转换的跨阻增益保持不变,保证光检测电路在对于不同输入光信号的高灵敏度。

为了更好地验证设计效果,用红外发射管驱动接收芯片,利用输入电压与光电流的正比关系对输出进行实测,图 8 是不同输入电压下输出信号的强度变化的实测图。输入信号频率 38 kHz,占空比 50%。利用 Tektronix TDS 3014C 数字示波器进行测量。

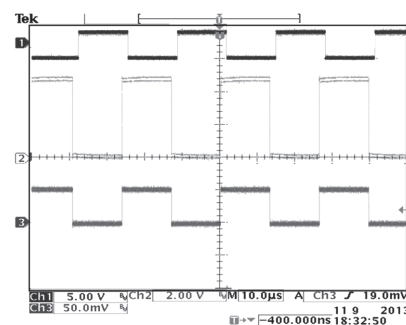


图 8 光接收芯片实测结果

Fig.8 Test result of optical receiver chip

图中顶端的波形是幅值为 4 V 的输入信号,中间的波形是幅值为 5 V 的输入信号,底部的波形是输出信号。当输入电压在 4~5 V 范围变化时,输出幅度保持 50 mV 不变。由此可见,在双补偿结构的作用下,跨阻增益几乎不变,从而保证输出信号的幅度不随光电流大小变化而增减。

由于现采用双补偿结构的 I-V 转换电路很少,所以文中将和几种常用的可变增益芯片的增益精度列表对比,如表 1 所示。

表 1 增益控制精度

Tab.1 Gain control accuracy

	This article	LH0086	PGA102	AD625
Gain accuracy	0.005%	0.01%	0.025%	0.02%

通过仿真和实测结果可以看出,文中所设计的 I-V 转换电路在双补偿电路的作用下,当光电流变化时,其输出增益无明显变化。增益变化控制精度远高于表 1 中所示的范围,所以该补偿结构具有良好的增益可控机制。

4 结 论

文中提出了一种新颖的可用于红外通信中 I-V 转换电路,采用了独特的交直流补偿技术,使得不同直流噪声输入情况下,输出信号增益保持稳定。并采用 VIS 0.6 μm BiCMOS 标准工艺设计并制造了该光接收芯片。结果表明:在工作电压为 3 V 的典型情况下,输入信号中直流分量噪声从 10 nA~300 μA 变化时,增益始终保持为 110 dB。

参 考 文 献:

- [1] Yang Peng, Liu Guizhi, Yang Hong. Kind of OTA-C band pass filter applied in infrared receiving chip [J]. *Electronic Components and Materials*, 2009, 28(2): 30-34. (in Chinese)
杨鹏, 刘桂芝, 杨虹. 用于红外接收芯片的 OTA-C 带通滤波器[J]. 电子元件与材料, 2009, 28(2): 30-34.
- [2] Khoman Phang, David A Johns. A CMOS optical preamplifier for wireless infrared communications [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems -ii: Analog and Digital Signal Processing*, 1999, 46(7): 852-859.
- [3] Yang Chunpu, Zhang Shinlin, Mao Luhong, et al. Design of 2.5 Gb/s wide dynamic range optical receiver front-end [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(6): 863-874. (in Chinese)
杨纯璞, 张世林, 毛陆虹, 等. 2.5 Gb/s 宽动态范围光接收机前端放大电路设计[J]. 半导体光电, 2012, 33(6): 863-874.
- [4] Liu Shuaifeng, Liang Yuanjun, Li Lei. Design of monolithic CMOS optical receiver front-end circuit [J]. *Microelectronics & Computer*, 2011, 28(3): 99-107. (in Chinese)
刘帅锋, 梁远军, 李磊. 单片集成 CMOS 光接收前端电路设计[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(3): 99-107.
- [5] Zhang Xingjie, Zhang Shilin, Han Lei, et al. Design and realization of a novel polycrystalline Si PIN-LED with standard CMOS technology [J]. *Journal of Optoelectronics. Laser*, 2013, 24(1): 6-10. (in Chinese)
- [6] Kim Y, Lee W, Pedram M, et al. Dual-mode power regulator for photovoltaic module emulation [J]. *Applied Energy*, 2012: 730-739.
- [7] Alex K Y Wong, Pun Kongpang, Zhang Yuanting, et al. A low-power CMOS front-end for photoplethysmographic signal acquisition with robust DC photocurrent rejection [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2008, 2(4): 280-288.
- [8] Hu Yang, Zhang Yajun, Yu Jinqian. Design of temperature control circuit for laser diode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 839-842. (in Chinese)
胡杨, 张亚军, 于锦泉. 用于半导体激光器的温控电路设计[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 839-842.
- [9] Roger Yubtzuan Chen, Tsung-Shuen Hung, Chih-Yuan Hung. A CMOS infrared wireless optical receiver front-end with a variable-gain fully-differential transimpedance amplifier [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2005, 51(2): 424-429.
- [10] Holt S, Skyba P. Electrometric direct current I/V converter with wide bandwidth [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(6): 064703-064703-5.
- [11] Fu Yanjun, Zou Wendong, Xiao Huirong, et al. Optic power control of LD drive circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 626-630. (in Chinese)
付燕军, 邹文栋, 肖慧荣, 等. 半导体激光器驱动电路的光功率控制的研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 626-630.
- [12] Jiang Wenjie, Shi Jianhua, Zeng Xuewen, et al. Response time and the small signal equivalent circuit of the photoconductive detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 792-796. (in Chinese)
江文杰, 施建华, 曾学文, 等. 光电导探测器的响应时间与微变等效电路. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 792-796.