

一种用于天文望远镜的低噪声 CCD 读出电路

陈铖颖, 胡晓宇, 黑 勇

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 设计了一种用于天文望远镜的低噪声电荷耦合器件 (Charge Coupled Devices, CCD) 读出电路. 该读出电路主要包括电容增益电路、单端转差分电路、双斜率积分电路以及缓冲器电路. CCD 读出电路采用 SMIC 0.18 μm 1P6M CMOS 工艺实现. 后仿真结果表明, 在电源电压 3.3 V, 输入信号 67 kHz, 输出信号 80 mV 峰值时, 输出信号动态范围 86 dB, 等效输入噪声 2.523 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 整体功耗 1.25 mW.

关键词: CCD; 读出电路; 双斜率; 低噪声

中图分类号: TN492

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)02-0033-04

A Low Noise Readout Circuit for Astronomical Telescope

CHEN Cheng-ying, HU Xiao-yu, HEI Yong

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

Abstract: In this paper a low noise Readout circuit for astronomical telescope is presented, which consists of capacitor-gain circuit, single-to-differential circuit, dual-slope integrator and buffer. The readout circuit is implemented in SMIC 0.18 μm 1P6M CMOS process. The post-simulation results show that in 3.3 V power supply, 67 kHz input frequency and 80 mV output, the Dynamic Range (DR) is 86 dB, equal input noise is 2.523 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, total power is 1.25 mW.

Key words: CCD; Readout circuit; Dual-slope; Low noise

1 引言

电荷耦合器件 (Charge Coupled Devices, CCD) 是一种新型图像传感器件, 采集图像时, 光感应产生的电荷信号首先存储在 CCD 器件内部的沟道中, 当控制时序信号到来时, 对应每个像素的电荷在 CCD 内部定向传输, 串行输出至读出电路放大; 之后, 由模数转换器转换为数字信号, 形成图像传感器捕捉到的原始图像信息; 该图像信息再经过后续的数字处理器、驱动器和图像显示模块完成成像显示. 与互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor, CMOS) 图像传感器相比, CCD 图像传感器具有灵敏度高、噪声低、动态范围大、集成度高的优点, 在遥感遥测、天文测量、非接触工业测量和光学图像处理等领域得到广泛应用^[1-3].

针对不同的应用领域, CCD 器件在结构上逐渐发展为线阵列 CCD 和面阵列 CCD 两大类型. 其中, 线阵 CCD 主要用于高分辨率的静态照相, 它每次只能拍摄图像的一条线, 进而通过机械装置推进完成一幅图像的拍摄, 这类 CCD 精度高, 但速度较慢, 无法用来拍摄移动的物体, 主要用于扫描仪、侦查卫星、深空探测等领域^[4]; 面阵 CCD 具有采集图像速度快的特点, 一次即能完成一幅图像的拍摄, 主要应用于数码相机和摄像机中.

目前针对天文望远镜和太空探测的线阵 CCD 读出电路主要以板级系统实现, 体积和功耗较大, 在星载应用时到极大限制. 近年来, 只有美国的超新星加速探测项目^[4] (Super Nova Acceleration Probe, SNAP) 和欧洲的超大型气象望远镜项目 (Large Synoptic Survey Telescope, LSST) 分别实现了两

收稿日期: 2014-04-29; 修回日期: 2014-06-26

基金项目: 面向感知中国的新一代信息技术研究战略性先导科技专项系统“感知节点处理器及智能平台”(XDA06020401)

款全集成的线阵 CCD 读出电路,而国内尚未有相关的设计进行报道。

基于天文望远镜线阵 CCD 应用,本文设计一种低噪声、双斜率积分器的读出电路,通过采用相关双采样的双斜率积分器结构,有效降低读出电路中低频 $1/f$ 噪声,提高读出电路的动态范围,实现大动态范围、高精度的信号输出。

2 读出电路概述

根据系统特性,CCD 读出电路的工作时钟频率在 100 kHz 以内,输出信号需要经过移除直流信号、信号放大和降低低频噪声等步骤,才能输出至模数转换器进行数字化。基于以上需求,读出电路首先采用交流耦合的方式消除 CCD 信号中直流电压;其次,CCD 器件的输出信号都为单端信号,为了在放大后获得较大的信号输出摆幅,从而得到 70 dB 以上的动态范围,实现高质量的图像信号输出,读出电路采用全差分结构,因此就需要在增益级电路和相关双采样电路之间加入一级单端转差分电路;在后级模数转换器输入信号摆幅一定的情况下,低噪声是衡量读出电路最重要的一个指标。一般限制在 $20 \mu\text{V rms}$ 之内,约 6 个噪声电子电压(一个噪声电子电压为 $3.5 \mu\text{V rms}$)。因此必须引入低噪声电路技术—相关双采样技术来实现电路的低噪声性能;为了驱动后级的 Sigma-Delta 模数转换器,读出电路最后一级还应该包含有一定驱动能力的缓冲器电路。基于以上分析,本文设计的双斜率积分器 CCD 读出电路框图如图 1 所示^[5],工作时序如图 2 所示。

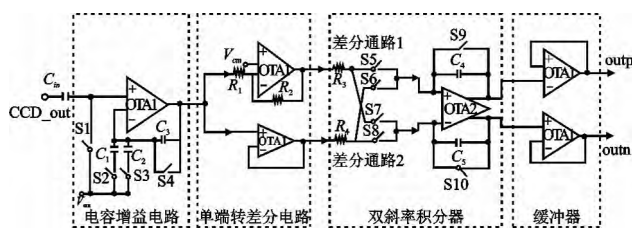


图 1 双斜率积分器 CCD 读出电路框图

CCD 读出电路主要包括电容增益电路、单端转差分电路、双斜率积分器以及缓冲器电路。CCD 输出信号通过隔直电容 C_{in} 耦合至读出电路。依据图 2 中的时序,以一个 $20 \mu\text{s}$ 的读出电路周期为例,即读出电路的工作频率为 50 kHz。首先,钳位开关 S1 在 CCD 器件复位期间闭合 $4 \mu\text{s}$,将直流共模电压 V_{cm} 送至运放输入端。复位开关 S4、S9 和 S10 与 S1 相位相同,用于消除上一积分周期内各自并联电容上

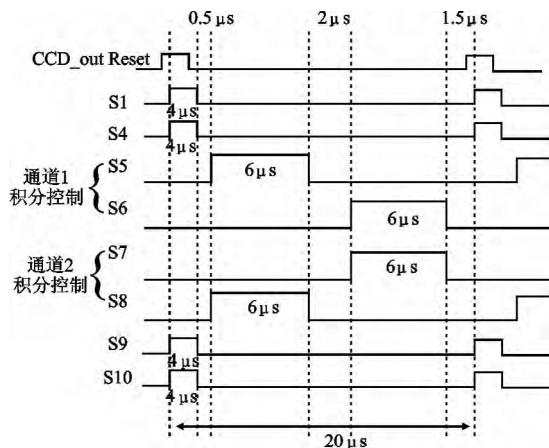


图 2 读出电路工作时序

的残余电荷。开关 S2 和 S3 控制增益分别为 4 倍和 8 倍,一旦增益确定,则 S2 或 S3 在整个读出周期内闭合。单端转差分电路由一个同向单位增益缓冲器和一个反向单位增益缓冲器组成,实现单端 CCD 输出信号到差分信号的转变。双斜率积分器属于相关双采样技术的一种,它不仅降低了读出电路的低频 $1/f$ 噪声,还有效降低了单端转差分电路带来的失调电压。在复位开关 S9 和 S10 完成复位操作之后,积分开关 S5、S6、S7、S8 相继开始动作,积分时间都为 $6 \mu\text{s}$ 。差分开关之间的时间间隔为 $2 \mu\text{s}$ 。积分完成后,周期内还留有 $1.5 \mu\text{s}$ 的数据保持时间,以供后级模数转换器进行采样。

3 模块电路设计

在电容增益电路和单端转差分电路中,为了保证一定的电流驱动能力,并获得较快的建立时间、较好的线性度和较大的输出摆幅,本文采用两级密勒补偿、差分输入单端输出的跨导放大器结构,具体电路如图 3 所示。仿真结果显示,该跨导放大器直流增益 79 dB,单位增益带宽 21 MHz。

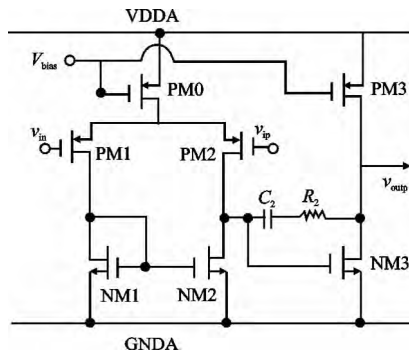


图 3 跨导放大器

为了抑制 CCD 读出电路中低频 $1/f$ 噪声,设计者

通常采用相关双采样技术进行设计. 相比普通相关双采样技术和钳位采样技术, 双斜率积分法更适用于线阵 CCD 中. 双斜率积分法的原理如图 4 所示^[6].

当积分器开始工作时,开关 S_3 首先闭合,积分电容 C 放电,清除上一周期内的残余积分电荷;在复位期间开关 S_1 闭合, S_2 断开, $1/f$ 噪声、复位噪声等低频噪声经过一反向器后对其进行积分;在信号输出期间, S_2 闭合,对叠加有 $1/f$ 噪声、复位噪声的有用信号电平进行正向积分.在输出周期结束前积分结束,电路输出电压为有用的信号.双斜率积分法与相关双采样法在本质上是相同的,都是在一个周期内对同一像素进行前后两次采样(或积分),电路的输出为两次采样之差,消除了其中的噪声信号,从而获得有用的输出信号.但是由于二者 RC 常数不同,使两种方法又各具特点.对于相关双采样, RC 值较小,可以迅速对信号进行采样,比较适用于图像高速采集的场合;而双斜率积分法中的 RC 常数相对要大得多,只要满足动态范围要求,它可以在复位时间内任意选取积分时间,且其本身含有低通滤波特性,无需另外的低通滤波器电路.本文设计的全差分双斜率积分器如图 5 所示.

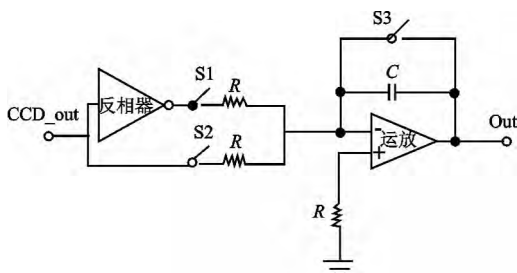


图 4 双斜率积分器原理

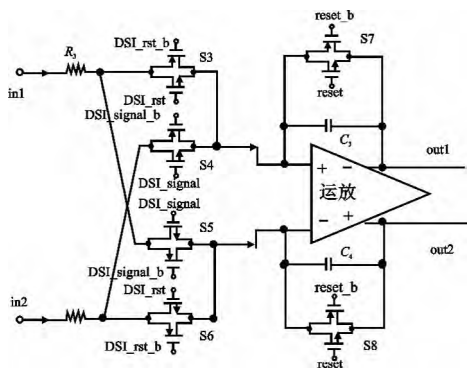


图 5 双斜率积分器

开关 S3、S4、S5、S6 都采用了 CMOS 开关,它们共同组成了差分采样开关阵列,其导通电阻与积分电阻串联,共同决定了积分器的积分常数。因此,在尺寸选择时应该在合理的范围保证导通电阻值尽可

能小,避免对积分常数造成影响。在本设计中 NMOS 和 PMOS 的宽长比都选择为 $10\ \mu\text{m}/0.35\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}/0.35\ \mu\text{m}$ 。电阻 R_3 和 R_4 设计为 $5\ \text{k}\Omega$, 积分电容 C_3 和 C_4 都为 $10\ \text{pF}$ 。

积分器中运放采用全差分两级连续时间共模反馈电路结构,具体电路如图 6 所示. 其中连续时间共模负反馈电路结构采用镜像第一级主运放的结构,一方面降低了功耗,另一方面保证共模反馈电路与主运放在交流特性上保持完全一致. 因为共模反馈电路的输出级与主运放的输出级可以完全共用,电容补偿电路也完全一样. 只要主运放频率特性是稳定的,则共模负反馈也是稳定的^[7].

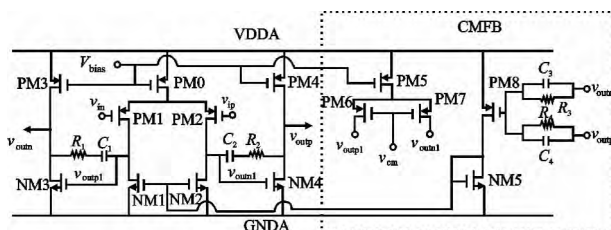


图 6 两级全差分运算放大器

最终设计的运放直流增益 78 dB, 相位裕度 72 度, 单位增益带宽 15 MHz. 同时为了优化跨导放大器的噪声性能, 减小低频 $1/f$ 噪声, 主电路第一级输入晶体管的尺寸都应该选择的较大, 在本次设计中 PM1 和 PM2 宽长比都为 $50\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$. 由于 R_3 与 R_4 与主电路第二级的输出阻抗并联, 直接决定了直流增益, 较大的 R_3 与 R_4 可以保证加入共模反馈电路后, 直流增益基本不变; 而 C_3 与 C_4 的电容值决定了交流信号可通过的下限频率. 在本电路中 R_3 与 R_4 为 $100\ \text{k}\Omega$, C_3 与 C_4 为 $1\ \text{pF}$.

4 仿真结果

本文设计的读出电路读出基于 SMIC 0.18 μm 1P6M CMOS 工艺设计实现, 整体版图如图 7 所示, 所占面积为 0.8 mm^2 ($1\text{ mm}\times 0.8\text{ mm}$).

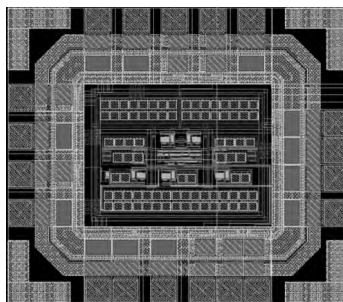


图 7 读出电路版图

完成读出电路版图后,对整体电路进行反提后仿真,设置电容增益为 4 倍,加入低电平为 5 mV(模拟噪声信号),高电平为 20 mV(模拟 CCD 有用信号),周期为 15 μ s(频率约为 67 kHz)的方波信号模拟 CCD 器件的信号输出,仿真结果如图 8 所示,从上至下依次为 CCD 输出信号、积分器复位信号、积分器积分信号以及输出信号.可见在复位周期和积分周期内,读出电路很好的完成了对噪声信号和有用信号的积分功能.

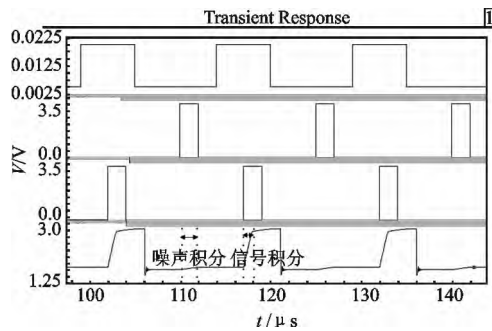


图 8 读出电路仿真结果

之后,对读出电路进行噪声性能仿真,仿真结果如图 9 所示.在输入信号频率为 67 kHz 时,等效输入噪声仅有 2.523 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$.对 1 Hz 至 100 kHz 内的噪声进行积分,可得到等效输出噪声电压为 1.974 μ V rms,仅相当于 0.564 个噪声电子电压,噪声性能良好.对应单边输出幅度为 40 mV 时,信号动态范围接近 86 dB.本文设计的读出电路性能总结于表 1.

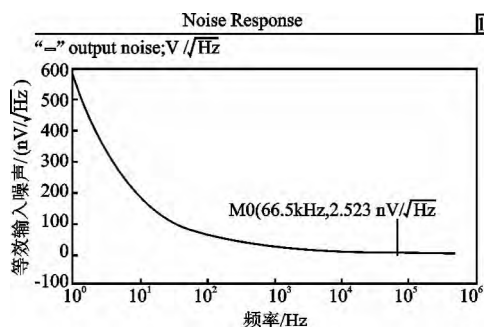


图 9 等效输入噪声仿真结果

5 结束语

文中设计了一种用于天文望远镜的低噪声 CCD 读出电路.该读出电路主要包括电容增益电路、单端转差分电路、双斜率积分电路以及缓冲器电路.读出电路中通过采用双斜率积分器,有效降低了电路的 1/f 噪声.该 CCD 读出电路采用 SMIC 0.18 μ m 1P6M CMOS 工艺实现,后仿真结果表明,在电

表 1 读出电路性能总结

参数	CCD 读出电路
工艺	SMIC 0.18 μ m 1P6M
电源电压	3.3 V
信号带宽	100 kHz
等效输入噪声	2.523 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
最大输出信号动态范围	86 dB
功耗	1.25 mW (600 μ W@OTA for cap-gain circuit and S-to-D circuit; 450 μ W@OPA for integrator; 200 μ W@buffer)
芯片尺寸	1 mm $\times$ 0.8 mm

源电压 3.3 V,输入信号 67 kHz,输出信号 80 mV 峰值时,输出信号动态范围 86 dB,等效输入噪声 2.523 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$,整体功耗 1.25 mW,满足了 CCD 读出电路的信号精度应用需求.

参考文献:

- [1] Prokop M, Mc Curnin W, Stradling L. Millisecond readout CCD camera[J]. IEEE Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2003, 1757(7):268-278.
- [2] Wang W H, He B, Ren J Y. Design of self-check figures in linear CCD imaging system[J]. IEEE Guangxue Jingmi Gongcheng/Optics and Precision Engineering, 2009, 17(8):2011-2016.
- [3] 徐美华,樊裕乐,李科. CCD 图像采集系统的低功耗流水线 ADC 设计[J]. 微电子学与计算机,2010,27(7):164-167.
- [4] Hiroshi N, Daisuke M, Naohisa A, et al. Performance of an analog ASIC developed for X-ray CCD camera readout system onboard astronomical satellite[J]. IEEE Transactions on nuclear science, 2009, 56(3):747-751.
- [5] Walder J P,Chao G, Genat J F, et al. A low power, wide dynamic range multigain signal processor for the SNAP CCD[J]. IEEE Transactions on nuclear science, 2004, 51(5):1936-1941.
- [6] 许秀贞,李自田,薛利军. CCD 噪声分析及处理技术[J]. 红外与激光工程,2004, 33(4):343-347.
- [7] 陈铖颖,黑勇,范军,等. 一种基于斩波技术的热电堆读出电路设计[J]. 固体电子学与进展, 2013,33(4):371-376.

作者简介:

陈铖颖 男,(1982-),助理研究员.研究方向为 CMOS 射频和模拟集成电路设计. E-mail:chenchengying@ime.ac.cn